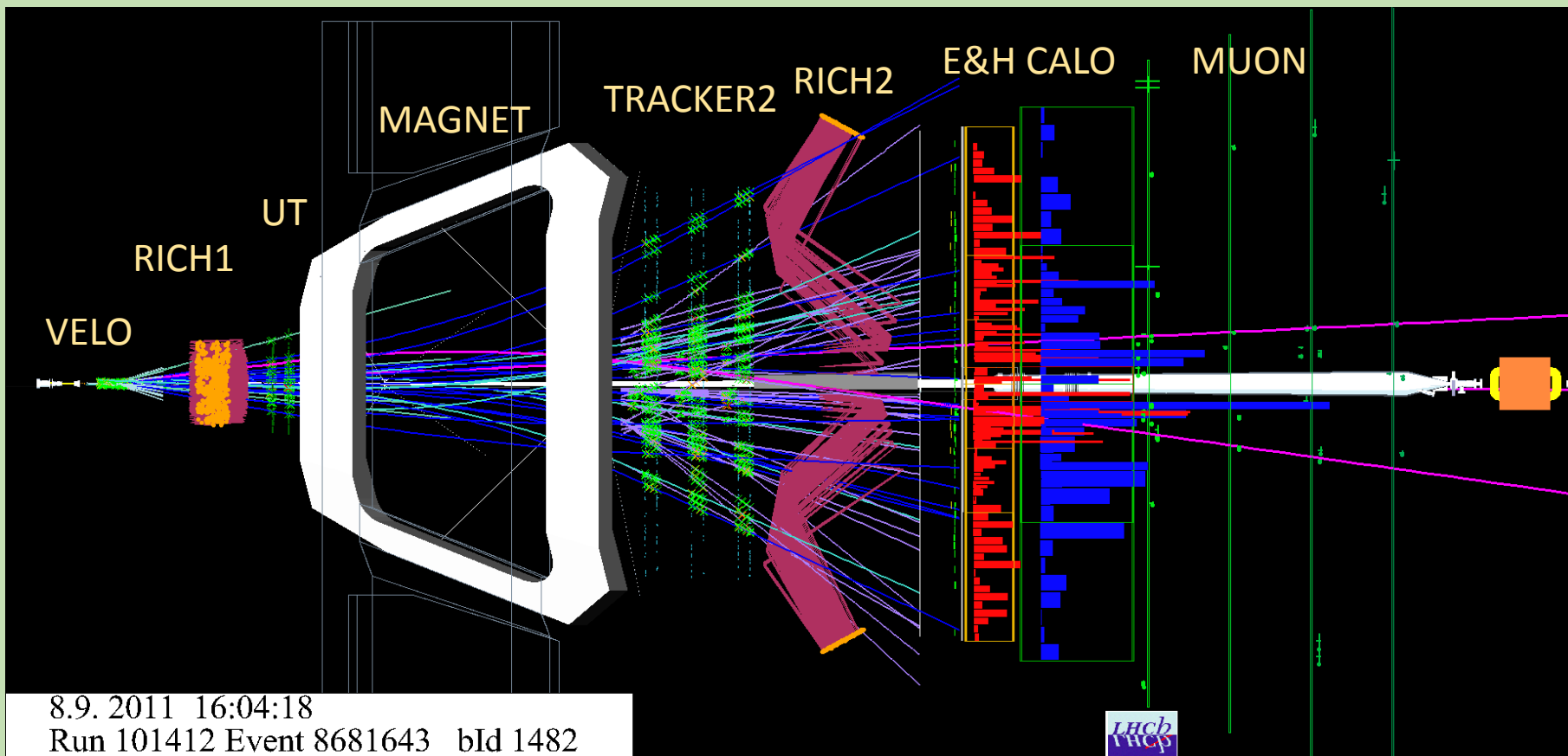


**КАМЕРЫ ВЫСОКОЙ
ГРАНУЛЯРНОСТИ
ДЛЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ РЕГИОНОВ
МЮОННОГО ДЕТЕКТОРА LHCb**

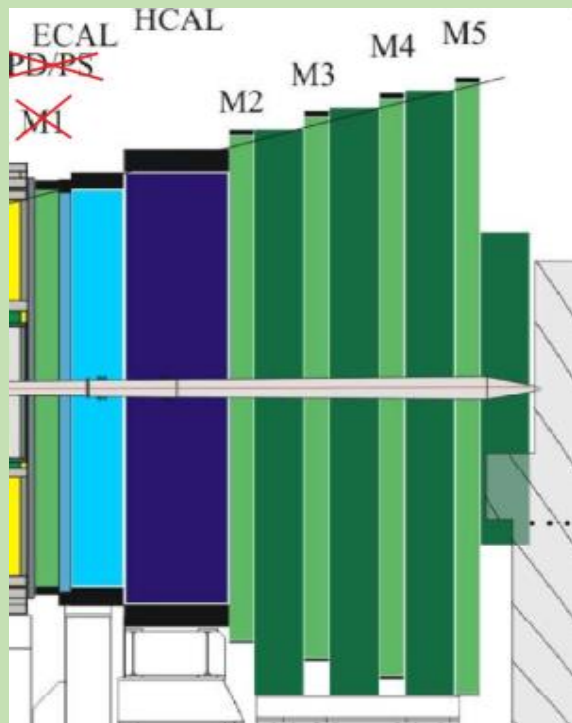
Н.Бондарь
ПИЯФ
02/07/2019

Оглавление

- **Эксперимент LHCb**
- **Мюонный детектор**
- **Обоснование необходимости камер повышенной гранулярности для центральных регионов станций M2 и M3.**
- **Камеры повышенной гранулярности**



LHCb эксперимент был ориентирован на изучение «CP violation» в распадах **K** и **B** мезонов, которые содержат «strange» или «beauty» кварки.
 В LHCb впервые обнаружено «CP violation» в распадах «очарованных» частиц.

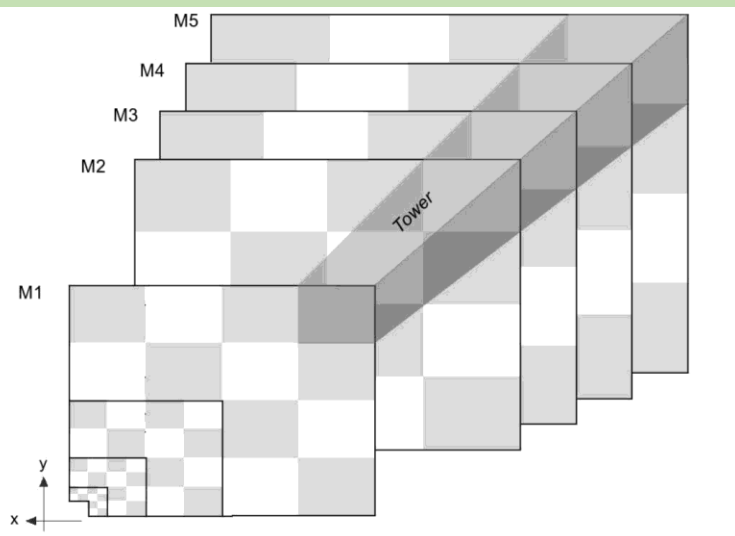


Станции M2-M5 мюонного детектора.
M1 сейчас удалена

Поскольку мюоны являются финальной стадией изучаемых процессов, то и главная задача мюонного детектора - с высокой эффективностью идентифицировать мюоны аккуратно восстанавливать мюонные треки и выдавать триггерный сигнал по этому событию.

Следует отметить, что изначально детектор планировался для работы при светимости $\sim 2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что и определяло геометрию детектора и методы сбора информации. Причем, при конструировании детектора исходили из двух противоречивых условий: первое - обеспечить требуемую координатную точность и эффективность детектора, и второе - не выйти за пределы выделенного бюджета.

Эта задача была блестяще решена, как минимум с 2х кратным запасом, путем структурирования схемы сбора данных.



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:

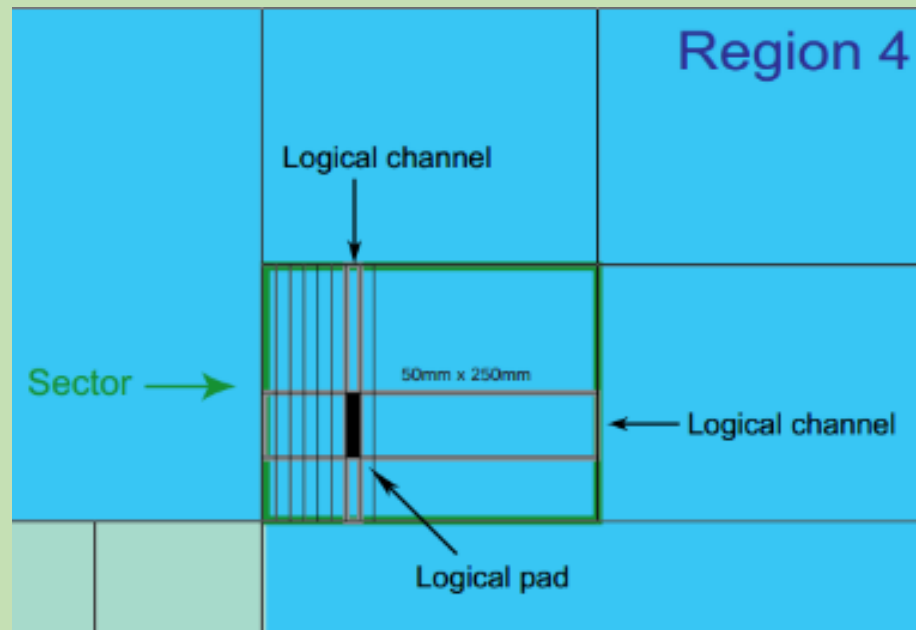
- Физический пад - чувствительная область детектора, подключенная к усилителю
- Логический канал - группа соседних физ. падов, объединенная по «или» горизонтально или вертикально, образуя, образуя матрицу XY физ. падов. Организовано в модулях «IV»
- Логический пад - область детекторной матрицы, определяемая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

