

Модернизация мюонного детектора

Год 2019

Группа ПИЯФ Мюонного Детектора ЛНЦб

Лидер группы А.А. Воробьёв

- Маев Олег (deputy project leader
- Котряхова Софья (electronics upgrade coordinator)
- Бондарь Николай
- Ильин Дмитрий
- Чубыкин Алексей (аспирант)
- Нурамаатов Арсен (студент 3 курс СПбГУ)

Отдел мюонных камер
 В.С. Козлов
 Б.В. Бочин

Отдел радиоэлектроники
 В.Л. Головцов
 Л.Н. Уваров

Текущий 2019 год был первым годом масштабной модернизации эксперимента ЛНСб, фактически создания новой экспериментальной установки, ставящей цели ускорения записи регистрируемых событий с 1.1МГц, до 30-40МГц и пятикратного увеличения светимости, до $2 \times 10^{33} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Для этого создаются принципиально новые детекторы и меняется вся электроника для контроля и сбора данных.

Исключение составляют два детектора – Калориметр и Мюонный, где обновляется только офф-детекторная электроника.

ПИЯФ активно участвует в этой программе, которая включает изготовление запасных мюонных камер для нескольких регионов Мюонной Системы, установка и ввод в эксплуатацию новой электроники, а также, разработку и изготовление новых мюонных камер высокой гранулярности для внутренних регионов станций М2 и М3 Мюонной Системы.

В рамках данной программы в ПИАФ уже были произведены и доставлены в ЦЕРН запасные камеры для регионов М2R3, М2R4, М3R3 и М4R2.

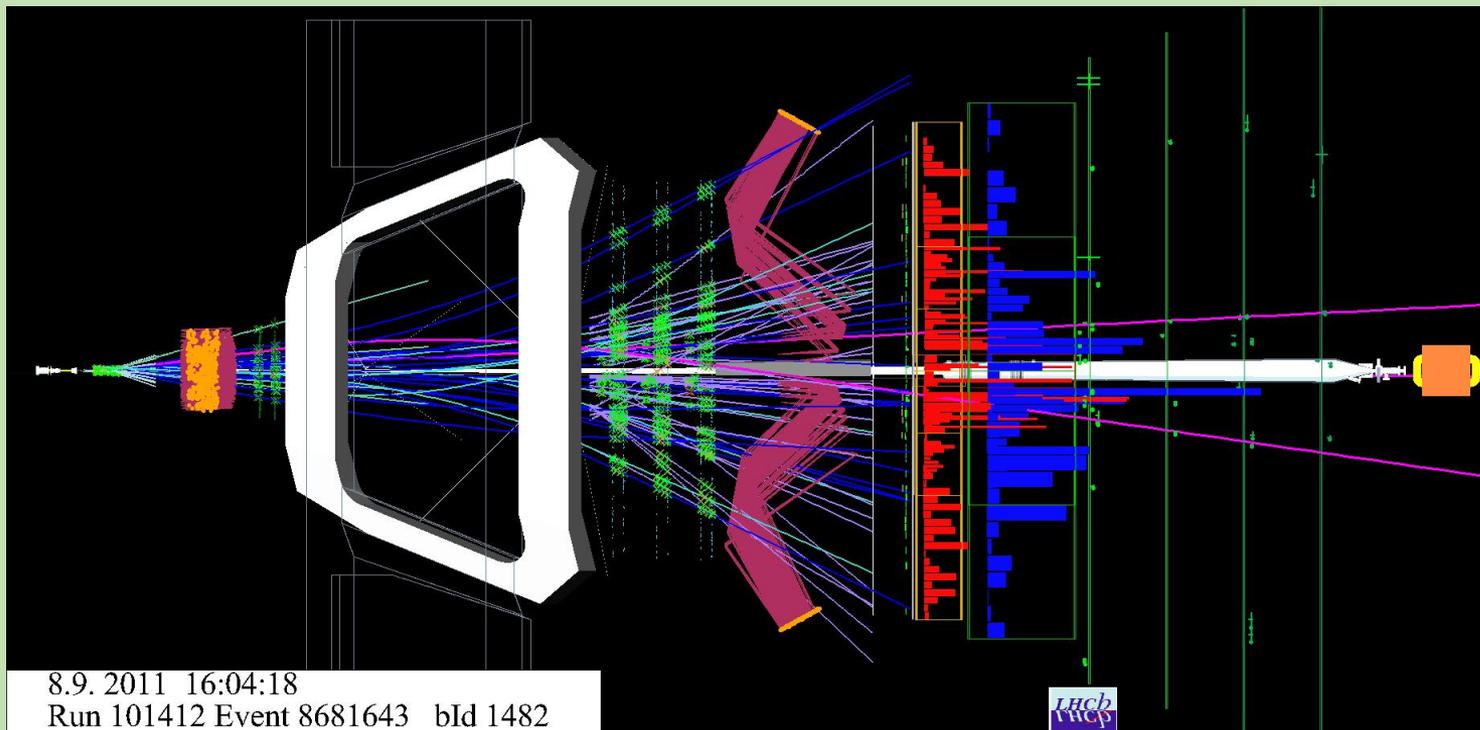
HLСb детектор планировался для работы при светимости пучка $\sim 2 \times 10^{32} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$

Реально работал при светимости $\sim 4 \times 10^{32} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ - RUN1&RUN2 (2010-2018)

Надо, чтобы работал при светимости $\sim 2 \times 10^{33} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ – RUN3&RUN4 (2021-2030)

В дальнейшем светимость будет повышена до $\sim 2 \times 10^{34} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ – RUN5... (2032..)

Желательно, чтобы детектор работал эффективно и при этой светимости .



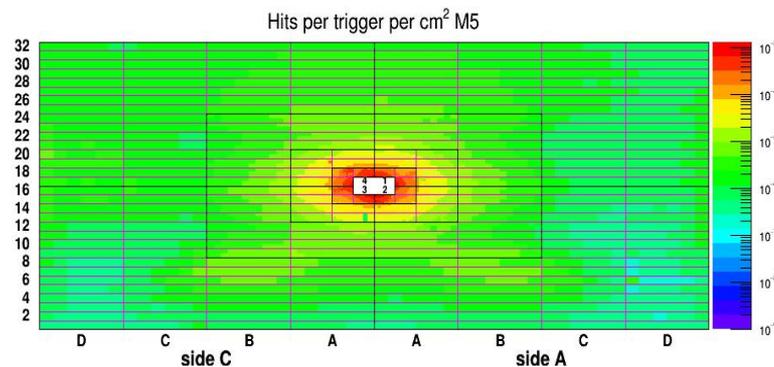
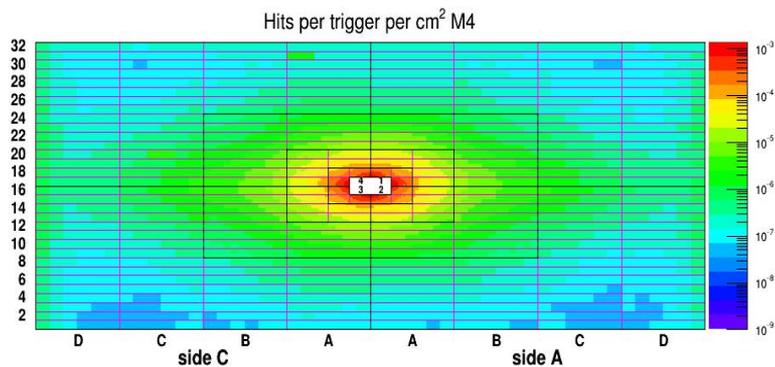
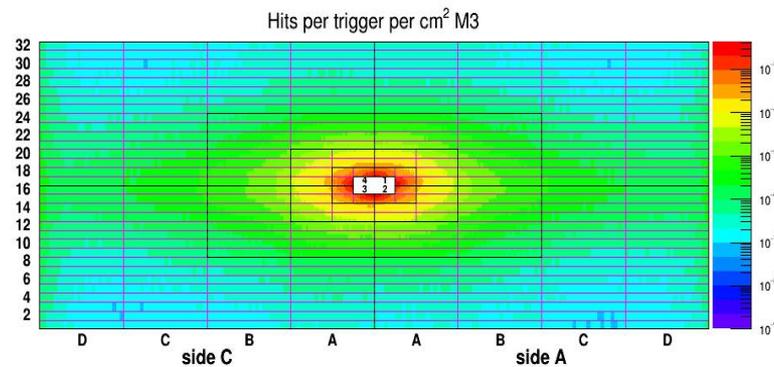
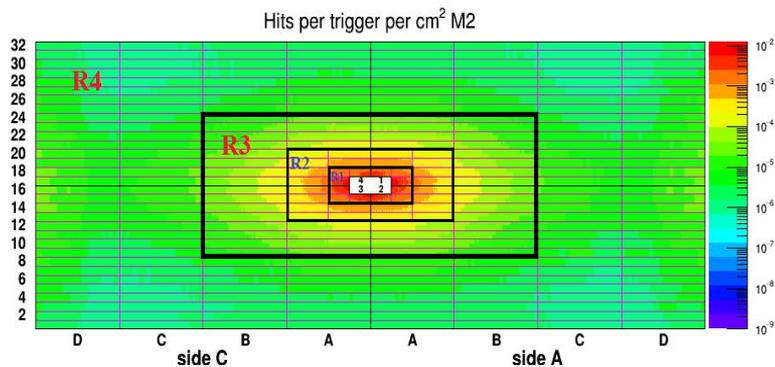
8.9. 2011 16:04:18
Run 101412 Event 8681643 bId 1482

$L \sim 440 \text{ Hz}/\mu\text{b}$, $\mu \sim 1.1$ 13 TeV

FILL 7234, 29.09.2018

Run 216253 to 216273

Magnet UP (-)



Эффективность детектора всегда была не менее 99%

Поскольку основной задачей мюонного детектора является идентификация мюонных треков с высокой эффективностью, то главным требованием к детектору после модернизации является:

- 1. Обеспечить высокую эффективность регистрации при светимости пучка $2 \times 10^{33} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$**
- 2. Сохранить ошибку определения мюонов минимально возможной.**
- 3. Оценить возможность применения пропорциональных камер при светимости пучка $2 \times 10^{34} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$**

Для реализации этих требований необходимо выполнить следующие работы (**кроме новой электроники**):

- 1. Обеспечить детектор необходимым количеством запасных камер.**
- 2. Протестировать камеры, установленные на детекторе. Устранить выявленные дефекты.**
- 3. Подготовить станции M2 и M3 для установки камер повышенной гранулярности.**
- 4. Сделать прототип камеры M2R1 и протестировать на пучке протонов.
Разработать новый вариант сбора данных и опробовать его на прототипе M2R1 в условиях больших загрузок на установке GIF++.**

1. Обеспечить детектор необходимым количеством запасных камер.

