

# Фронт-энд электроника для электромагнитного CsI калориметра эксперимента Mu2e. Вариант фотосенсора для BaF<sub>2</sub> калориметра.

Атанов Н.В., ОИЯИ

---

ПО МАТЕРИАЛАМ КАНДИДАТСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 01.04.01  
«ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ»

# Содержание

---

Введение

Глава 1. Эксперимент Mu2e. Описание эксперимента

Глава 2. Front-end электроника электромагнитного калориметра

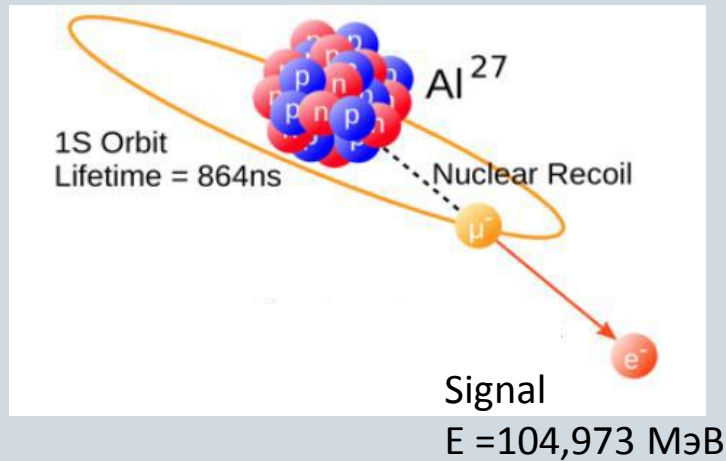
Глава 3. Тестирование электроники и прототипа CsI калориметра

Глава 4. Исследование сцинтилляционного детектора на основе кристалла BaF<sub>2</sub> и микроканального фотоумножителя с AlGaIn-фотокатодом для электромагнитного калориметра второй фазы эксперимента Mu2e

Заключение

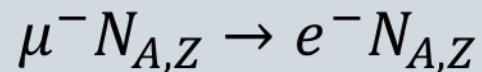
# Эксперимент $\text{Mu}2e$

Muonic Atom



Основная цель эксперимента  $\text{Mu}2e$  – измерить отношение вероятности конверсии отрицательно заряженного мюона в электрон в поле ядра к вероятности захвата мюона ядром с предполагаемой чувствительностью

$$R_{\mu e} \equiv \frac{\Gamma(\mu^- + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z))}{\Gamma(\mu^- + (A,Z) \rightarrow \nu_\mu + (A,Z-1))} \leq 3 * 10^{-17} (90\% \text{ CL})$$