Структура считывания сигналов с камер



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



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

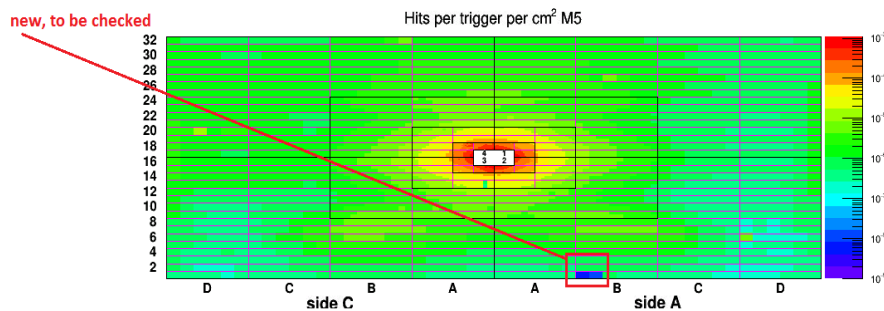
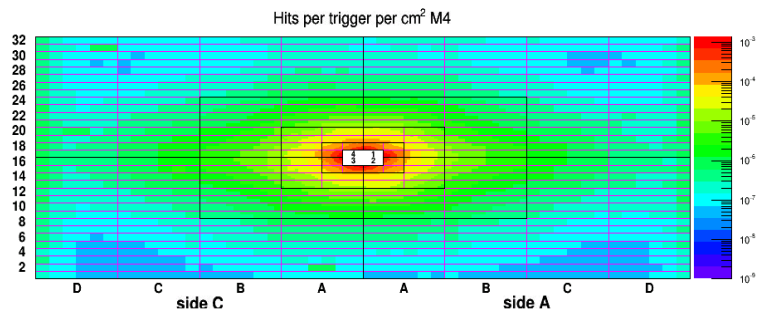
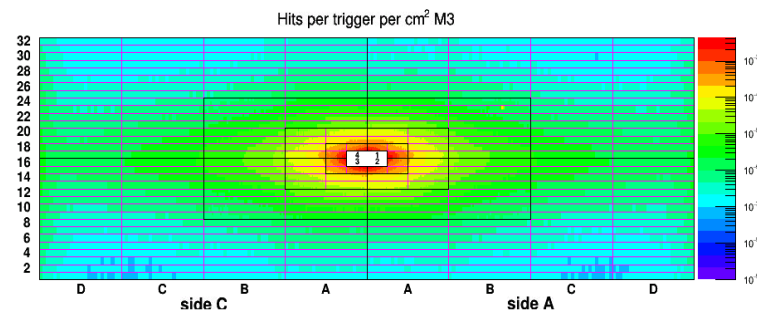
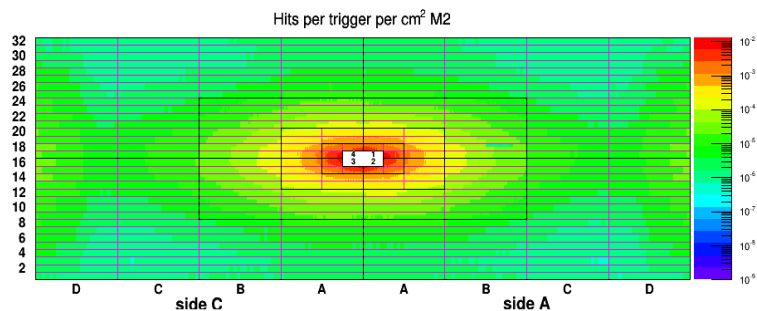
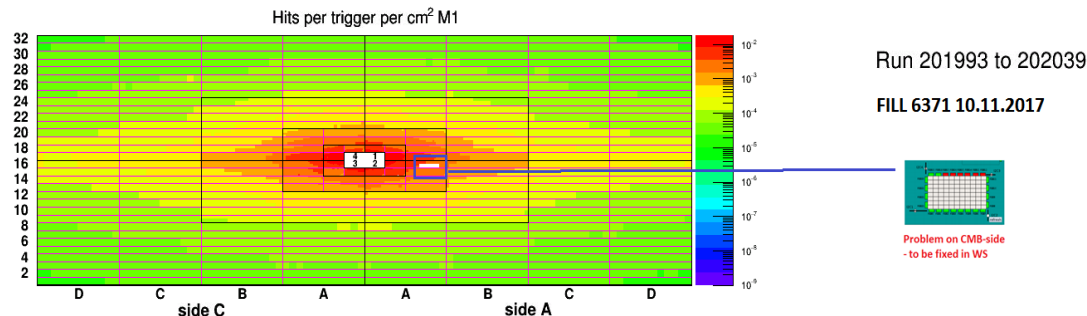
Такая организация сбора данных позволила сократить количество фронт-энд электроники почти в 2 раза и считывающей электроники примерно в 1,5 раза и обеспечить эффективную работу детектора при свеимости вплоть до $\sim 4,2 \times 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

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

- **обеспечить высокую эффективности при светимости пучка $2 \times 10^{33} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$,**
- **сохранить ошибку определения мюонов минимально возможной.**

До настоящего времени детектор работал с эффективностью 99%

/Muon/4.Pad Maps/Particle density/Summary



«Проблема» (на самом деле наша собственная заслуга!) заключается в том, что люди из LHCb привыкли иметь мюонный детектор таким как здесь.

Совершенно ясно, что несмотря на эффективную работу детектора при 2-х кратном превышении загрузки каналов электроники она не обязательно останется достаточно эффективной при дальнейшем росте загрузок.

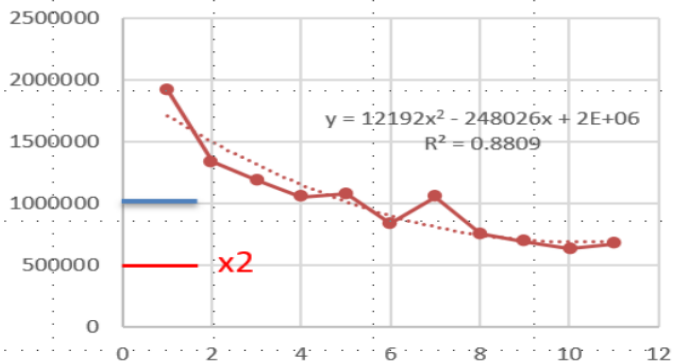
Как измерения, так и расчеты показывают, что при загрузках более 1 МГц на канал его эффективность падает на 8%-10% в основном за счет мертвого времени входной электроники ($\sim 80\text{ns}$).

Более того, если Логический канал, образован объединением по “ИЛИ” нескольких Физических каналов, то и импульсная загрузка Логических каналов будет во столько же раз больше, что также ведет к дополнительной потере эффективности детектора из-за ограниченной пропускной способности цифровой части электроники.

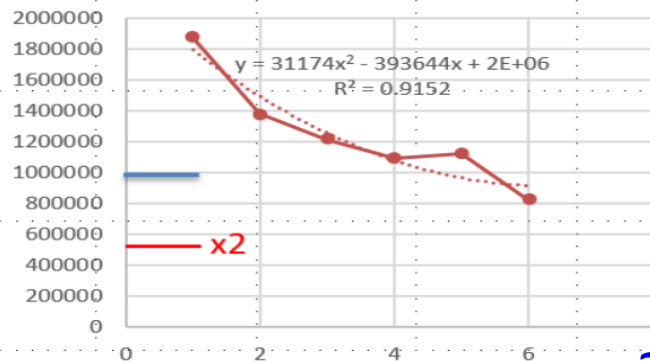
Вторая проблема «матричного» метода заключается в появлении кажущихся событий «ghosts» причем вероятность появления таких событий и растет линейно потоку входных импульсов, а их количество квадратично.

Измеренные в 2015 году загрузки при светимости $\sim 10^{33}$ в первом регионе станции M2, (неэффективность $\sim 10\%$). При светимости 2×10^{33} они возрастут в 2 раза.