24 камеры изготовлены в ПИЯФе и прибыли в ЦЕРН в 2018 г.

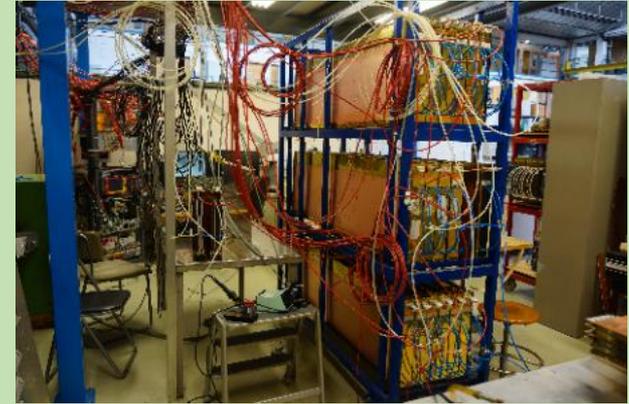
К настоящему времени:

| | Вып. | В раб. |
|--|------|--------|
| • Прошли тест по утечке газа | 24 | |
| • Прошли тест по высокому напряжению | 14 | 4 |
| • Установлены соединительные платы | 23 | |
| • Разведено высокое напряжение | 22 | |
| • Собран корпус камеры | 14 | 1 |
| • Разведено низкое напряжение | 14 | 1 |
| • Установлена электроника, проведён тест | 14 | |
| Полностью готовы 14 камер | | |

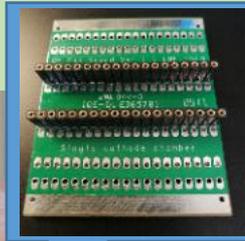
Последовательность сборки камер



1. Проверка на утечку газа



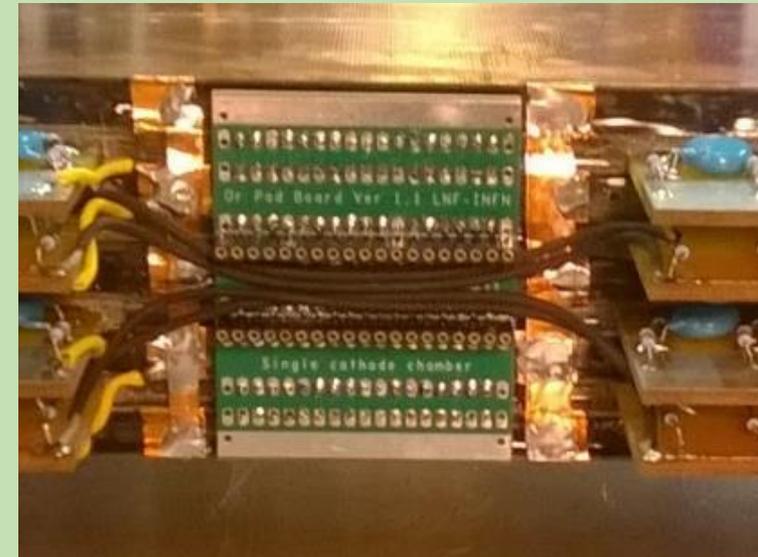
2. Проверка на высокое напряжение



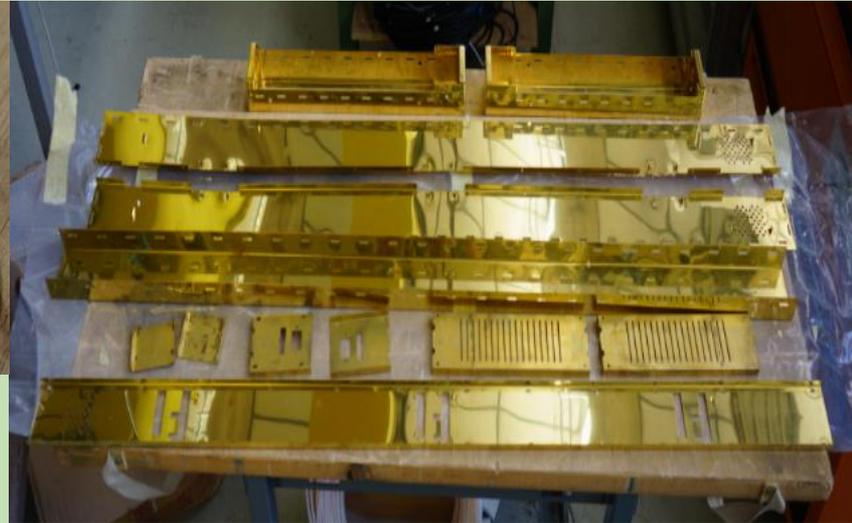
3. Распайка соединительных плат



4. Разводка высоковольтных линий



Сборка корпуса камер



Из кучи деталей выбираются подходящие для данного типа камер

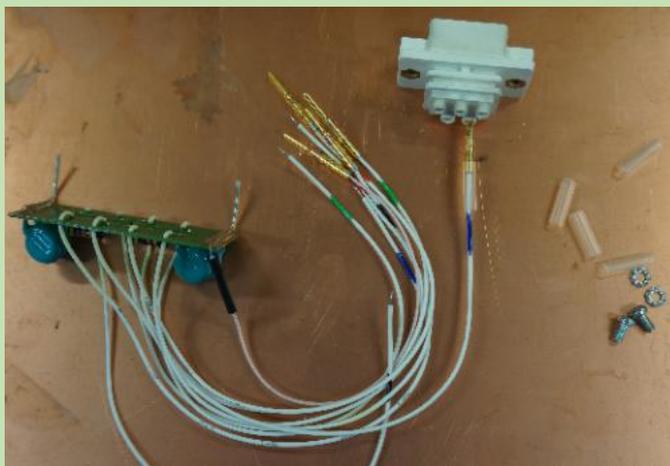
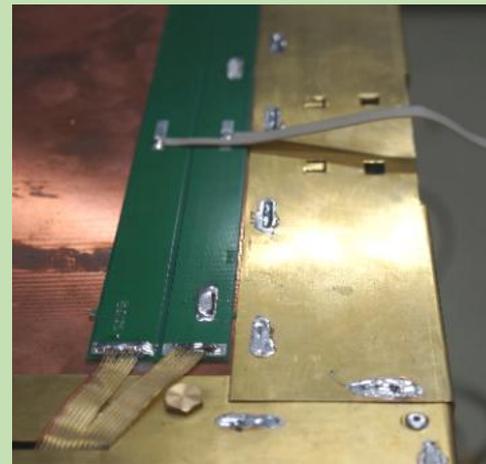
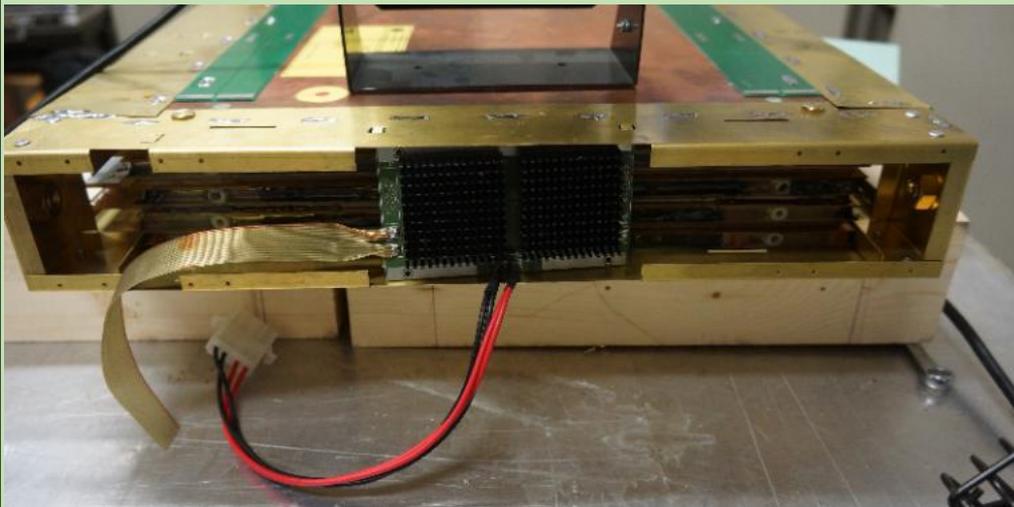


Экраны на ВВ площадках

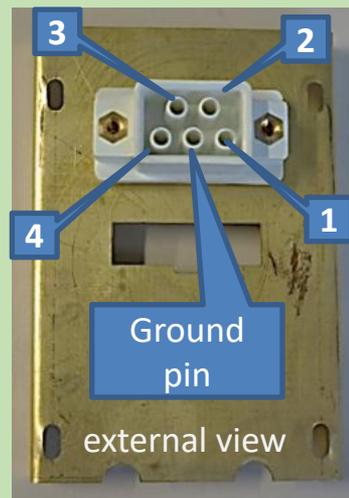


Заклепками и пайкой собирается корпус (Faradey case)