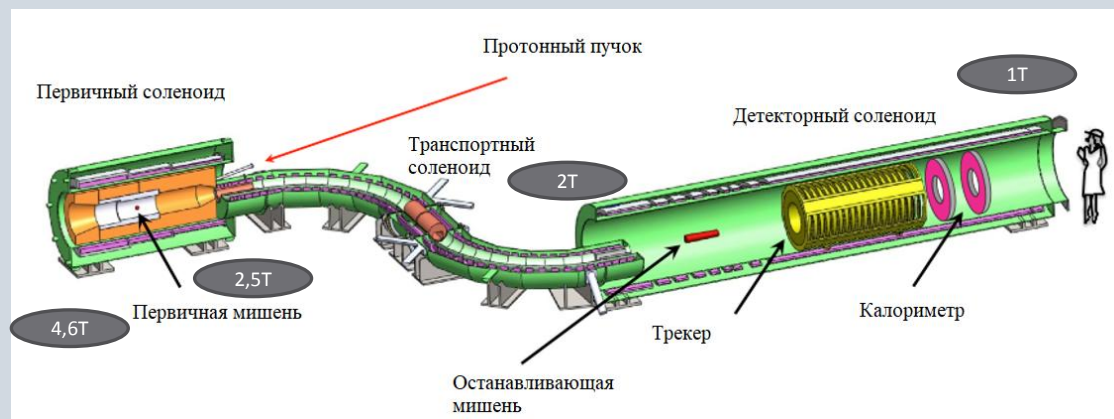


Существующий экспериментальный предел

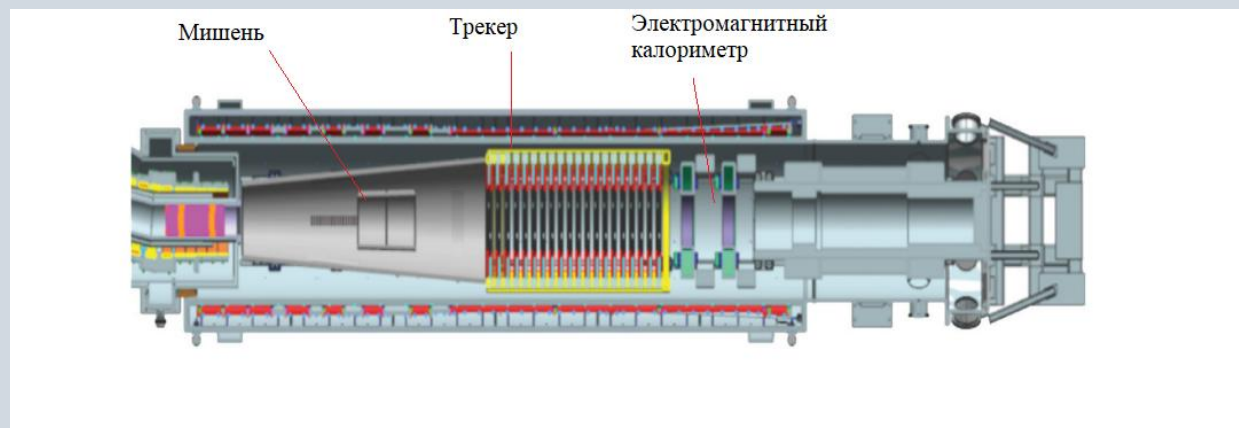
$$R_{\mu e} = \frac{\Gamma(\mu^- \text{Au} \rightarrow e^- \text{Au})}{\Gamma(\mu^- \text{Au Capture})} < 7 \times 10^{-13} (90\% \text{ CL})$$

W. Bertl, et al. (SINDRUM-II) Eur. Phys. J. C47 (2006) 337.

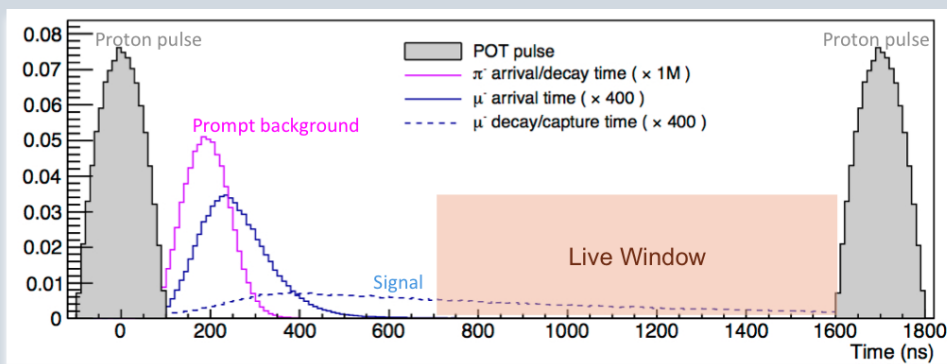
# Эксперимент Mu2e. Экспериментальная установка



Общий вид установки



Детектор внутри вакуумированного детекторного соленоида



Основная часть установки – это система из трех сверхпроводящих соленоидальных магнитов: Первичного соленоида, Транспортного соленоида и Детекторного соленоида.

Магнитное поле в Детекторном соленоиде уменьшается с 2 Тл на входе до 1 Тл в начале области расположения детектора, во всем объеме детектора поле сохраняется постоянным.

# Эксперимент $\text{Mu}2e$ .

## Экспериментальная установка

Основные особенности дизайна эксперимента:

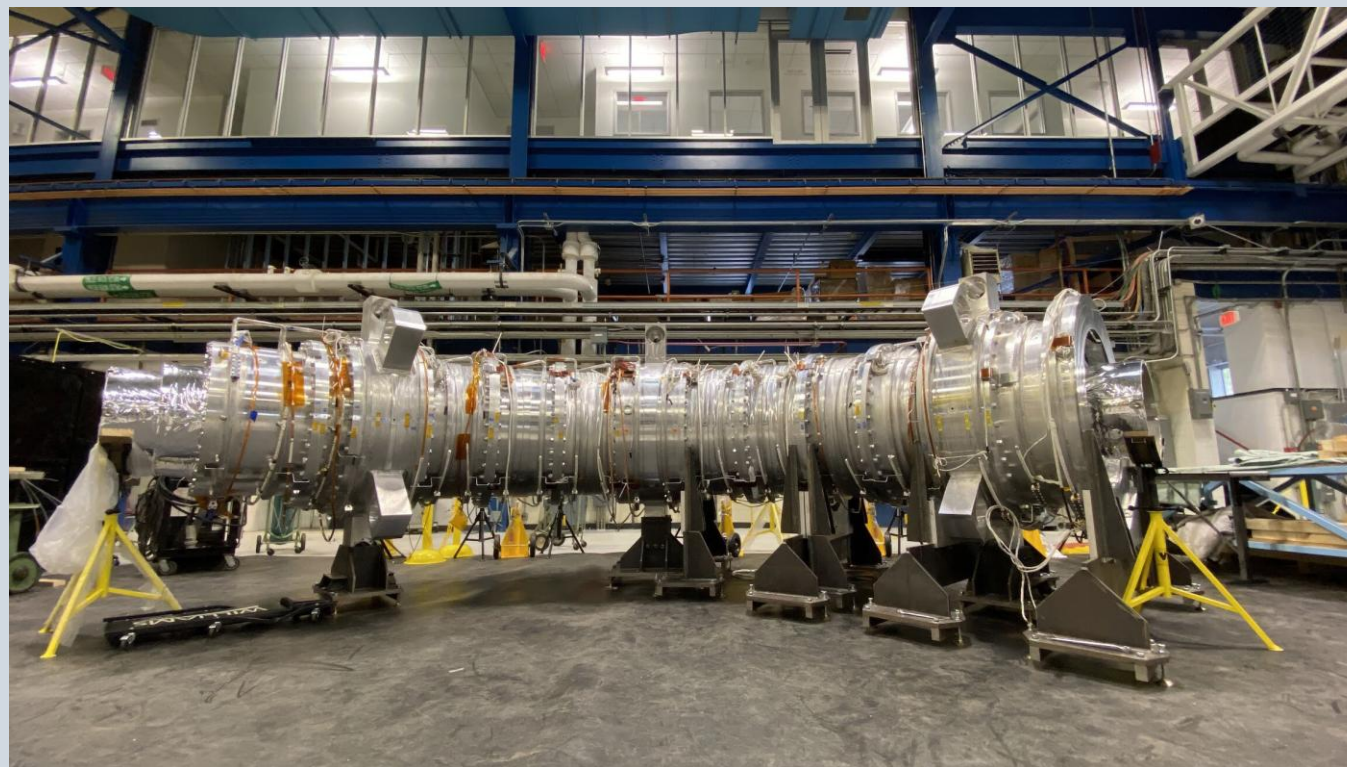
Импульсный пучок

Магнитные ловушки

Искривленный транспортный сверхпроводящий соленоид

Создается на основе дизайна эксперимента MELC (ММФ, Троицк), предложенного в ИЯИ РАН.

R.M. Dzhilkibaev, V.M. Lobashev, "On the Search for  $\mu \rightarrow e$  Conversion on Nuclei", *Sov.J.Nucl.Phys.*, vol. 49, no. 2, pp. 384-385, 1989.



Секция транспортного соленоида эксперимента  $\text{Mu}2e$  (ноябрь 2020)



# Эксперимент Mu2e. Текущее состояние



Внешний вид ускорительного комплекса и площадки эксперимента (Fermilab, США)

# Эксперимент Mu2e. Первая и вторая фаза.

---

## Mu2e-I (2023-2027 гг)

- Энергия протонного пучка 8 ГэВ
- Интенсивность протонного пучка 8 кВт
- Число остановленных мюонов  $\sim 10^{18}$
- Предполагаемая чувствительность  $R_{\mu e} \leq 3 \times 10^{-17}$

## Mu2e-II

- Энергия протонного пучка 800 МэВ
- Интенсивность протонного пучка 100 кВт
- Число остановленных мюонов  $\sim 10^{19}$
- Предполагаемая чувствительность  $R_{\mu e} \leq 2,5 \times 10^{-18}$

# Эксперимент Mu2e. Основные источники фона

Источник	Ожидаемое число событий*
Распад мюонов на орбите (DIO)	0,225
Ошибки распознавания сигнала	0,002
Радиационный захват мюона	<0,002
Электроны пучка	0,036
Распад мюонов на лету	0,036
Распад пионов на лету	<0,001
Радиационный захват пионов	0,064
Наведенный антипротонами	0,006
Космические лучи	0,016
Общий фон	0,41