15A1+15A2 first ch @FEB

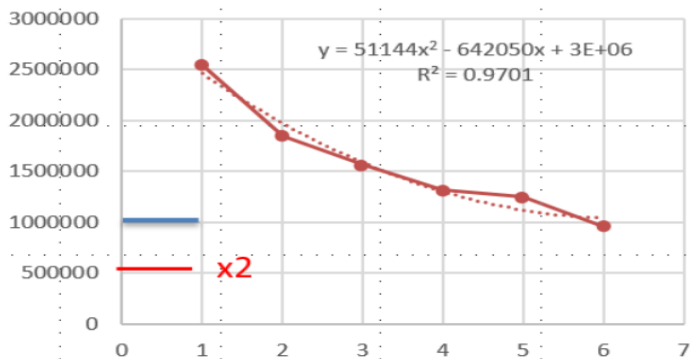


16A2 first ch @FEB

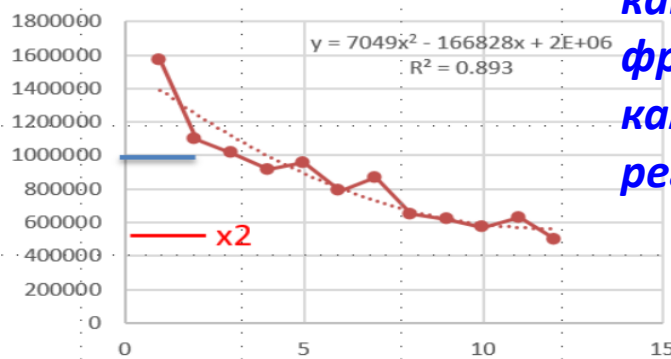


Измеренные загрузки при $L \sim 10^{33}$

17A2 first ch @FEB



18A1+18A2 first ch @FEB



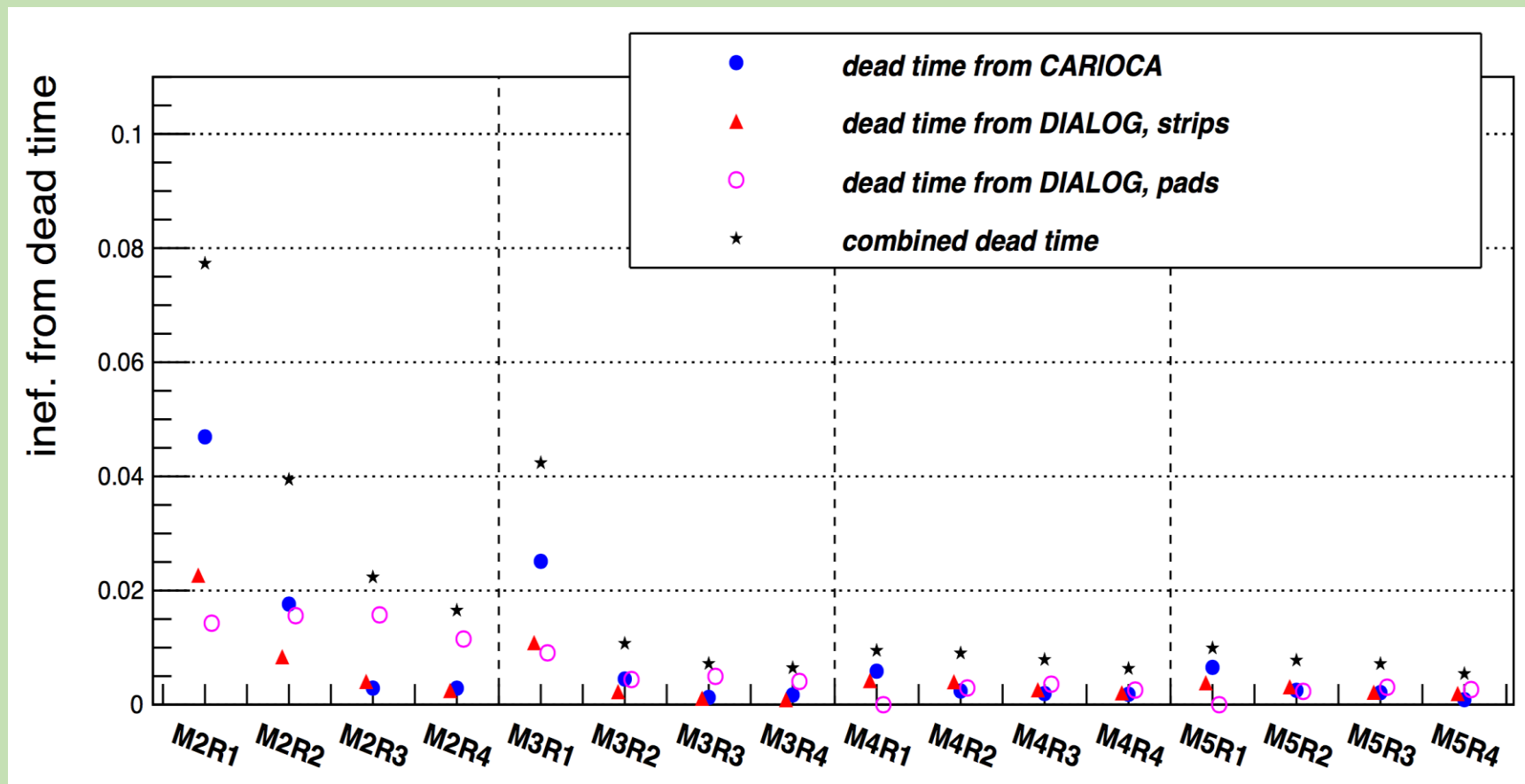
Загрузки в первом канале (всего 16 каналов) каждого из фронт-эндв в камерах первого региона станции M2

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%

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



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:

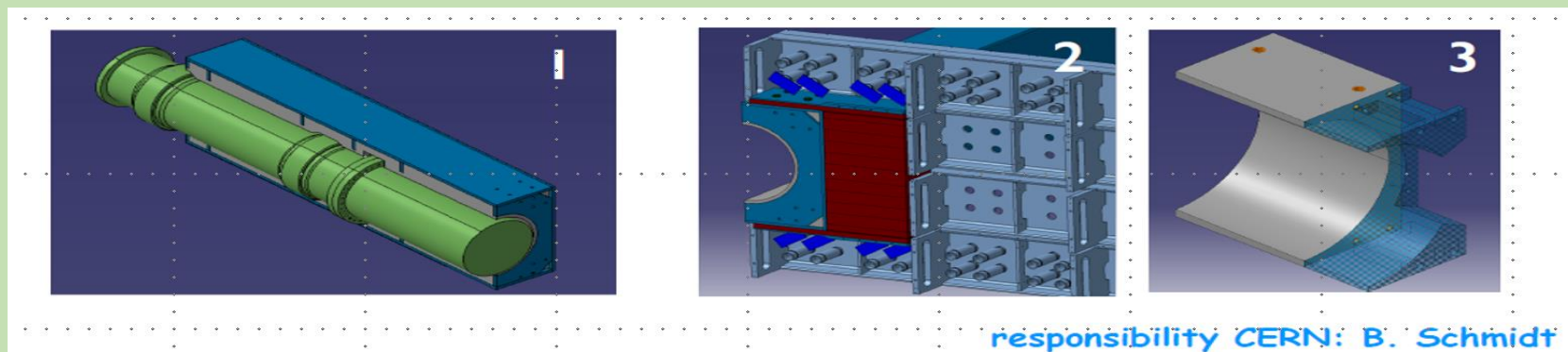
- если ничего не изменять в степени детализации мюонного детектора, потеря события после L S2 оценивается в 9,6%;
- при запланированном удалении IB вышеуказанные потери будут снижены до 7,6%;
- если дополнительно установить камеры высокой гранулярности M2R1 (12 камер), M3R1 (12 камер) и внутренней части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

Еще более значительным, чем улучшение средней эффективности, является сильное сокращение локальных точек неэффективности до ~ 7 раз, что дает большое преимущество во всех анализах с мюонами в конечном состоянии

Наконец, что не менее важно - отсутствие призрачных пересечений уменьшит количество попаданий в «реку» (и комбинаторной БКГ) до ~ 2 раз

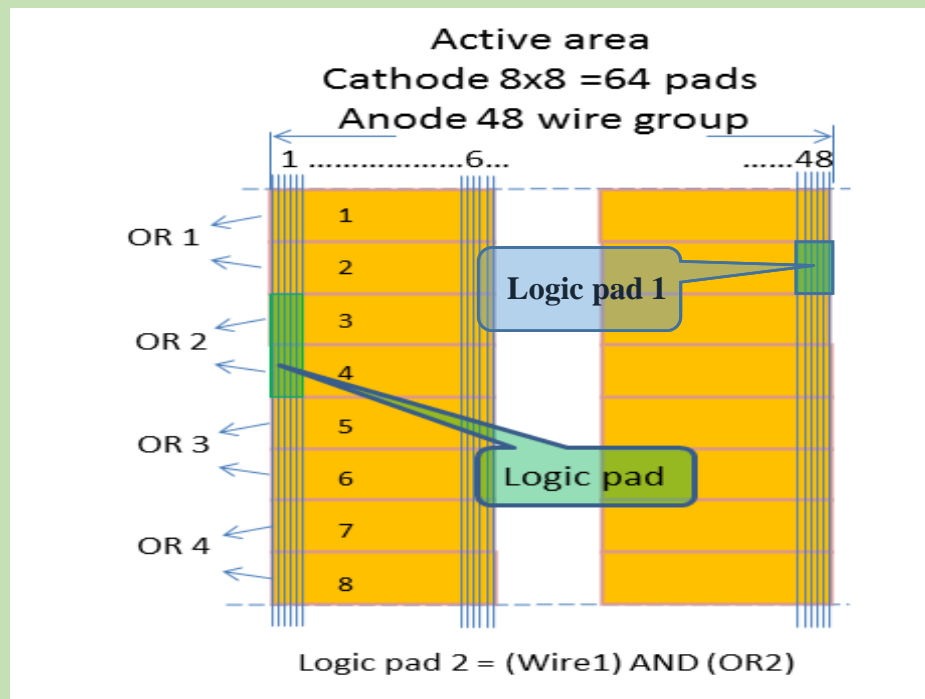
Поскольку конфигурация камер и входная электроника, практически идеально согласованы, то переделка как входной электроники, так и конфигурации камер на первоначальном этапе не планировались. И, следовательно, для увеличения пропускной способности электроники остается только один способ – сокращать загрузку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



Второй способ сократить загрузку на считывающую электронику – по возможности отказаться от логических каналов там, где это необходимо, заменив промежуточные логические модули (IB board) новыми модулями считывания (ODE 40) в наиболее проблемных регионах детектора в станциях M2 и M5.

В камерах M2R1, M3R1 и M2R2 считываются данные с катодов и анодов, причем физические пады являются логическим каналам, а логические пады в 4 - 8 раз меньше физических падов.