Разводка напряжения питания усилителей

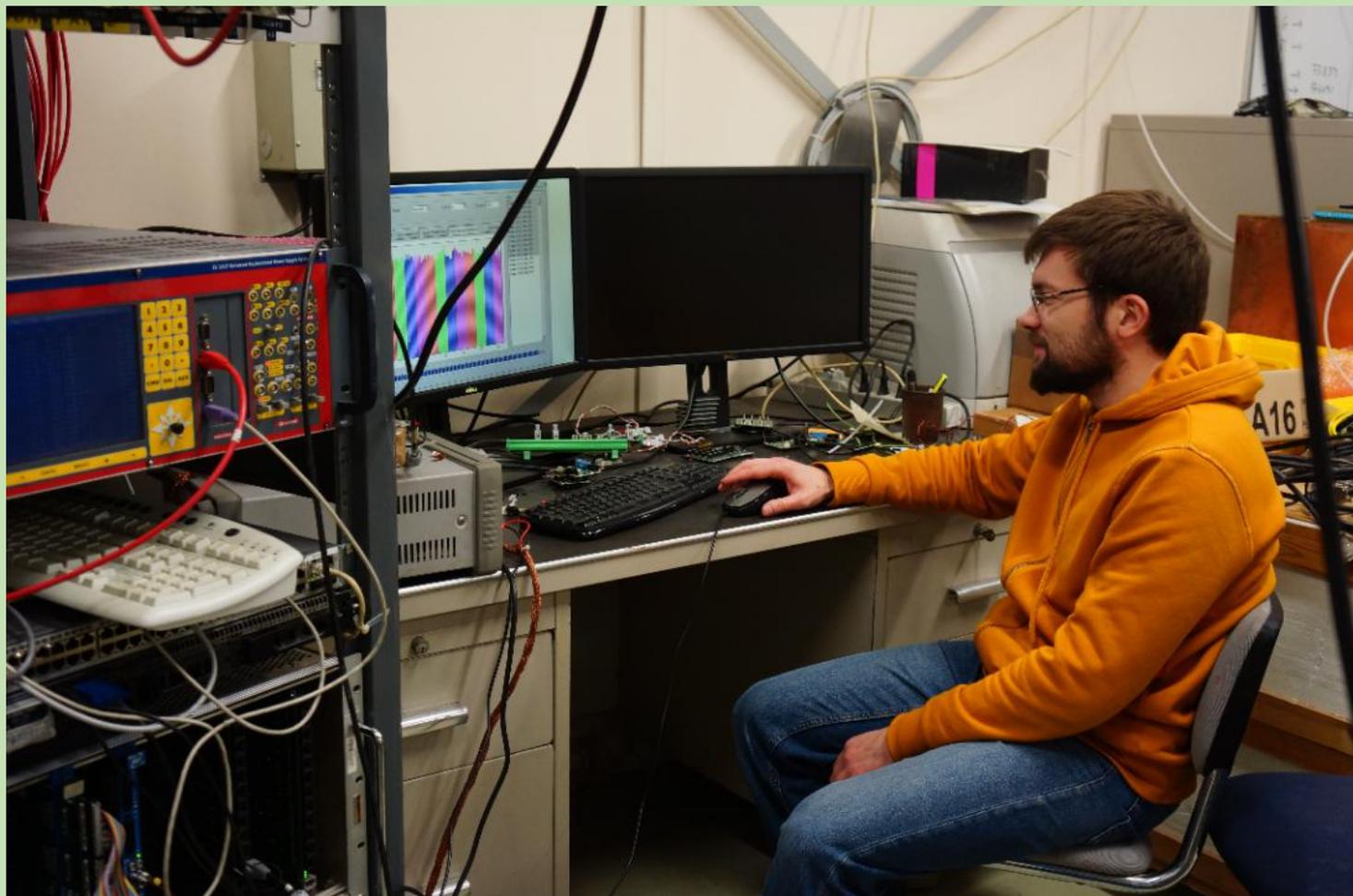


12/25/2019



**Установка
высоковольтного
разъема**

Финальное тестирование камер



Новая электроника сделана в Италии и предназначена для:

- ❖ увеличения скорости набора данных с 1.1МГц до 30-40МГц.
- ❖ модернизации системы управления и мониторингом электроники эксперимента

Её комплект состоит из 3 совершенно новых модулей:

- ✓ nODE – модуль сбора данных (200 шт.)
- ✓ nSB – модуль обслуживания прикамерной электроники
- ✓ nPDM – Модуль распределения тактовых импульсов
- ✓ Плюс в сервесном крейте ставится новый “Back Plane”

В настоящее время в Италии идет интенсивное тестирование поступающей электроники

Группа ПИЯФ играет ключевую роль в тестировании и вводе в эксплуатацию новой электроники для управления детектором и для сбора данных.

Соня Котряхова несёт ответственность в качестве официального **Координатора модернизации электроники** в Мюонной системе.



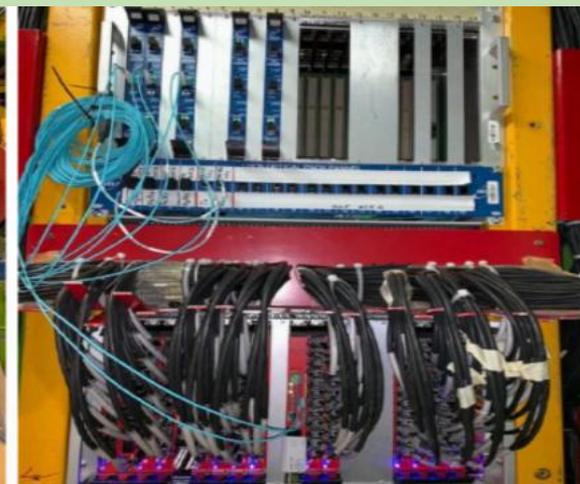
Наше участие в создании новой электроники:

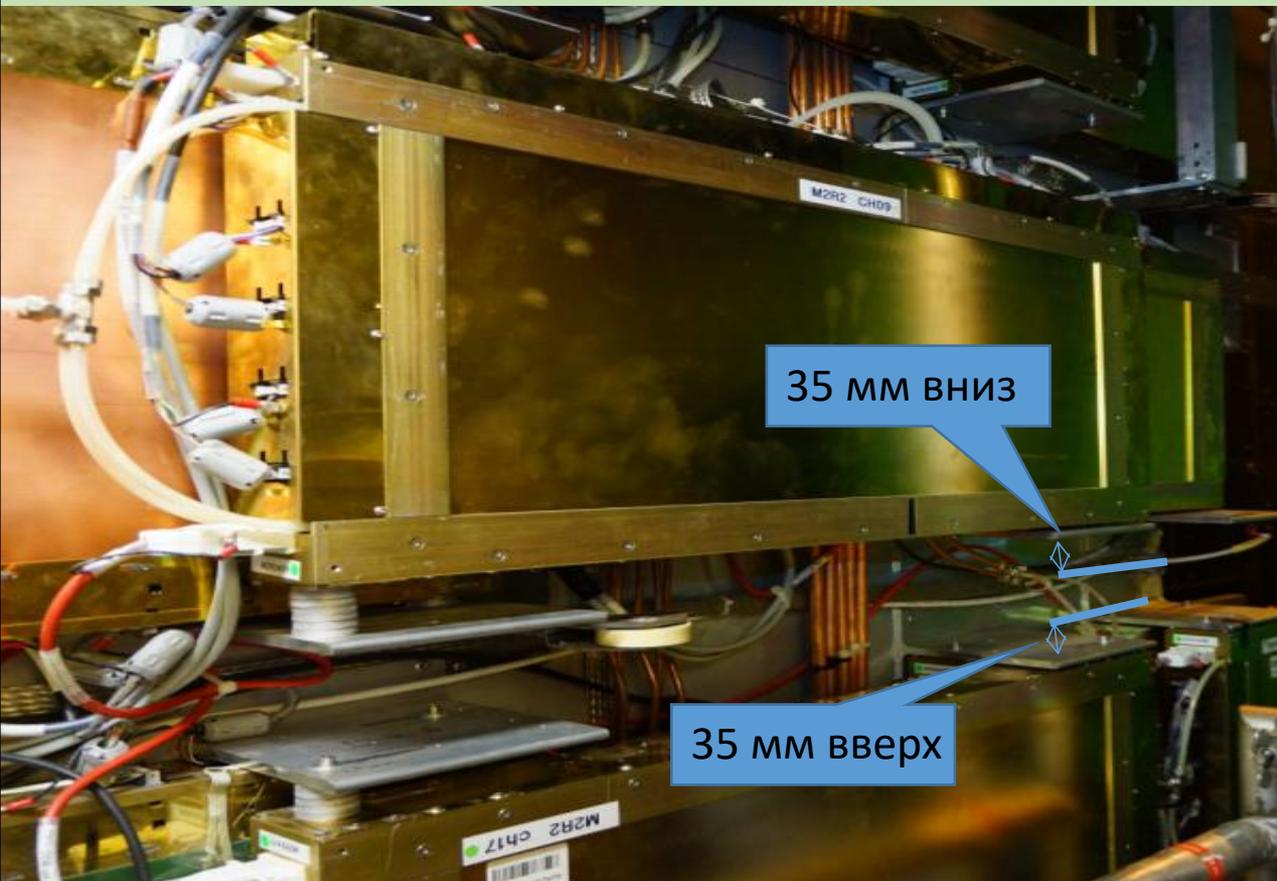
1. Установка и ввод в эксплуатацию новых модулей в детектор
2. Тестирование и устранение ошибок в прототипах и первых опытных партиях nSB , включая создание необходимого для решения этих задач, программного обеспечения
3. Работы по созданию новой базы данных (Relational DataBase) для компонентов и параметров детекторной электроники для контроля и сбора данных в рамках модернизации
4. Работа по обновлению и модернизации рабочих проектов ECS (Experiment Control System) выполненных на базе WINCC-OA, обеспечивающих контроль и управление детектором
5. Создание тестовой установки (mini-DAQ), включая разработку и реализацию программного обеспечения.

Тестовая установка в экспериментальном зале.