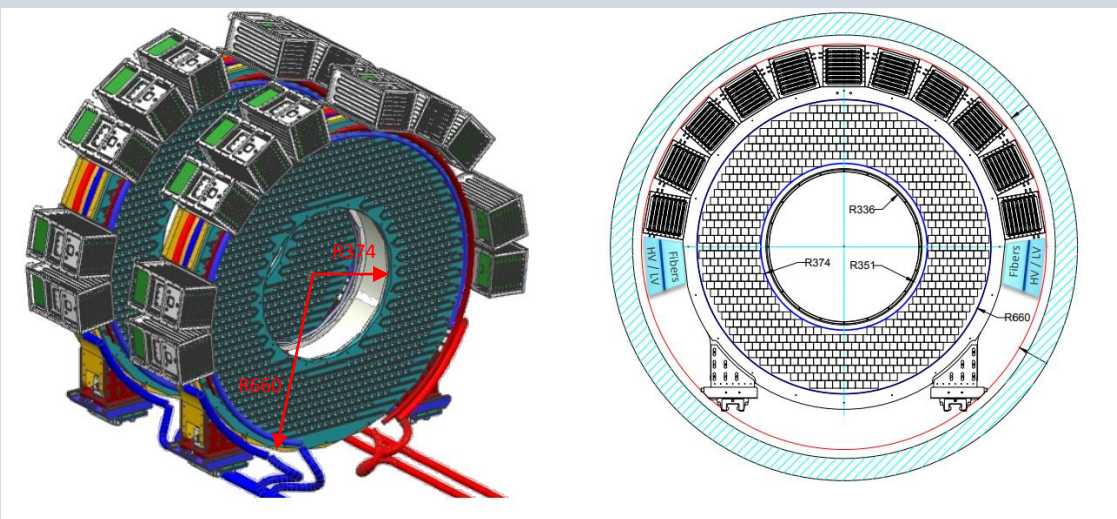
Фоны можно разделить на три группы:

- 1) «мюонные» (DIO электроны, радиационный захват мюонов);
- 2) относящиеся к первичному протонному пучку (радиационный захват пионов, антипротоны);
- 3) космические.

\*На основе данных моделирования в GEANT4. Число событий указано после нормирования



# Эксперимент Mu2e. Электромагнитный калориметр на кристаллах CsI для первой фазы эксперимента



2 диска из 674 кристаллов чистого CsI (производитель SiC). Размер каждого кристалла  $30 \times 30 \times 200 \text{ мм}^3$

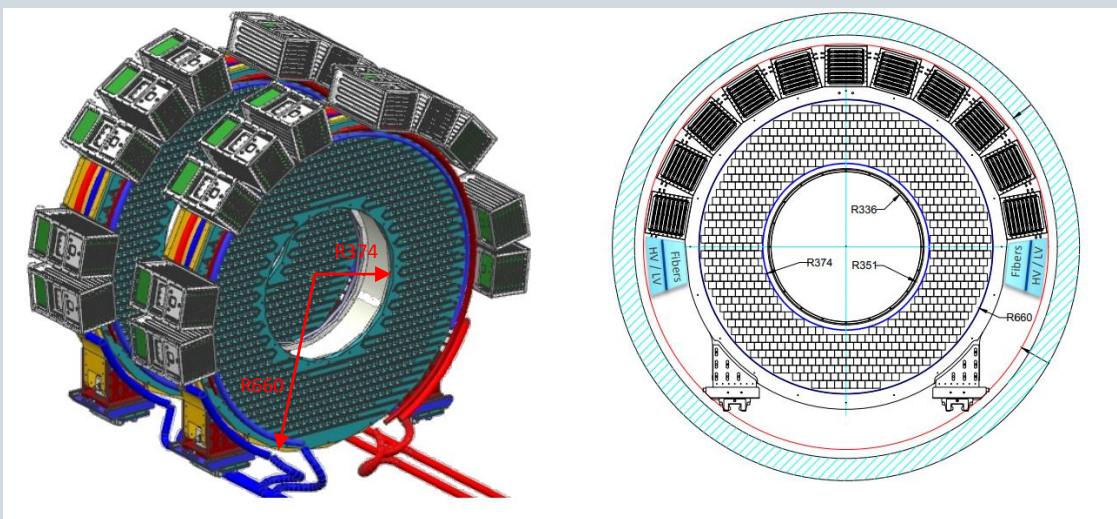
Основные задачи:

- 1) увеличение эффективности триггера;
- 2) идентификация частиц (PID);
- 3) улучшение распознавания треков в трекаре.

Чистый CsI:

- основной пик излучения 310 нм
- константа времени высвечивания 24 нс

# Эксперимент Mu2e. Электромагнитный калориметр на кристаллах CsI для первой фазы эксперимента



2 диска из 674 кристаллов чистого CsI (производитель SiC).  
Размер каждого кристалла  $30 \times 30 \times 200 \text{ мм}^3$