Решение по модернизации мюонного детектора, принятое коллаборацией

- Станцию М1 необходимо удалить, так как она будет сильно перегружена частицами.
- Поставить дополнительные экраны вокруг пучковой трубы для защиты центральных областей станций М2 и М3. По разным оценкам это должно снизить загрузки на 50% - 30%.
- Исключить чтение Логических каналов на станциях М2 и М5 там, где они перегружены, заменив модули логического «ИЛИ» IB на модули чтения ODE.
- Заменить камеры М2R1 и М3R1 и центральные камеры М2R2 на камеры повышенной гранулярности. Всего 36 камер

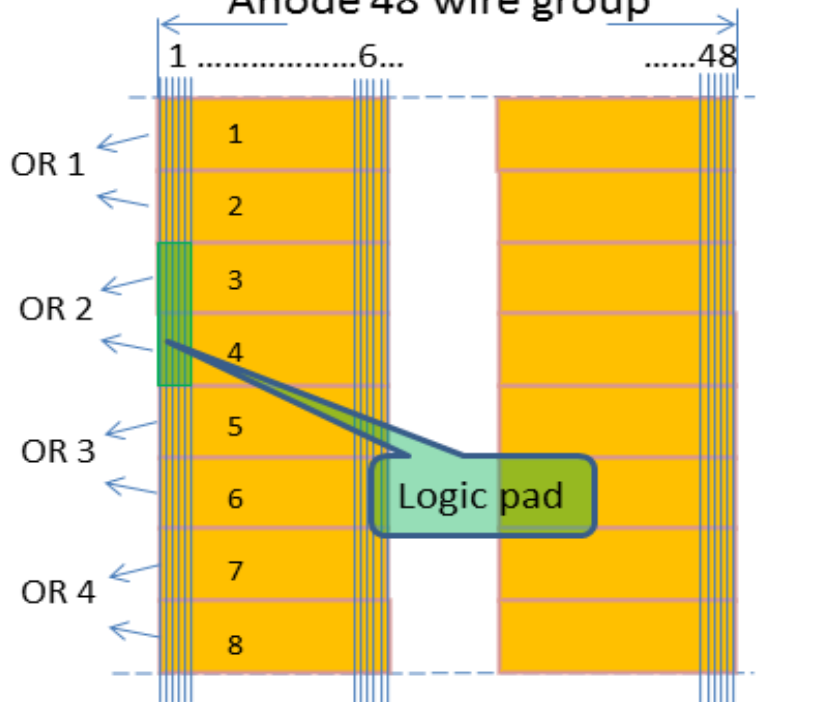
Pad layout

Current design

Active area

Cathode 8x8 = 64 pads

Anode 48 wire group



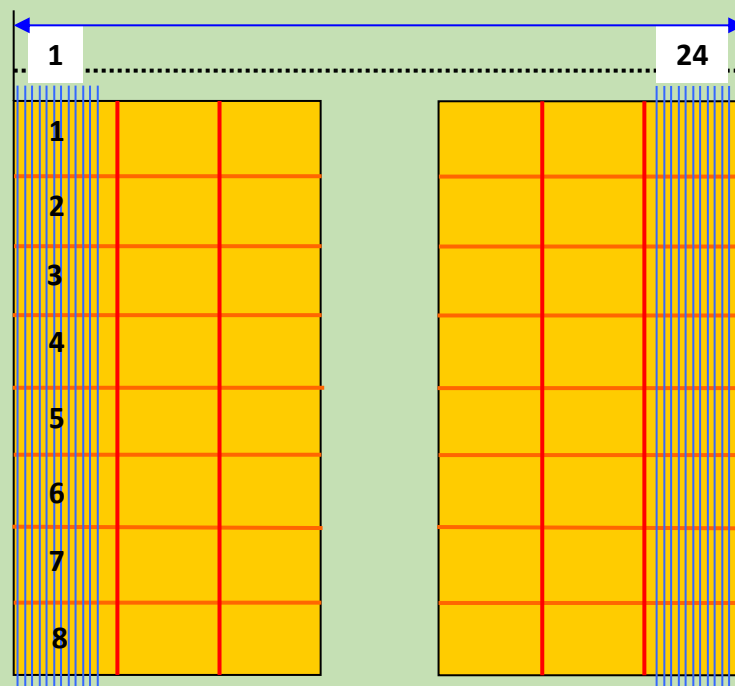
Logic pad 2 = (Wire1) AND (OR2) = 1X x 2Y

Prototype design

Active area

Cathode 24 x 8 pads = 192

No Anode readout



Logic pad = 2X x 1Y

Pad area = 25 x 31,5 мм² = 1/4 of Anode pad

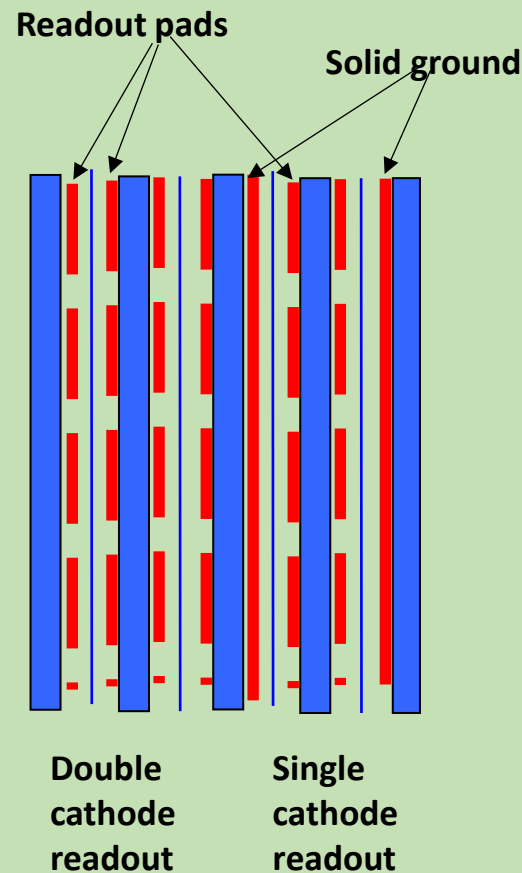
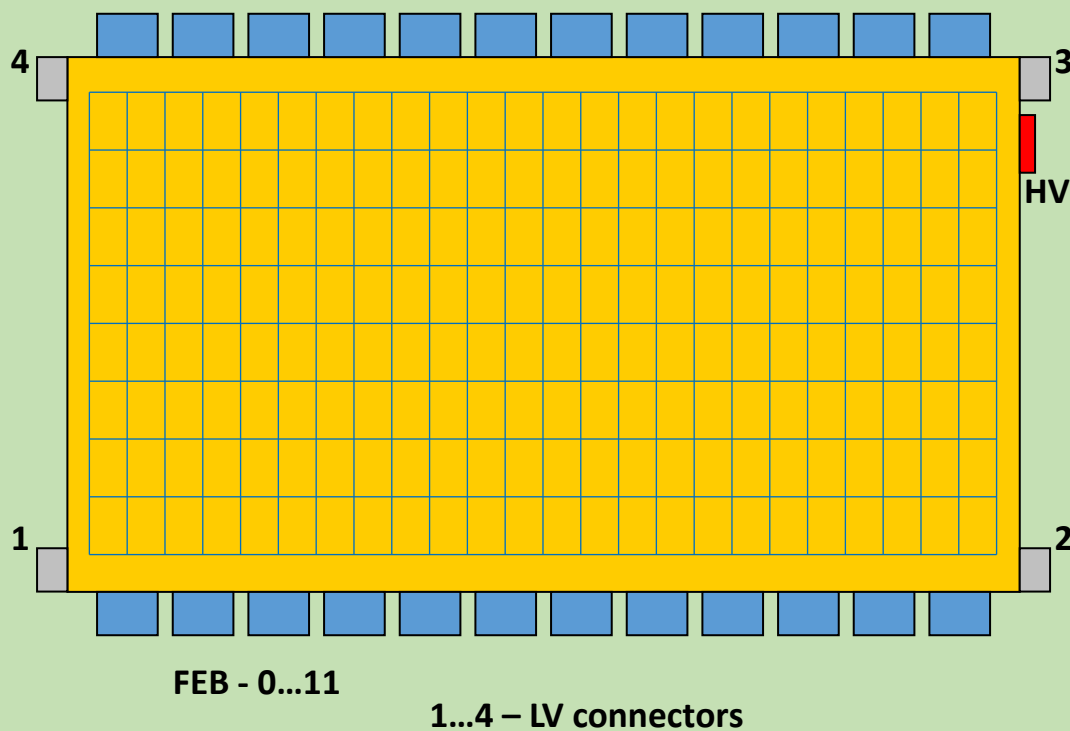
Прототип камеры M2R2

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.

Структура прототипа камеры

M2R2

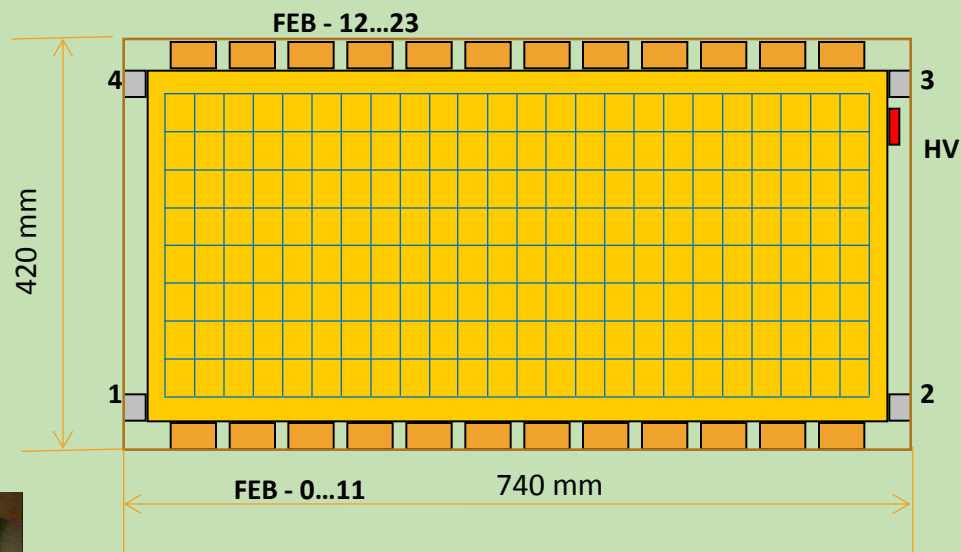
FEB - 12...23



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.

Прототип камеры M2R2

Камера изготовлена в 2016 году
Протестирована с рабочей
электроникой в 2017 году в ПИАФ.



В 2018 году камера протестирована на мюонном пучке с интенсивным потоком гамма на установке GIF++ в ЦЕРНе.

В 2016 году Э.М. Спириденков завершил трехмерный расчет пропорциональной камеры с катодным считыванием данных с размером падов $25 \times 31,5 \text{ мм}^2$, площадь которого равняется площади единичного пада камеры M2R2.