❖ Слева - mini-DAQ

❖ Справа – тестируемые модули



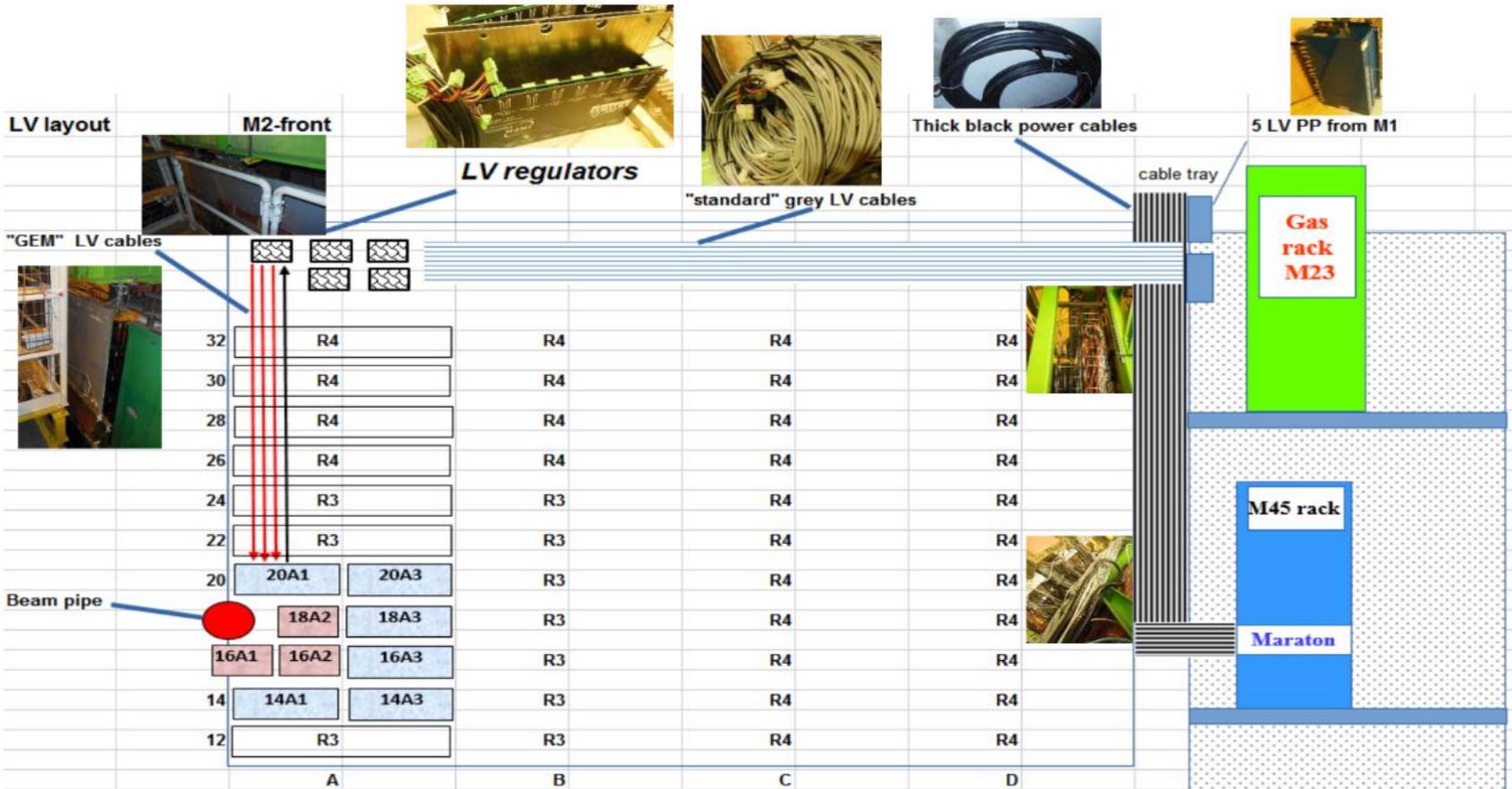


На стороне "С" эти работы частично выполнены. Параллельно проводилось тестирование и ремонт камер по мере необходимости.

Всего надо изготовить и заменить 48 камер. Предполагается установка камер по мере их готовности.

Для оперативной замены существующих камер на новые необходимо:

1. переставить балконы для камер M2R2. Порядка 15 балконов на сторону
2. Проложить дополнительные сигнальные и контрольные кабели по 312 кабелей на сторону



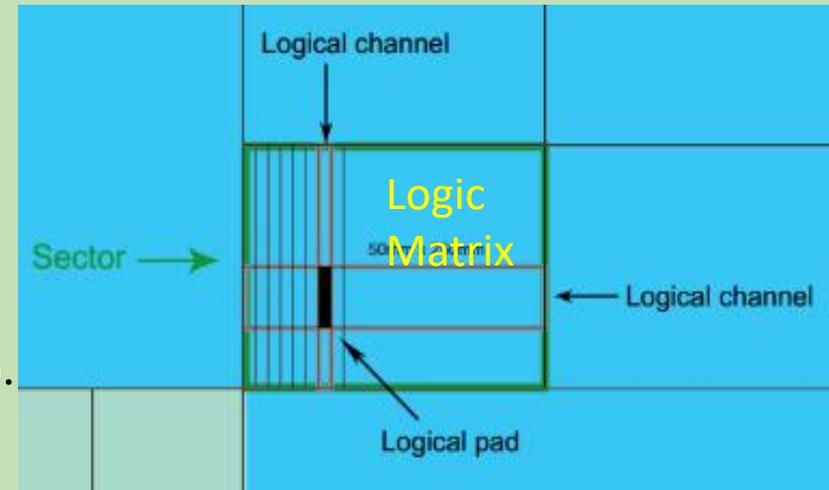
3. На каждую сторону необходимо:

- Установить по одному дополнительному источнику питания.
- Установить по одному регулятору напряжения для каждой камеры.
- Проложить новые линии питания для камер

Структура считывания сигналов с камер



Показана часть 4-го региона,
а также логические каналы и пады



Все камеры имеют по 4 газовых промежутка
К усилителю подключено по 2 газ. промежутка

Детектор разделен на триггерные сектора (ТС).
Координаты в ТС определяются логическими
каналами X и Y. Такая организация сбора

данных позволила сократить количество фронт-энд электроники почти в 2 раза и считывающей электроники примерно в 1,5 раза, и обеспечить эффективную работу детектора при светимости вплоть до $\sim 4 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. При росте светимости пропорционально растет и количество частиц, одновременно попадающих в “Logic Matrix”, а это ведет к квадратичному росту считываемых частиц, большая часть из которых оказываются мнимыми (Ghosts). В основном логические каналы образованы “IV” модулями, кроме камер в регионах 1 и 2.

Обоснование необходимости камер повышенной гранулярности

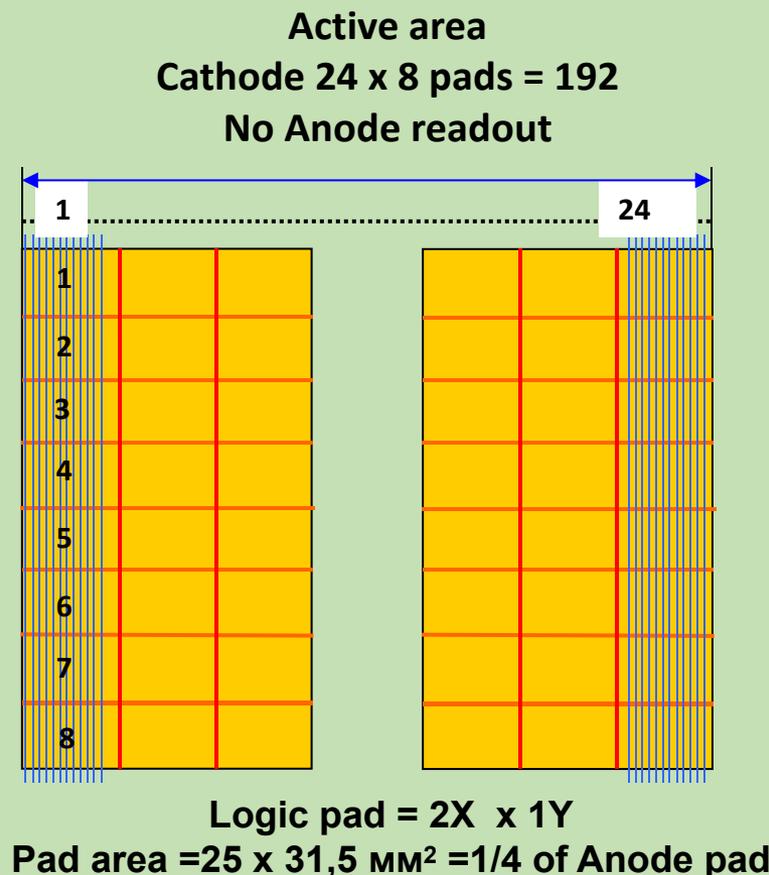
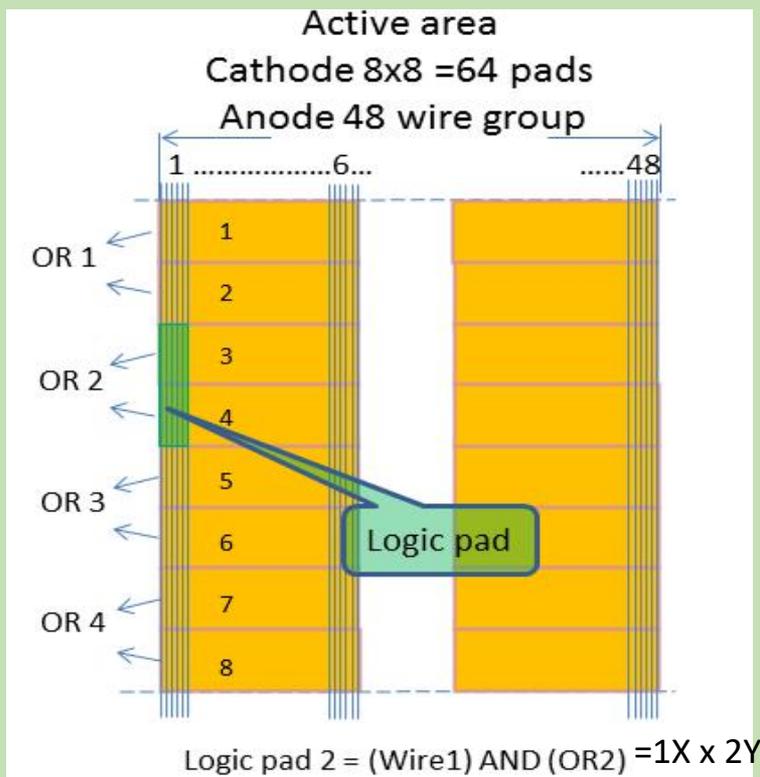
Несколько сценариев уменьшения неэффективности были оценены по эталонным физическим каналам с двумя или тремя мюонами в конечных состояниях, используя $B_s^0 \rightarrow \mu + \mu$ - в качестве примера, результаты могут быть обобщены следующим образом:

- Если ничего не изменять в степени детализации мюонного детектора, потеря события после L S2 оценивается в 9,6%;
- При запланированном изъятии IB потери будут снижены до 7,6%;
- Если дополнительно установить камеры высокой гранулярности M2R1 (12 камер), M3R1 (12 камер) и M2R2 (24 камеры), потери снизятся до 4%.

Так как изначально ПИЯФ группа предлагала использовать камеры повышенной гранулярности для работы при высокой интенсивности, и поскольку Итальянская команда использовала свои средства для модернизации электроники, мы взяли эту часть работы, тем более, что мы уже сделали и испытали прототип высокогранулярной камеры M2R2.