## Требования к калориметру

энергетическое разрешение менее 10% при 100 МэВ

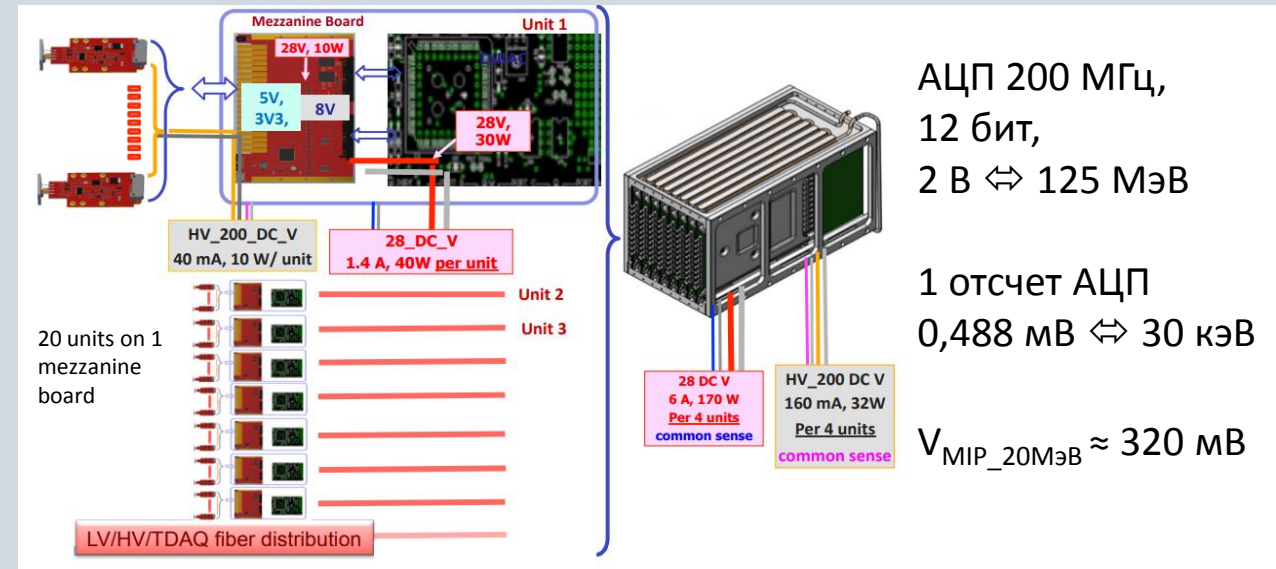
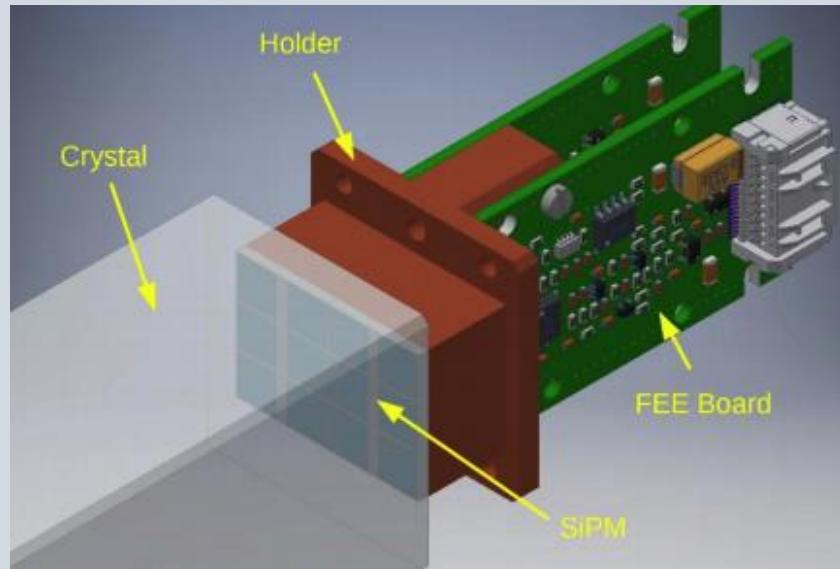
временное разрешение лучше 0,5 нс

разрешение по координате лучше 1 см

## Калориметр должен работать

- в постоянном магнитном поле 1 Тл
- при вакууме  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  торр
- при дозах облучения до 120 кРад за 3 года и в нейтронном потоке плотностью до  $10^{11}_{-1\text{МэВ\_экв}}/\text{см}^2$

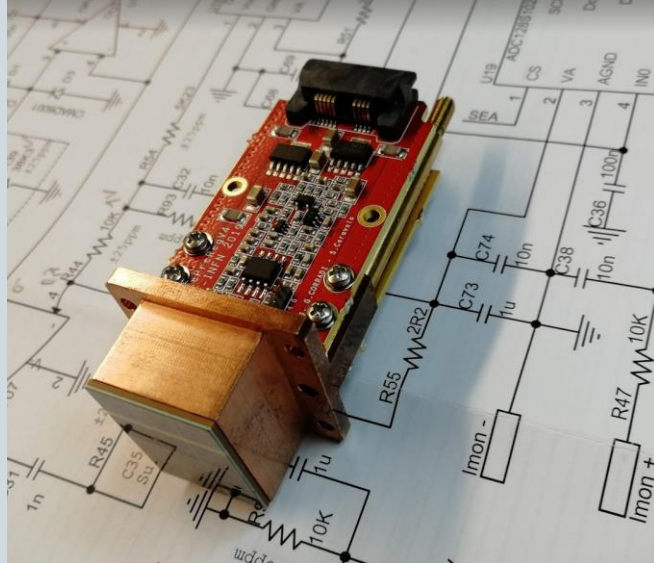
# Фронт-энд электроника электромагнитного калориметра первой фазы Mu2e