Главная задачей этих расчетов – определить множественность срабатывания каналов электроники от положения трека частицы,

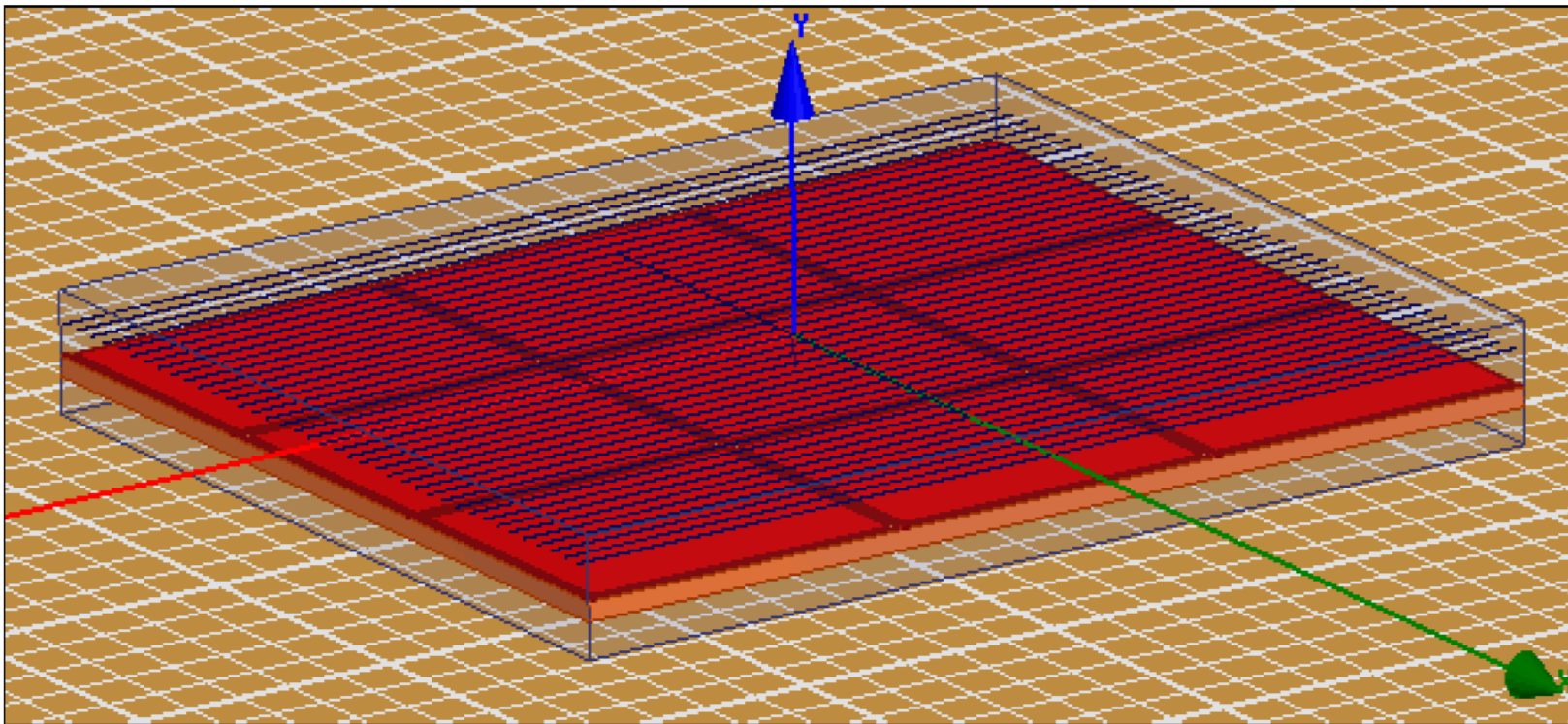


Рис.3. Фрагмент камеры, принятый для моделирования.

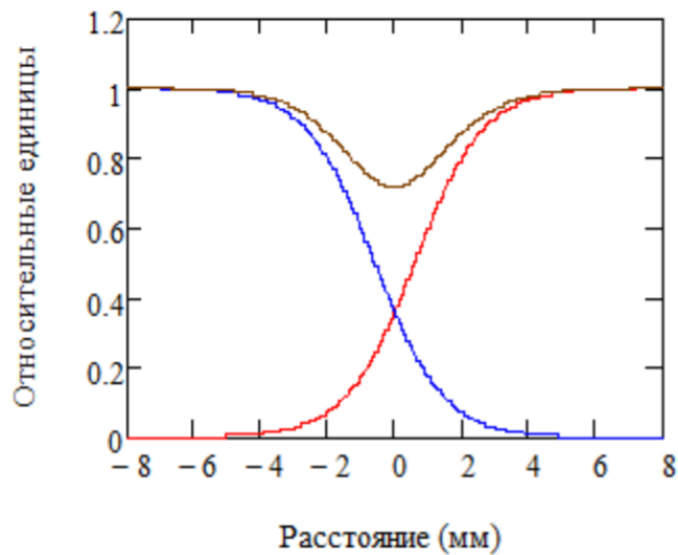


Рис.15. Наведенные токи двух соседних падов и их сумма в зависимости от положения трека ионизации.

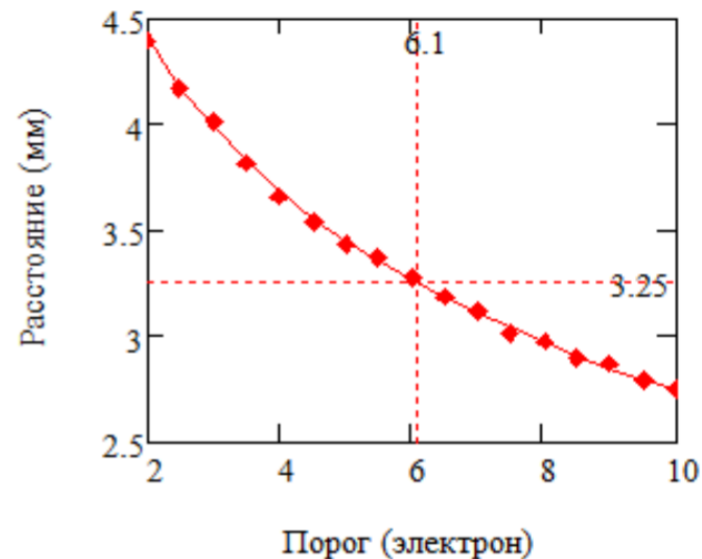
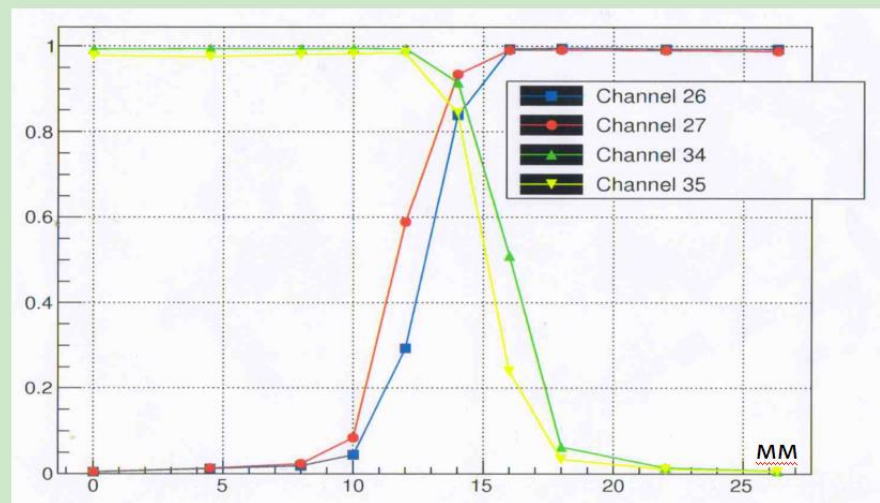
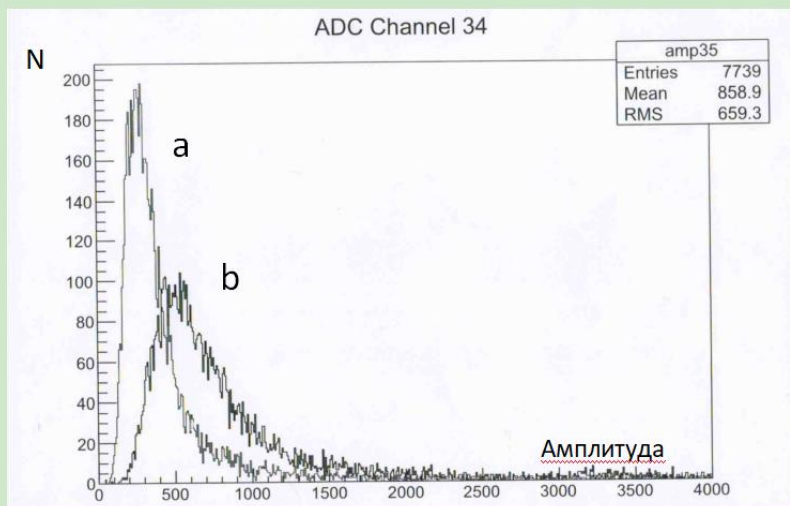


Рис.16. Положение трека ионизации при однопроцентной вероятности множественности для разных порогах.

На левом графике показано распределение наведенных зарядов на соседние катодные пады в относительных единицах. На правом графике показана зависимость ширины зоны срабатывания соседнего пада при вероятности срабатывания 1% от уровня порога срабатывания дискриминатора в единицах первичной ионизации. Результаты расчётов показали, что эта камера будет иметь не более 25% двойных срабатываний.