Чтение данных в камерах 1-х и 2х регионов

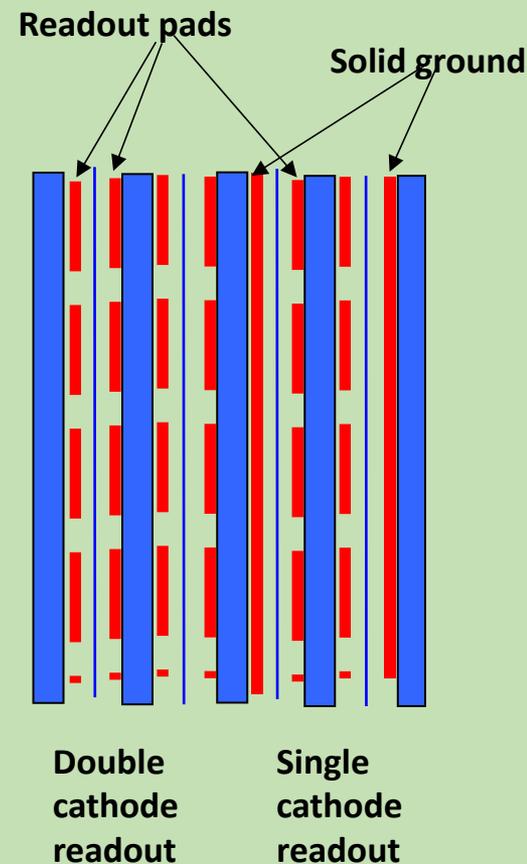
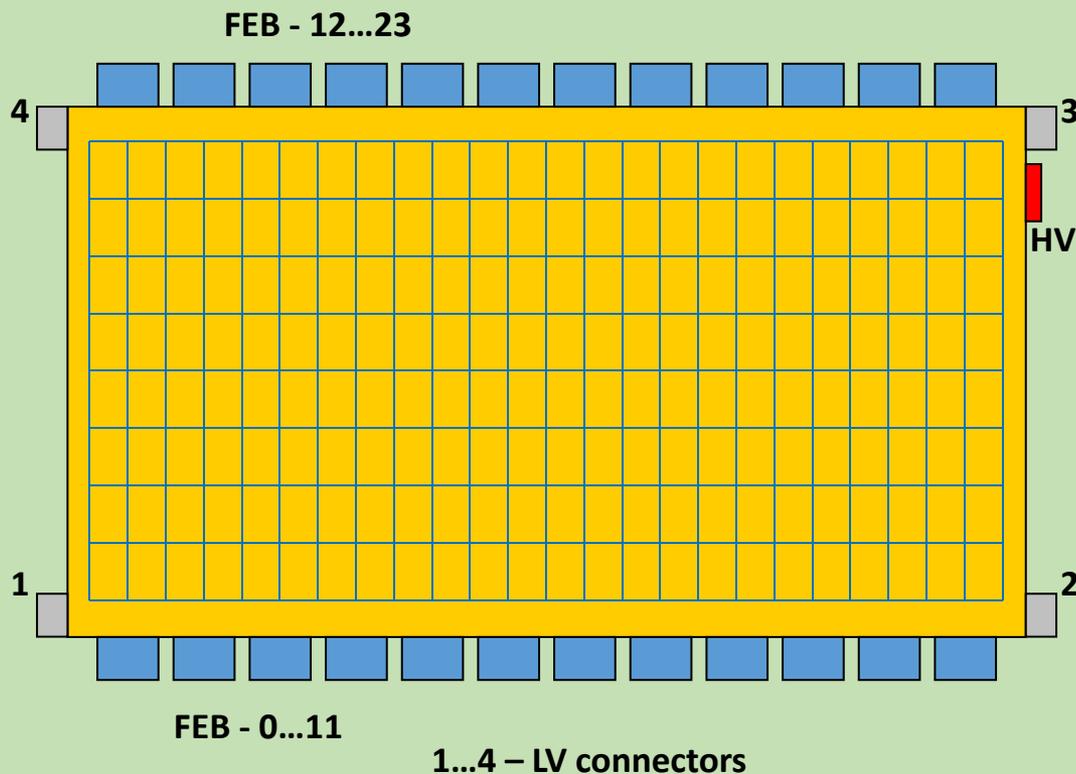
Старая и Новая камеры



При светимости $2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
ожидаемая загрузка 0.1 МГц/см^2
При площади "Logic matrix" $\sim 75 \text{ см}^2$
загрузка на канал электроники $\sim 1.3 \text{ МГц}$

В Падовом вариате считывания
загрузка составляет $\sim 0.6 \text{ МГц}$

Структура прототипа камеры M2R2



Расположение сигнальных электродов (падов) на катодных поверхностях камер. На каждом сигнальном катоде размещено по 192 пада, 24 по горизонтали и 8 по вертикали. Справа показано расположение сигнальных катодов внутри газовых промежутков.

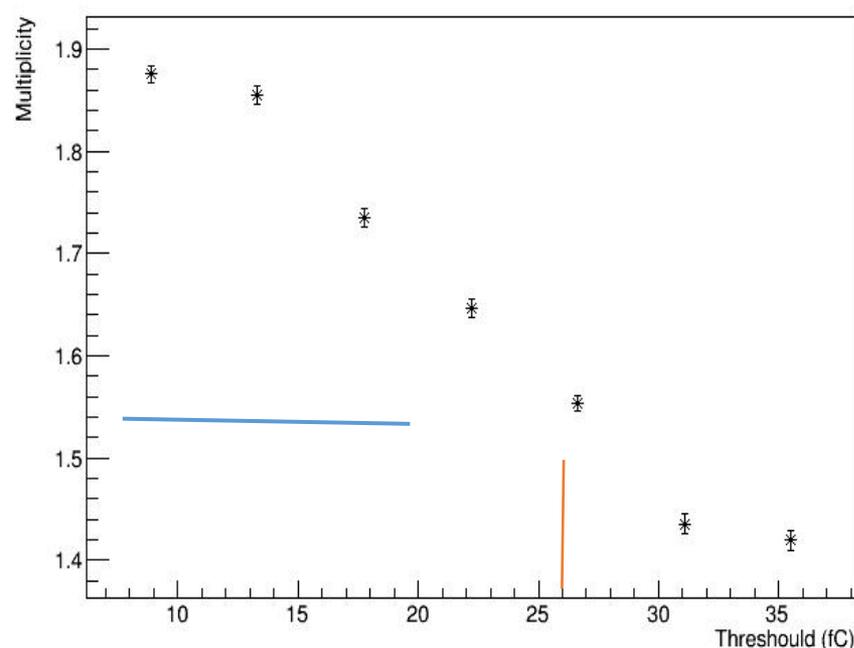
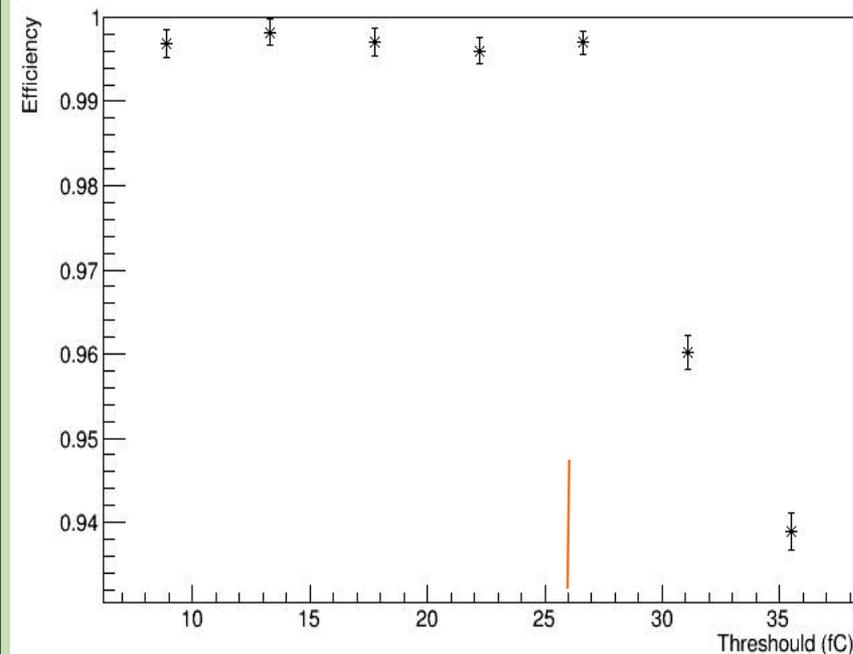
Камера M2R2. Результат тестов на GIF++

Chamber efficiency vs threshold

Cluster size vs threshold

Efficiency

Hit multiplicity



Optimal threshold – 26 fQ

Cluster size for optimal threshold – 1.55

Estimated cluster size for M2R1 from this results 2.0

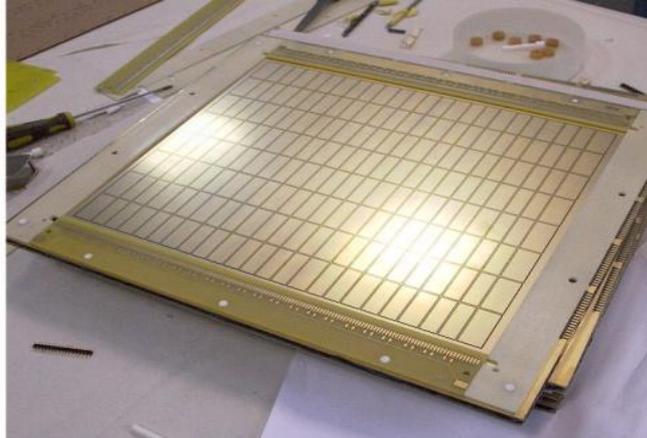
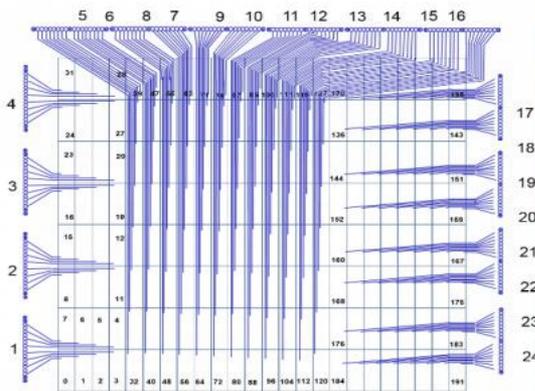
Изготовление прототипа камеры M2R1

Расположение
сигнальных выводов

Распайка сигнальных
разъёмов

Катодная плата

Cathode plate the pads traces



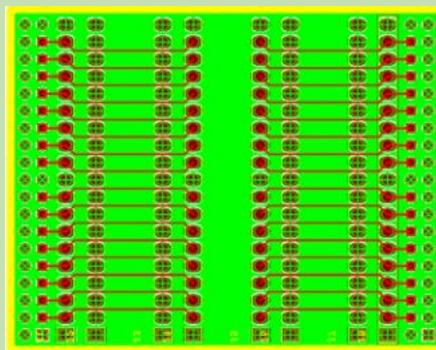
Предварительно
собранная камера
M2R1



Набор специальных плат для камер первого региона

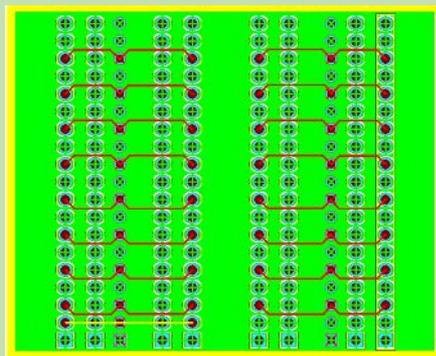
1. Соединительные платы 1
создают "Ве-Gap" для 2-х усилителей