Специальные требования к фронт-энд электронике:

- радиационная стойкость к гамма-излучению, максимальная поглощенная доза без ущерба работоспособности **100 кРад**;
- устойчивость к интегральному потоку нейтронов  **$10^{12}$  н/см<sup>2</sup> за 3 года**;
- сохранение работоспособности в вакууме в диапазоне давлений  **$10^{-2}$ - $10^{-4}$  торр**;
- устойчивость к постоянному аксиальному магнитному полю **1Т**;
- линейность отклика в широком диапазоне входных токов **2 мкА-2 мА**.

# Фронт-энд электроника электромагнитного калориметра первой фазы Mu2e



Оценка шумов калориметра\*:

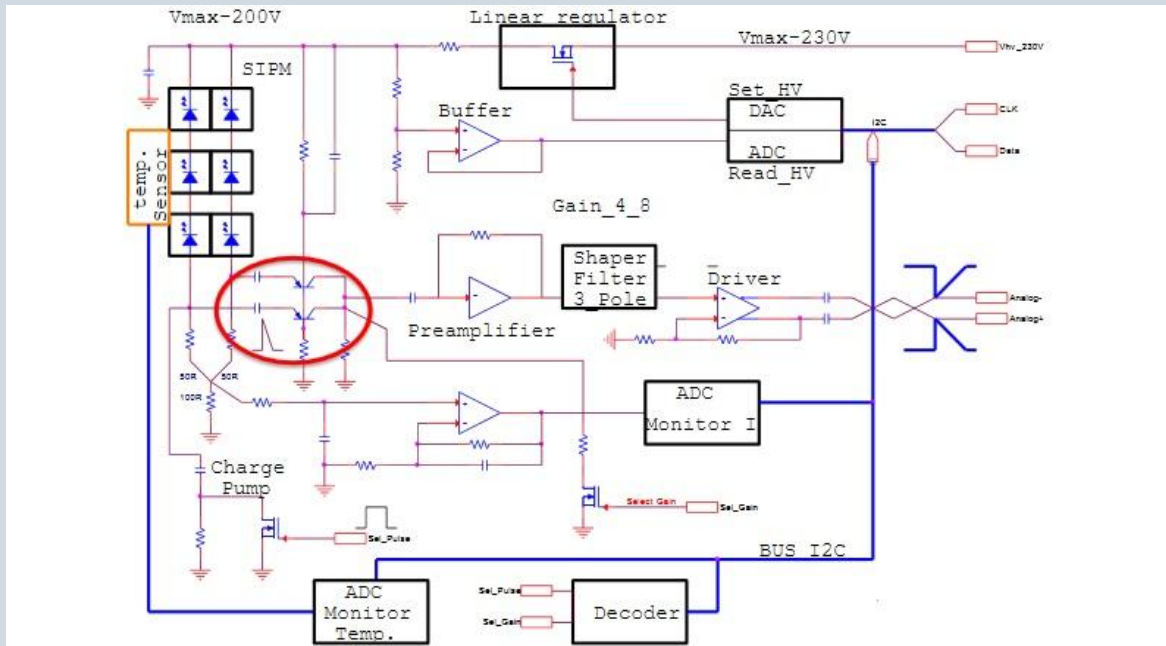
FEE + дигитайзер	200 кэВ	6 р.е.
Idark, начало набора	350 кэВ	8 р.е.
Idark, в конце**	750 кэВ	12 р.е.
RIN, в начале	850 кэВ	11 р.е.
RIN, в середине	280 кэВ	23 р.е.
RIN, в конце	400 кэВ	30 р.е.

\* из расчета световыхода 30 р.е. на 1 МэВ

\*\* с учетом охлаждения до -10 °С



# Фронт-энд электроника электромагнитного калориметра. Предусилитель



Основные блоки:

- входной каскад
- усилительный каскад
- выходной драйвер
- вспомогательные цепи: преобразователя напряжения, выбора коэффициента усиления предусилителя

Усилители спроектированы со следующими заданными характеристиками:

входное сопротивление 33 Ом;

выходное сопротивление 100 Ом;

выходной динамический диапазон 2В;

коэффициент усиления по току 2-4;

полоса пропускания 40 МГц;