Первые измерения прототипа камеры на протонном пучке в ПИАФ провели В.Т Грачёв и А. Чубыкин с использованием аналоговой электроники

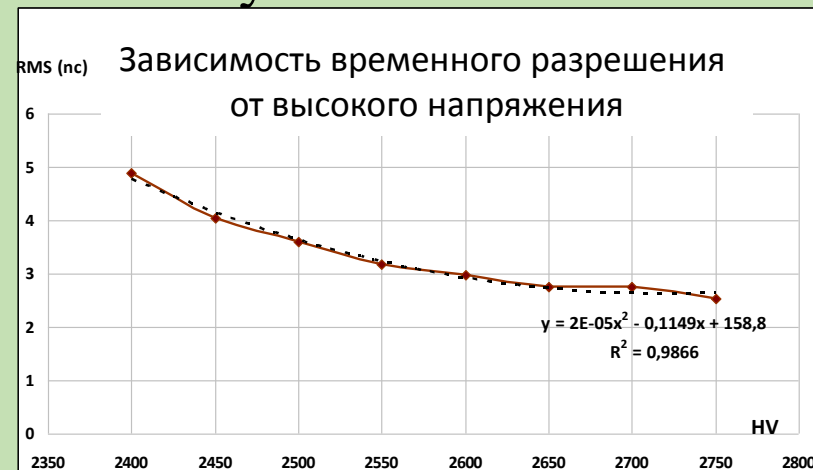
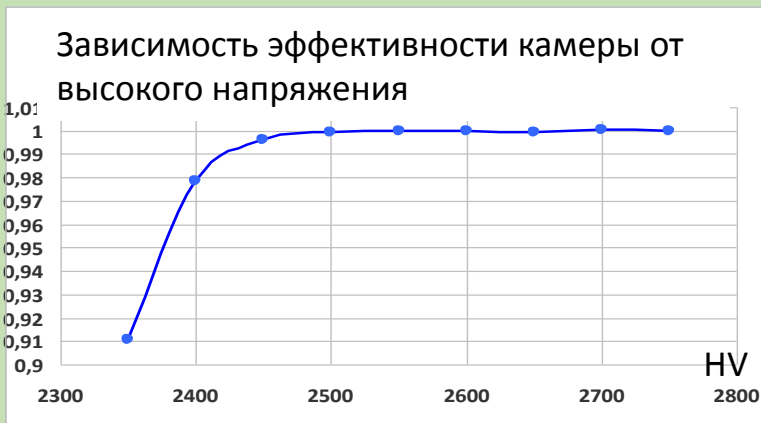


Слева – амплитудные спектры сигналов камеры. Одно-катодный спектр – а.

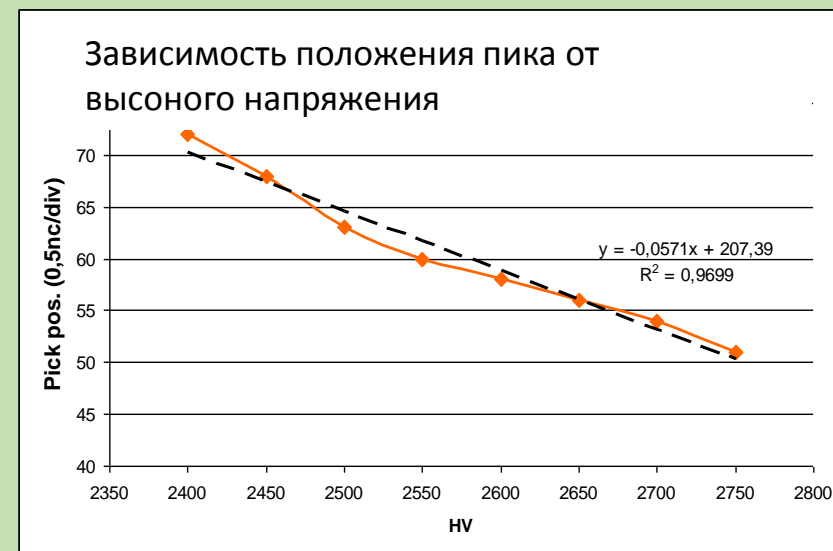
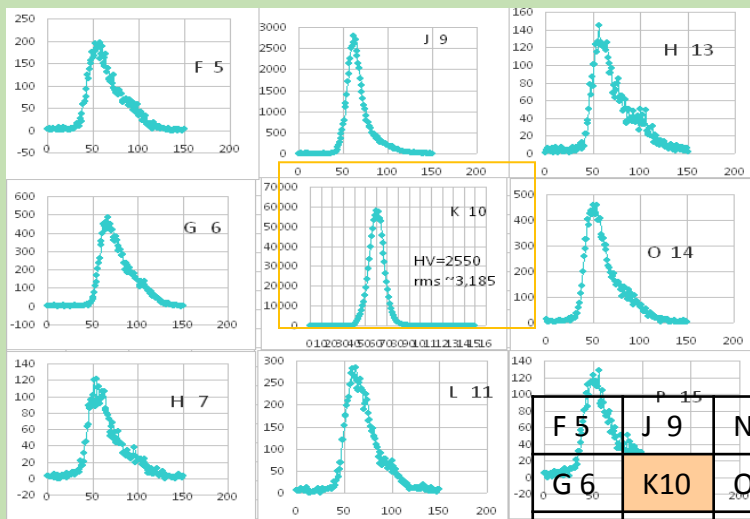
Двух-катодный спектр – б.

Справа - измеренное распределение наведенных зарядов пучком протонов диаметром 1,0 мм на соседние катодные пады. По вертикали- нормированная амплитуда сигнала. Здесь в ширину распределения зарядов вносят вклад - размер пучка и емкостные связи

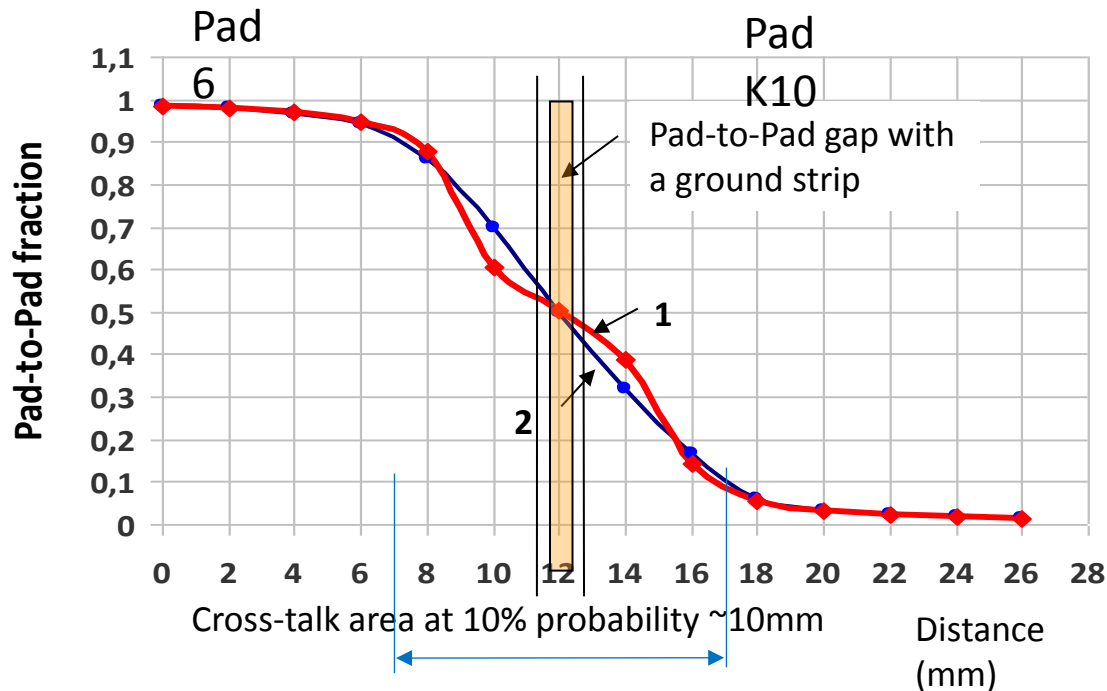
М2R2 тестирование прототипа на пучке ПИАФ



Зависимость временного разрешения от положения пучка



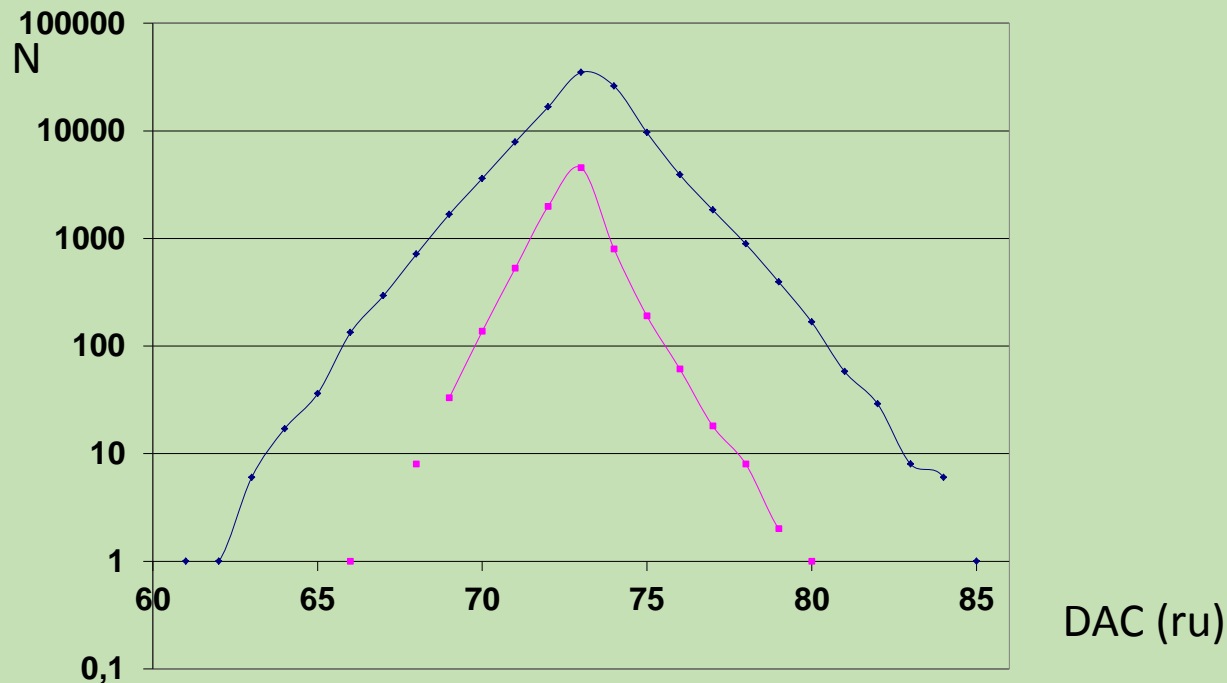
Beam position scan



F	5	J	9
G	6	K	10
H	7	L	11

Beam position relative to the chamber
 Beam size 1mm
 Beam is perpendicular to the chamber

Распределение зарегистрированных импульсов в двух соседних каналах от положения камеры относительно пучка протонов. По вертикали отложено относительное количество зарегистрированных импульсов в единицу времени. Синяя кривая – движение камеры в направлении «пучок вдоль проволоки». Красная кривая – движение камеры в направлении «пучок поперек проволоки».