1



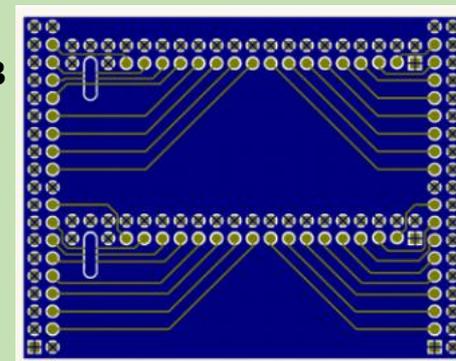
2. Соединительные платы 1
создают "Ве-Gap" для 1-го усилителя

2



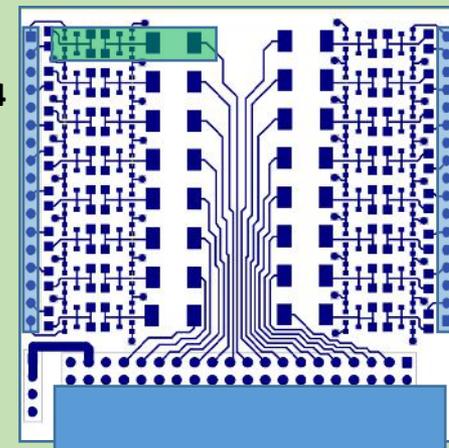
3. Кросс плата
Плата для перпендикулярной
установки 2-х усилителей

3

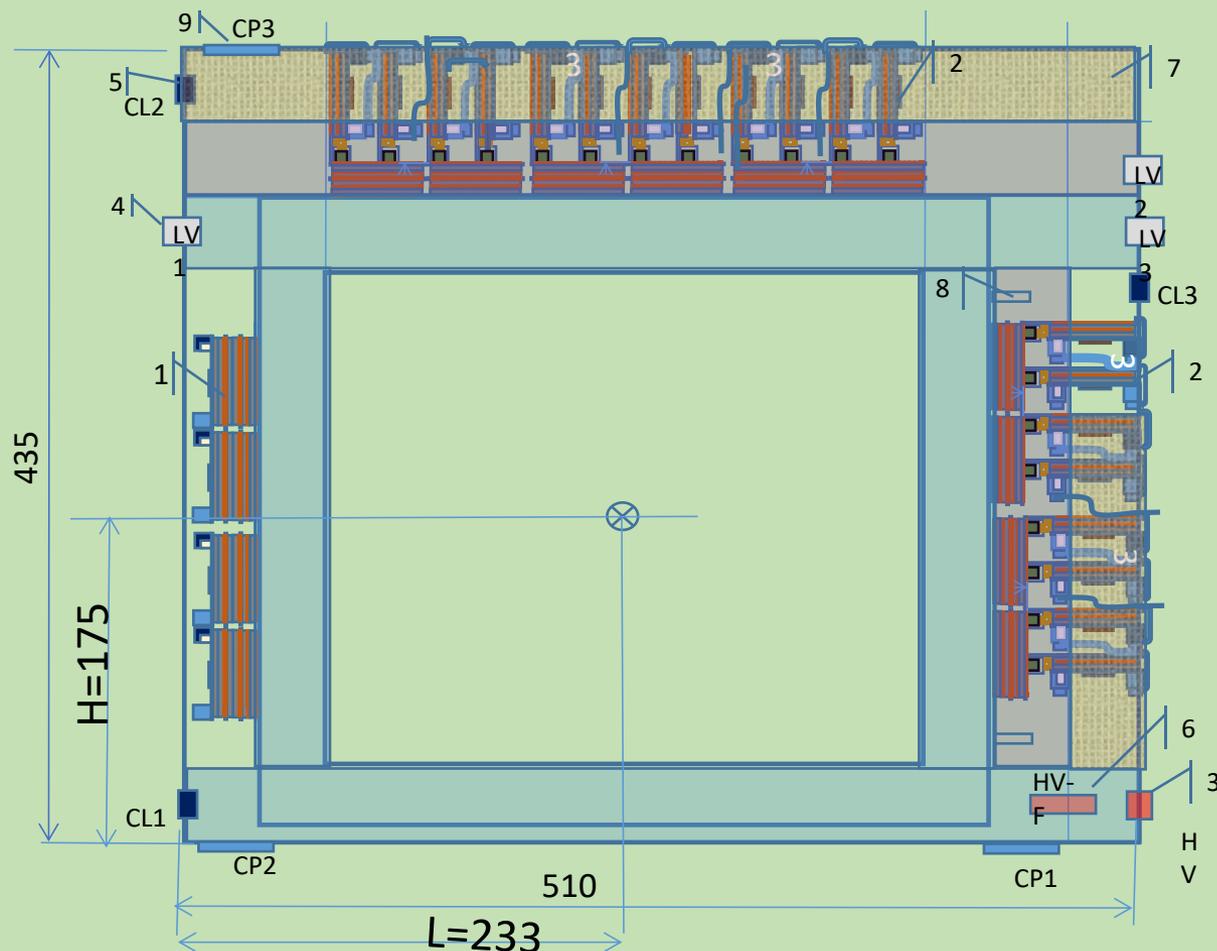


4. Новая плата для искровой защиты
для перпендикулярной
установки 2-х усилителей

4



М2R1 камера в сборке (эскиз)



M2R1 chamber

- 1- FEB assembly (planar)
- 2- FEB assembly (vertical)
- 3 - HV connector (LHCb special)
- 4 - LV connector MOLEX 8pin
Part number 39012086
- 5 - Control Line (CL) 10 pins header,
panel assembly (3M or similar)
- 6 - HV filter
- 7 - Perforated shield
- 8 - Gas inlet/outlet
- 9 - Chamber pads (CP)
CP3 needs for keeping
chamber vertically

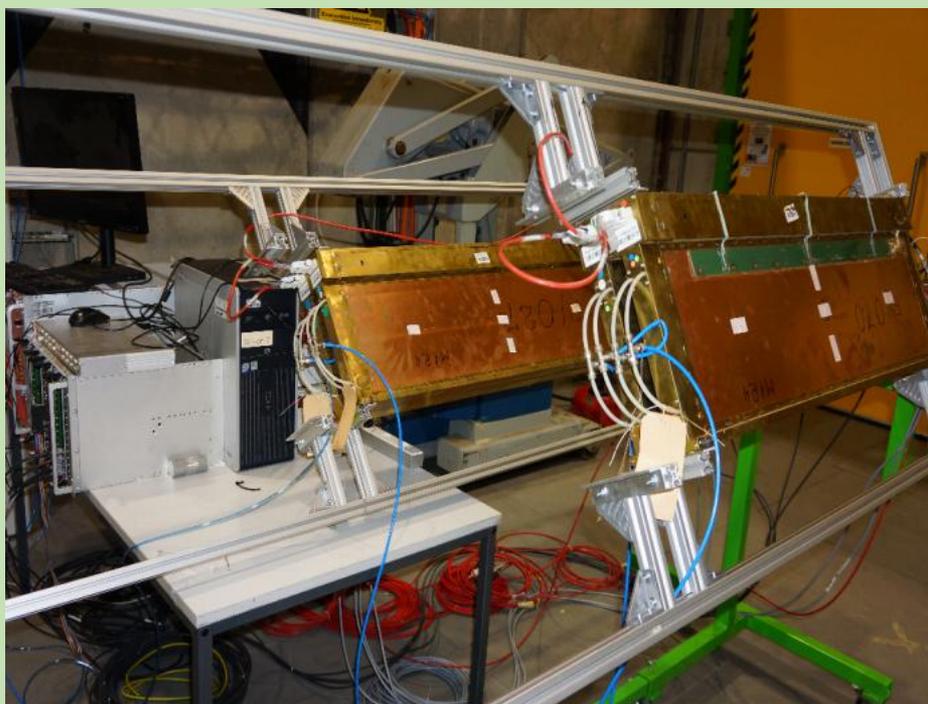
Original chamber size 390 x 470

New chamber size 435 x 515

Положение активной области относительно левой и нижней сторон

должны быть неизменными

На базе пропорциональных камер и контрольной электроники, освободившихся в результате демонтажа станции М1, а также программного обеспечения, используемого в мюонной системе, была создана установка, идеально подходящая для тестов на эффективность регистрации, в условиях сильного облучения от гамма-источника. В совпадениях, пропорциональные камеры идеально подавляют фоновую загрузку от источника, в то же время обеспечивая эффективный трекинг мюонов.



Компоненты стенда:

Камера М2R1 - 4шт

ВВ источник - 8 каналов

Блок управления усилителями - 1шт

Логический блок триггера -

выбирается под задачу.

**Этой работой в основном
занимался А. Чубыкин**

Планируется использовать данную установку как триггер мюонного пучка. На сегодняшний момент уже работают две подобные установки в ЦЕРНе



Вскрытая камера для анализа проволочек и катодов

В плане изучения Мальтер эффекта, нам удалось воспроизвести данный эффект в двух камерах, снятых с детектора, локализовать зоны внутри чувствительной области по электронным счетам в границах считывающих падов. Одна камера уже открыта, вырезанные образцы прошли исследования в декабре, на оптическом микроскопе, в данный момент готовятся образцы для изучения на электронном микроскопе. Кроме того, в ноябре, была опубликована статья в JINST (“Long-term operation of the Multi-Wire-Proportional-Chambers of the LHCb Muon System”, [2019_JINST_14_P11031](#)), где мы отразили наш опыт работы и описали методику, применяемую в условиях Мальтер токов и обеспечившую максимальную эффективность детектора в период RUN1 и RUN2.



С Новым Годом 2020!

Spare slides

В будущем, вероятно, данная установка также будет использоваться как триггер мюонного пучка. На сегодняшний момент уже работают две подобные установки в ЦЕРНе и ещё две находятся в стадии ввода в эксплуатацию в университете Гента (Бельгия) и в Бари (Италия). Данный триггер будет играть важную роль в разработке новых детекторов и электроники для следующей модернизации, запланированной на 2031 год

Компоненты для камеры M2R4

Faraday Case set:

1. Chamber foot – 4 pc.
2. Side Bracket Structure fixation screw – 4pc.
3. Metal sheet screw – 50 pc.
4. Bent metal parts:
 - a. Side Bracket Structure – 2pc (identical)
 - b. Top Bracket – 1 right and 1 left
 - c. Bottom Cover
 - d. Side Cover – 3 types
 - e. Top Cover



1



2

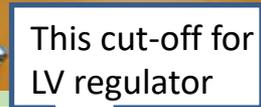


3



This cut-off
for HV filter.
Location - Gas
side.