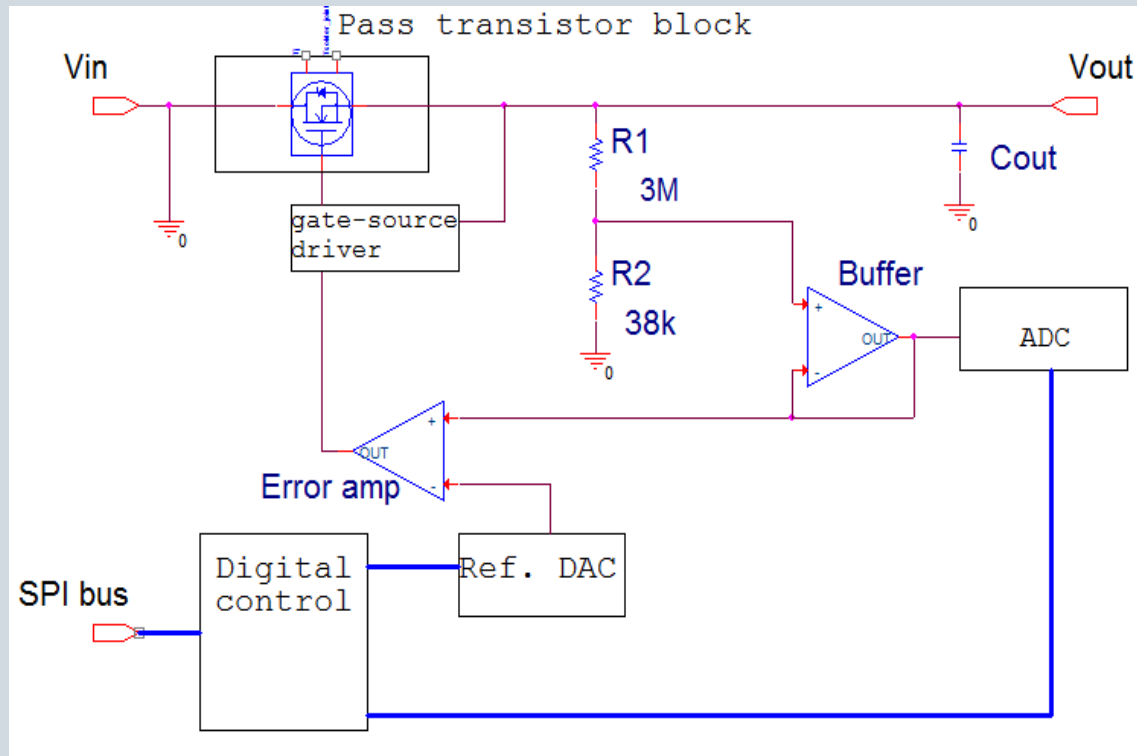
спектральная плотность шума усилительного каскада 2нВ/√Гц;

потребляемая мощность 45мВт;

передний/задний фронт сигнала 25/120 нс.



# Фронт-энд электроника электромагнитного калориметра. Линейный регулятор



Входной диапазон токов от 2 мкА до 2 мА

Выходное напряжение 200 В → 150..160 В

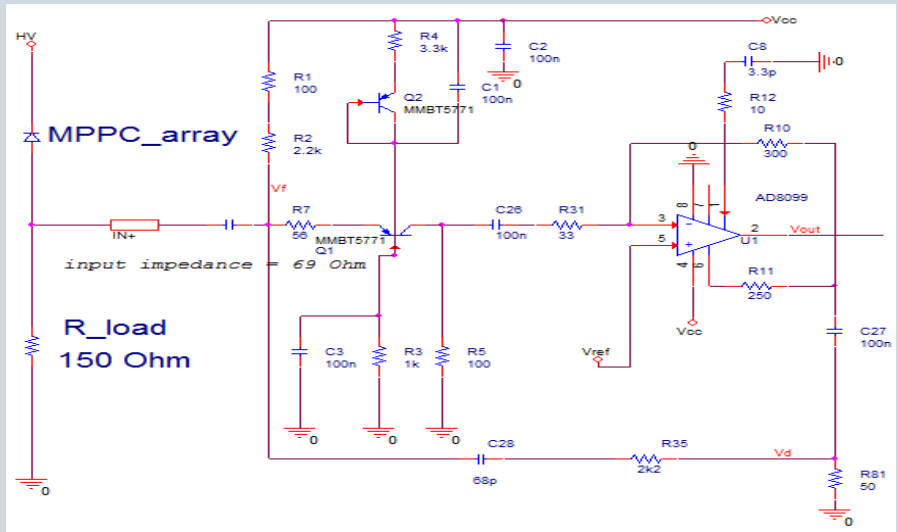
Точность установки напряжения не хуже 50 ppm

Амплитуда шума на выходе < 8 мВ

Основные блоки:

- Понижающий транзисторный блок
- Делитель обратной связи
- Компаратор и установка опорного напряжения
- Цифровая обратная связь