. Пример шумового спектра одного из логических каналов. Синяя кривая принадлежит двух-катодному варианту, Здесь видно, что при подключении 2-х катодов шум возрастает тоже вдвое. Поскольку пороги ставятся по уровню шумов, то выигрыша нет. Результаты приведены в единицах ЦАП.



Установка ГИФ содержит:

Гамма источник - 14 TBq ^{137}Cs , энергия гамма - 662 keV

Гамма-поток ($1,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$) на расстоянии 1,5 м

Система перемещаемых свинцовых фильтров, которые позволяют подавлять интенсивность облучения в диапазоне от 1 до 1000000 в несколько шагов.

Мюонный пучок 100 GeV и 10^4 мюон/спил (размер пучка 10 см x 10 см) доступный для исследования детекторов в зоне гамма-облучения.

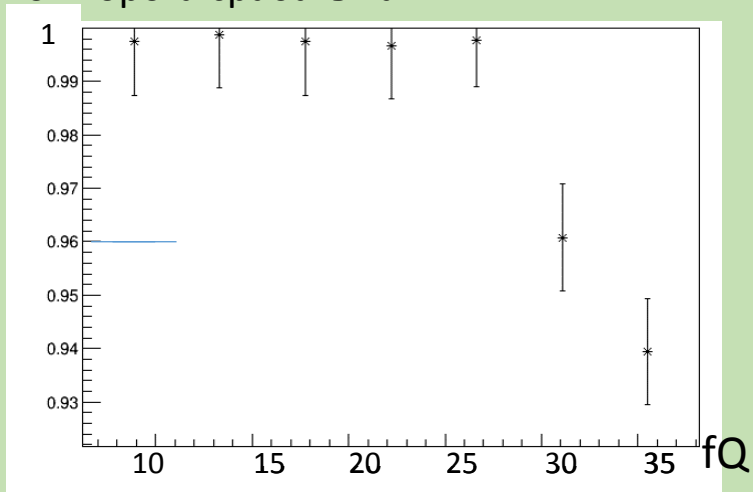
Пучок подается 6-8 недель в году.



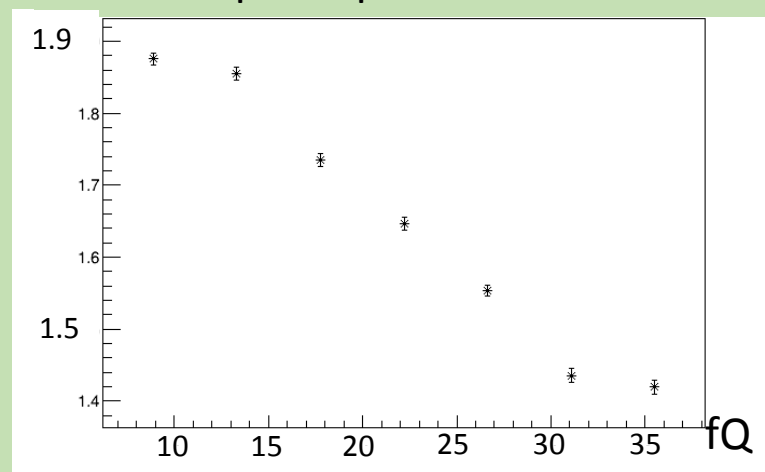
**Первые результаты, полученные на установке GIF.
 Камера подключена к газовой магистрали CMS.
 Смесь AR+CO₂+Cf₄(10%). HV – 2650В,
 порог Max+20гV,
 Сбор данных на внутренние счетчики прикамерной электроники всей камеры.
 Провалы на гистограмме соответствуют потерям в материале стоящей впереди установки.**

M2R2 тестирование прототипа на установке GIF++

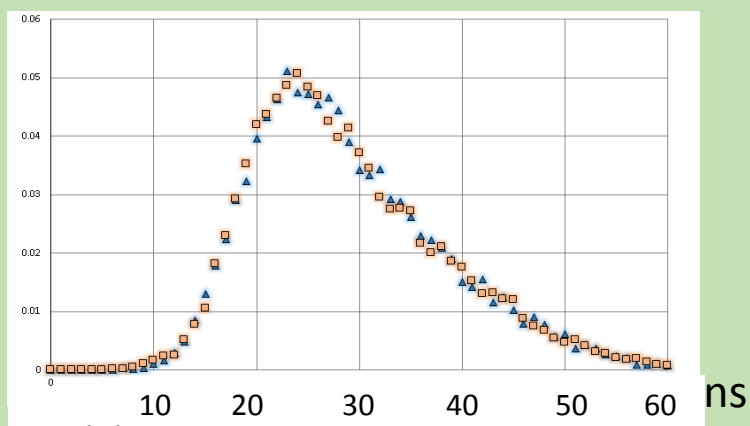
Зависимость эффективности от порога срабатывания



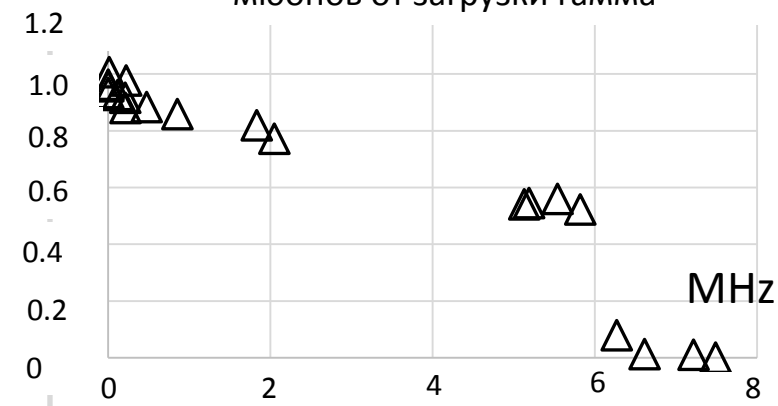
Зависимость размера кластера от порога срабатывания