Top side
Bottom side

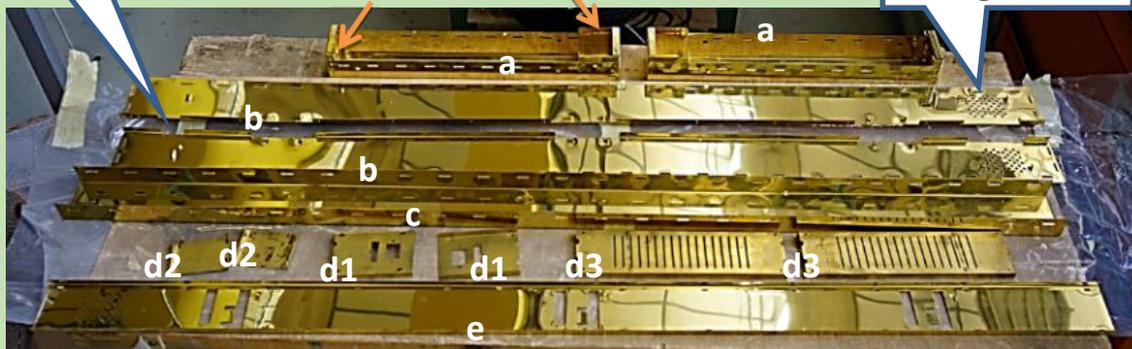


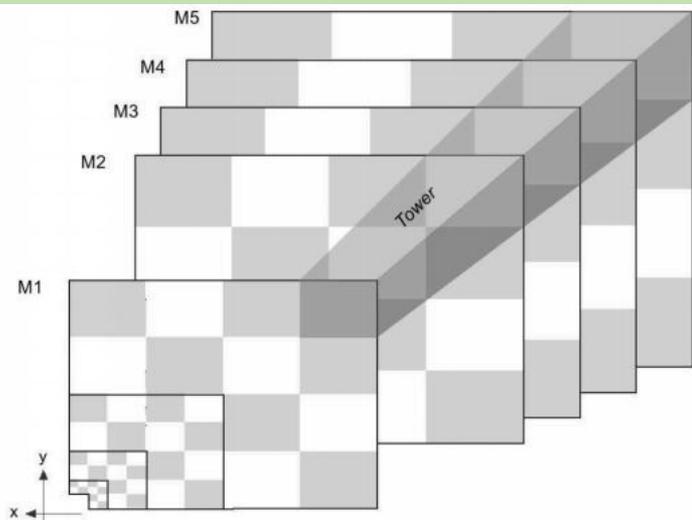
This cut-off for
LV regulator

16 ch Capacitance meter



4





Один из квадрантов мюонного детектора разделённый на 48 триггерных секторов (башен), направленных в точку взаимодействия.

Детектор разделен на 4 квадранта Q1 - Q4
Квадранты - на 4 региона от центра R1 - R4
Регионы на 12 триггерных секторов.

Вводятся понятия:

- Физический пад - чувствительная область детектора, подключенная к усилителю
- Логический канал - группа соседних физ. падов, объединенная по «или» горизонтально или вертикально, образуя, образуя матрицу XY физ. падов. Организовано в модулях «IV»
- Логический пад - область детекторной матрицы, определяемая координатами X и Y.

Физические пады не всегда совпадают по размерам с логическими, потому, что логические пады формируются из физических падов исходя из максимально допустимой загрузки на канал считывающей электроники

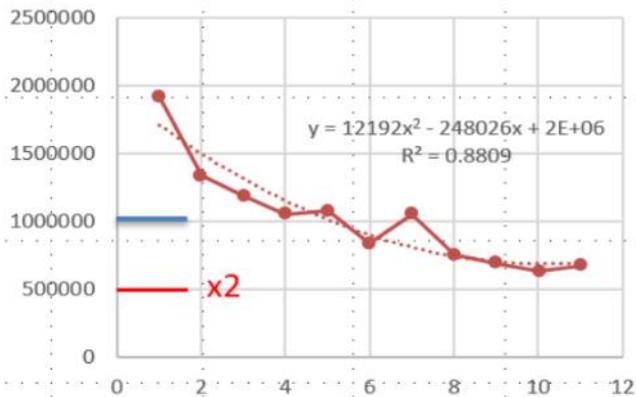
Прототип камеры M2R2

Данная камера была сделана специально для изучения работы камер при больших потоках частиц, вплоть до $6 \cdot 10^6$ /канал, при условии, что 10% из них мюоны, а остальные – некоррелированная помеха. Также требовалось выяснить какая конфигурация сигнальных катодных электродов наиболее оптимальна. Для этого в пакете из 4-х газовых промежутков в двух соседних - катодные сигнальные электроды (пады) сделаны на одной катодной плоскости, а в двух других – на обеих катодных плоскостях.

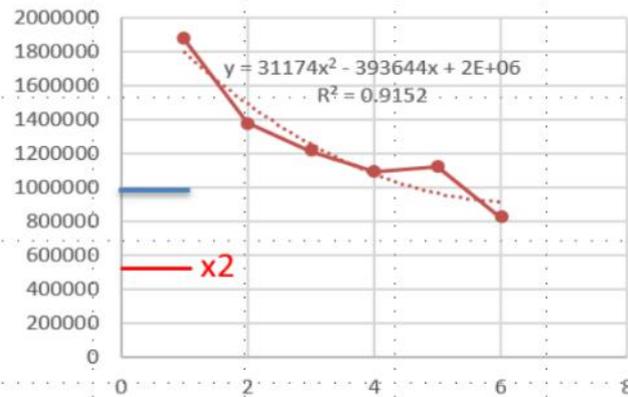
ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ КАМЕР ВЫСОКОЙ ГРАНУЛЯРНОСТИ

Измеренные в 2015 году загрузки при светимости $\sim 10^{33}$ в первом регионе станции М2, (неэффективность $\sim 10\%$). При светимости 2×10^{33} они возрастут в 2 раза.

15A1+15A2 first ch @FEB

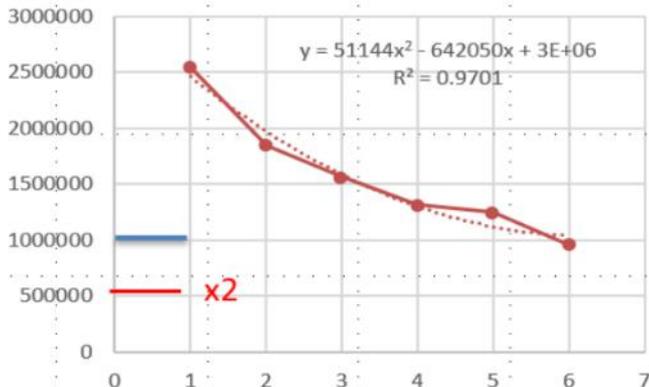


16A2 first ch @FEB

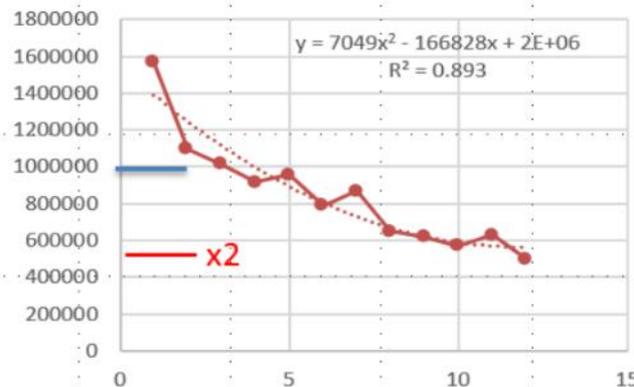


Измеренные загрузки при $L \sim 10^{33}$

17A2 first ch @FEB



18A1+18A2 first ch @FEB



Загрузки в первом канале (всего 16 каналов) каждого из фронт-эндв в камерах первого региона станции М2

Начиная с 2014 года начались обсуждения адаптации детектора высокой интенсивности

| | Side A | | Regions M2R1, M2R2 | | Side C | | | Side A | | Regions M3R1, M3R2 | | Side C | |
|----|---------|---------|--------------------|---------|---------|---------|----|--------|---------|--------------------|--------|---------|--------|
| 20 | 302663 | 374490 | | | 401158 | 271102 | 20 | 77566 | 97227 | | | 118352 | 65080 |
| 19 | 524944 | 815930 | | | 831945 | 491761 | 19 | 148087 | 316459 | | | 311144 | 139793 |
| 18 | 850038 | 836838 | 1575700 | 1402105 | 923495 | 795164 | 18 | 211310 | 220330 | 785773 | 668611 | 281269 | 207133 |
| 17 | 1370280 | 2617875 | | | 2439212 | 1304907 | 17 | 435607 | 1010902 | | | 1036103 | 432612 |
| 16 | 1300391 | 2030252 | | | 2317691 | 1238855 | 16 | 372444 | 744335 | | | 958077 | 345666 |
| 15 | 650499 | 1076075 | 1704608 | 1951677 | 1043499 | 840785 | 15 | 262900 | 344181 | 999767 | 909640 | 335410 | 261077 |
| 14 | 396774 | 715329 | | | 870635 | 476684 | 14 | 131363 | 271380 | | | 313515 | 124087 |
| 13 | 298870 | 369692 | | | 409313 | 273128 | 13 | 74675 | 124384 | | | 123763 | 67813 |