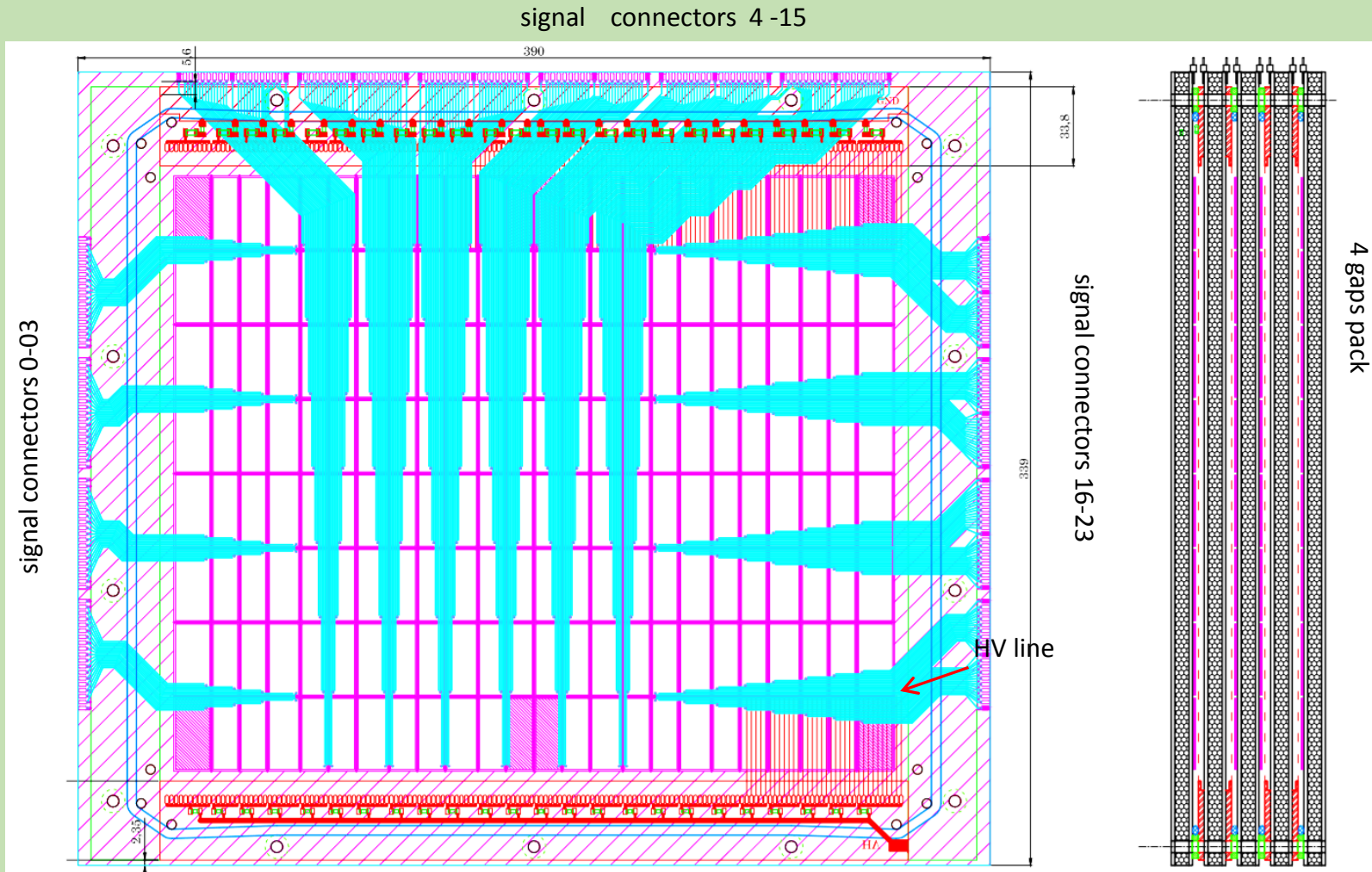
Временное распределение



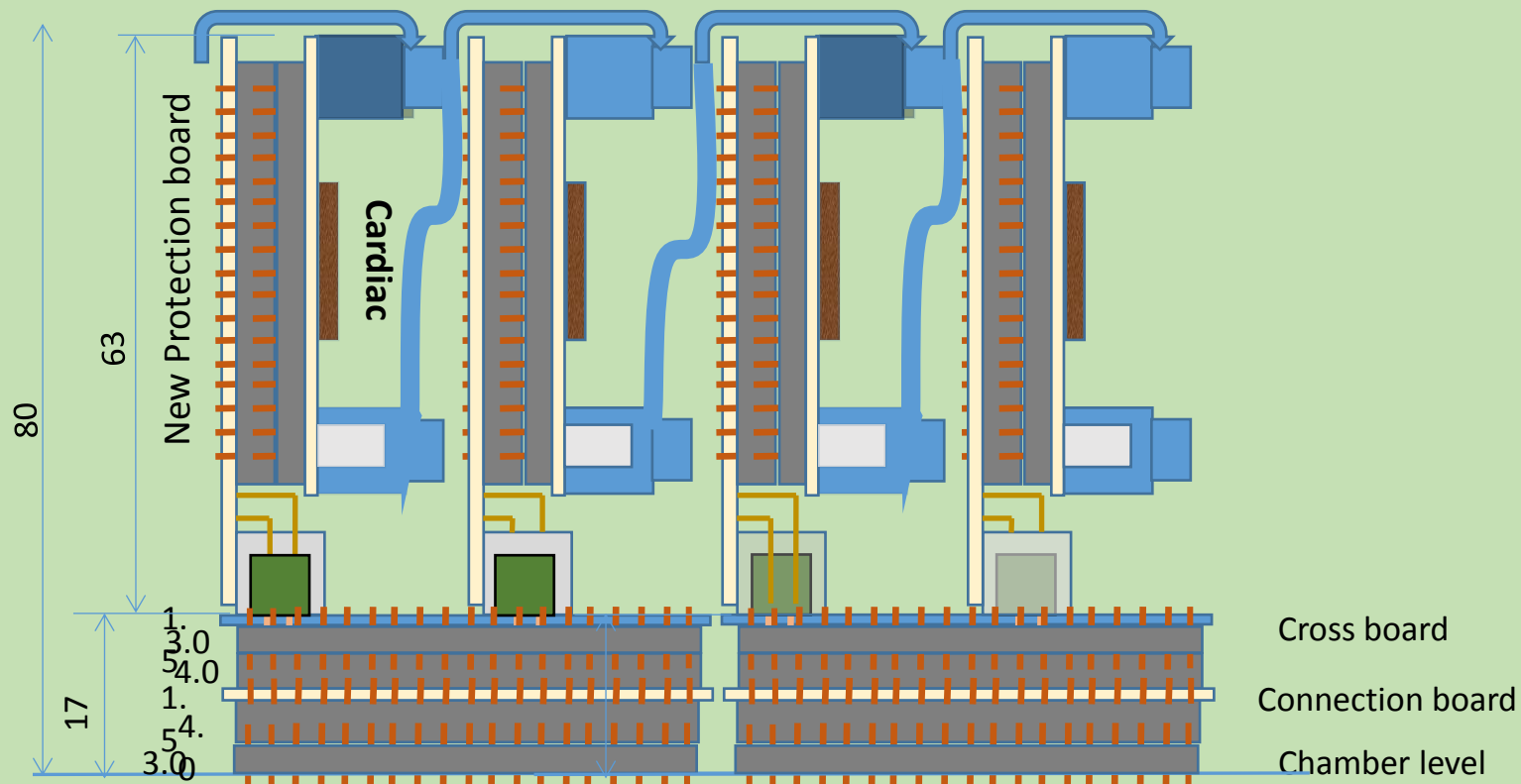
Зависимость эффективности регистрации мюонов от загрузки гамма



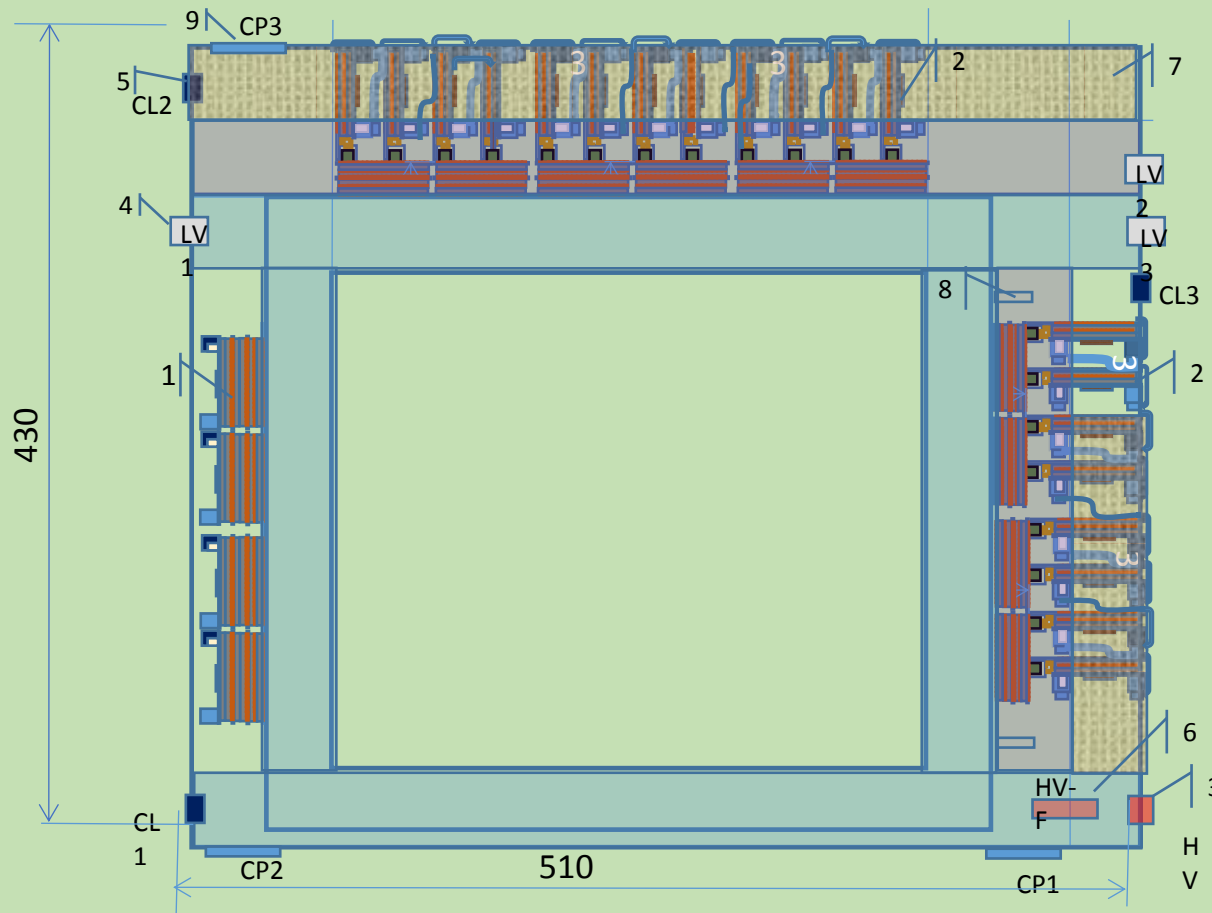
Камера M2R1. Чертежи сигнальных электродов



Предлагаемая схема установки усилителей



М2R1 камера в сборке



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 430 x 510

Соединительные платы для камер M2R1

New set of boards for connecting front-end electronics to the chambers M2R1 and M2R1 is designed and ready for production

1. Connection Board 1
2. Connection Board 2
3. Cross Board
4. New Protection Board

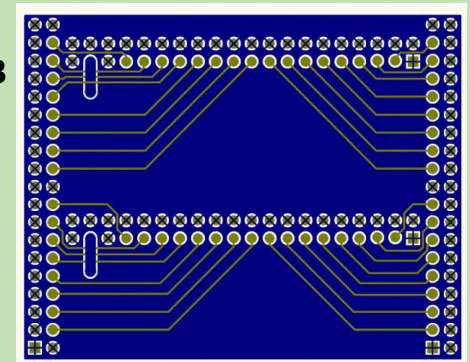
1



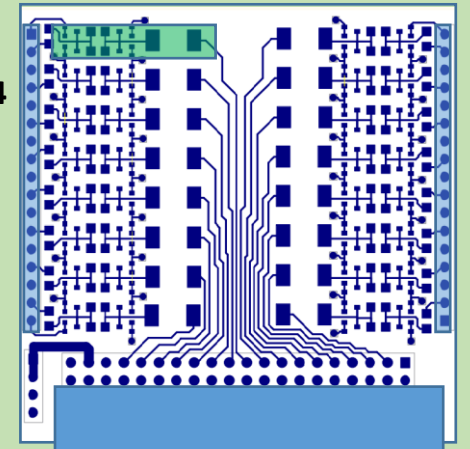
2



3



4



**Первый опытный образец камеры M2R1 сейчас
на начальной стадии производства**

Спасибо за внимание