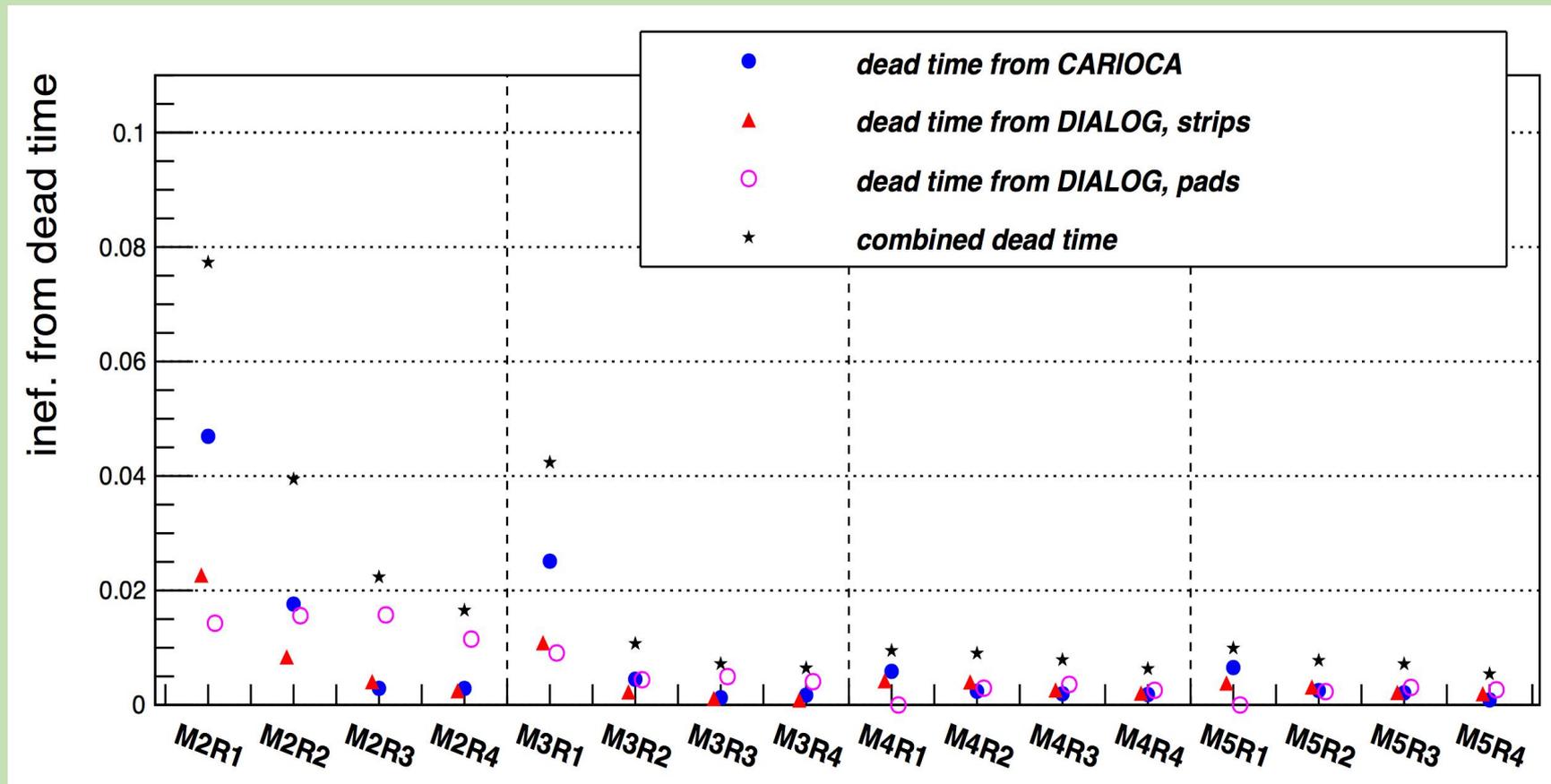
Измеренные в 2015 году загрузки при светимости $1 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в наиболее загруженных анодных каналах камер внутренних регионов R1 и R2 станций M2 (слева) и M3 (справа). Каждая ячейка в упрощённом виде соответствует геометрическому расположению камер вокруг пучковой трубы. Красным цветом выделены камеры, где загрузка превышает 1 МГц на канал. При среднем значении мертвого времени усилителей 80нс, в наиболее загруженных местах потеря эффективности может достигать 20%

Измеренные в 2016 году загрузки при светимости $\sim 10^{33}$ в первом и втором регионах станции МЗ. При светимости 2×10^{33} они возрастут в 2 раза.

| | | | МЗR1, | МЗR2 | | |
|----|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
| 20 | 77566 | 97227 | | | 118352 | 65080 |
| 19 | 148087 | 316459 | | | 311144 | 139793 |
| 18 | 211310 | 220330 | 785773 | 668611 | 281269 | 207133 |
| 17 | 435607 | 1010902 | | | 1036103 | 432612 |
| 16 | 372444 | 744335 | | | 958077 | 345666 |
| 15 | 262900 | 344181 | 999767 | 909640 | 335410 | 261077 |
| 14 | 131363 | 271380 | | | 313515 | 124087 |
| 13 | 74675 | 124384 | | | 123763 | 67813 |

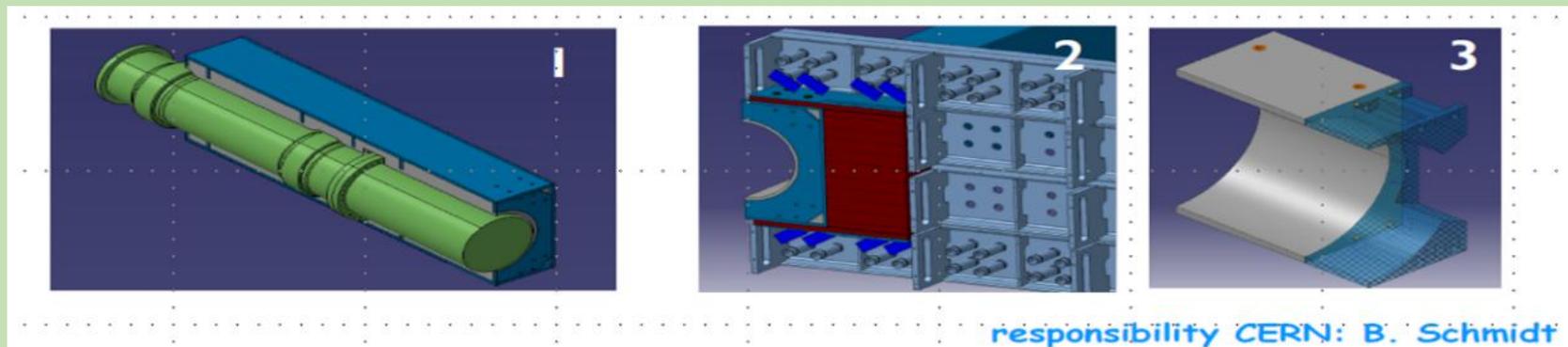
При светимости 2×10^{33}
необходимо заменить камеры МЗ R1.
Замена камер МЗ R2 пока не требуется

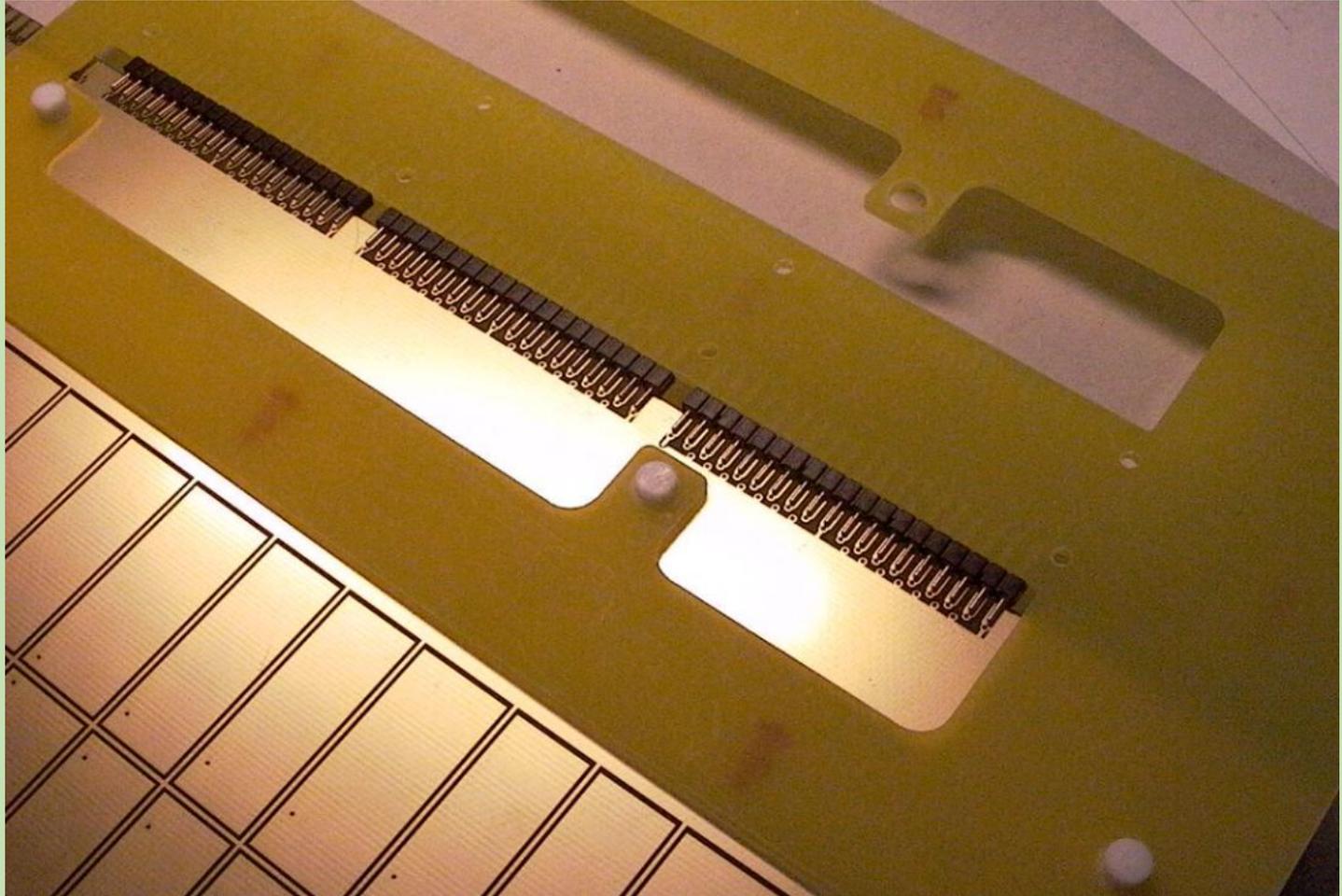
Также были сделаны оценки максимальных, усредненных по площади, загрузок для камер в центральных регионах и потери эффективности



Поскольку конфигурация камер и входная электроника, практически идеально согласованы, то переделка как входной электроники, так и конфигурации камер на первоначальном этапе не планировались. И, следовательно, для увеличения пропускной способности электроники остается только один способ – сокращать загрузку как на входную электронику, так и на логические каналы.

Одно из очевидных направлений, которое также находится в процессе реализации – уменьшение вклада в загрузку от фоновых частиц, который превышает 90% во внутренних регионах. Данные частицы, рождаются в результате вторичных процессов в результате взаимодействий с материалом пучковой трубы и других частей детектора. Планируется установка дополнительных защитных экранов и улучшение существующих, путём замены железных конструкций на вольфрамовые.





Proposed idea for soldering connector with proper accuracy

В 2019 году, ЛНсб вступил в активную фазу модернизации экспериментальной установки и систем сбора данных с целью выхода на новый уровень скорости набора статистики с 1.1МГц до 30-40 МГц и увеличения рабочей загрузки детектора примерно в 5 раз.

Продолжалась интенсивная работа по анализу экспериментальных данных набранных за весь период эксплуатации детектора (RUN1+RUN2) превышающих объём в 9.2 fb^{-1} данных. По имеющимся результатам уже опубликовано более 500 статей в ведущих журналах.

Началась активная работа по разработке нового Мюонного трекера для следующей модернизации, планируемой в 2030 году, где светимость будет увеличена ещё в 10 раз или в 50 раз от той, что была в период RUN1 и RUN2