# Пример расчета каскадов предусилителя на примере входного каскада



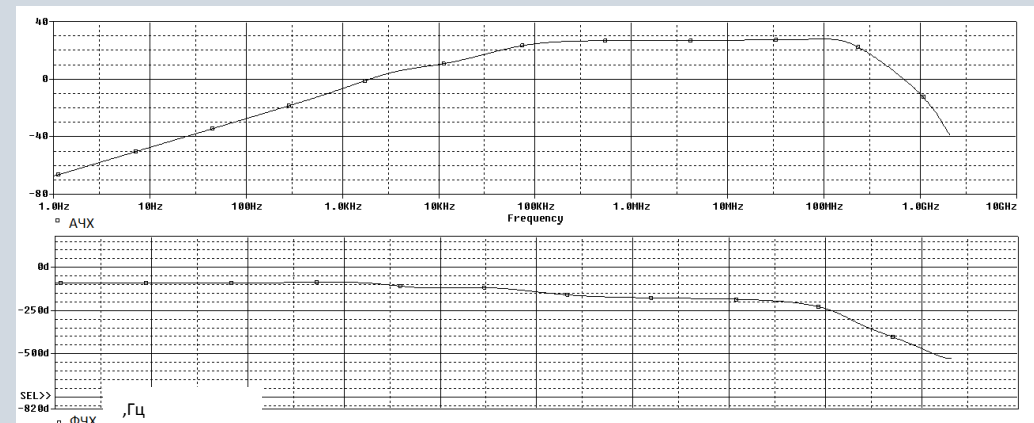
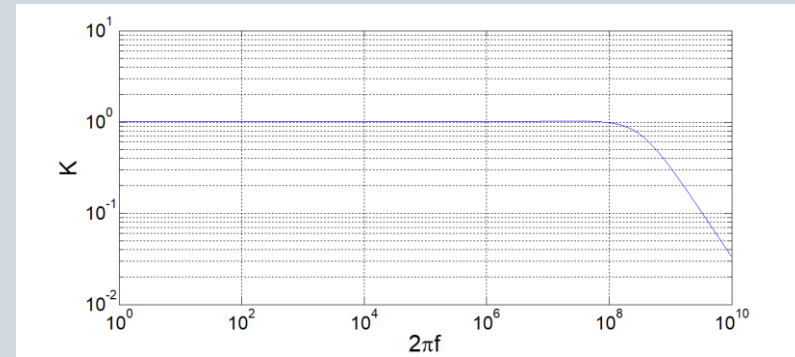
Функция передачи для такого каскада запишется как

$$K = \frac{AB}{(\tau_1 s + 1) \left(1 - \frac{AB * \tau_2 s}{(1 + \tau_3 s)(1 + \tau_1 s)}\right)} \sim \frac{(1 + \tau_3 s)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_3 s) - AB * \tau_2 s}$$

Для номиналов элементов, показанных на схеме  $\tau_1 \approx 3$  нс,  $\tau_2 \approx 4$  нс,  $\tau_3 \approx 150$  нс, и второй полюс оказывается близко расположен к нулю. Поэтому для функции передачи можно приближенно записать:

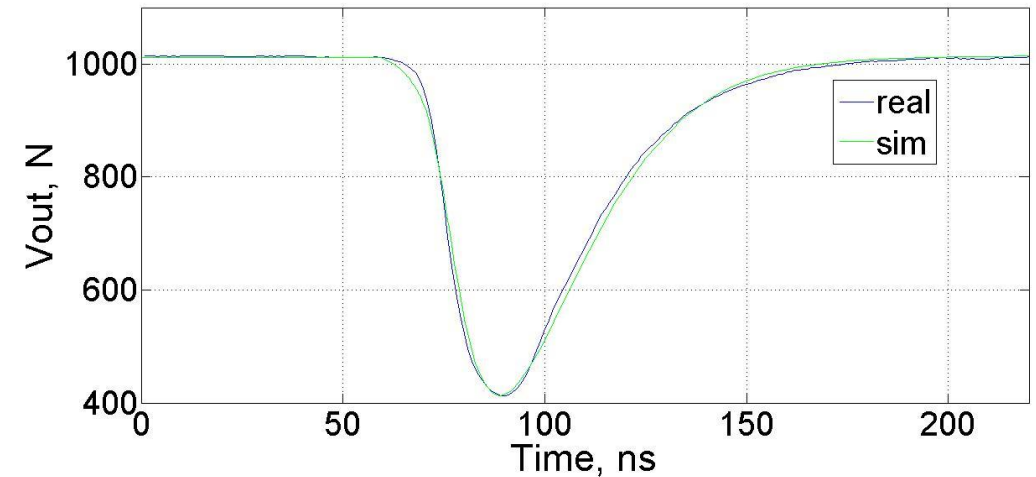
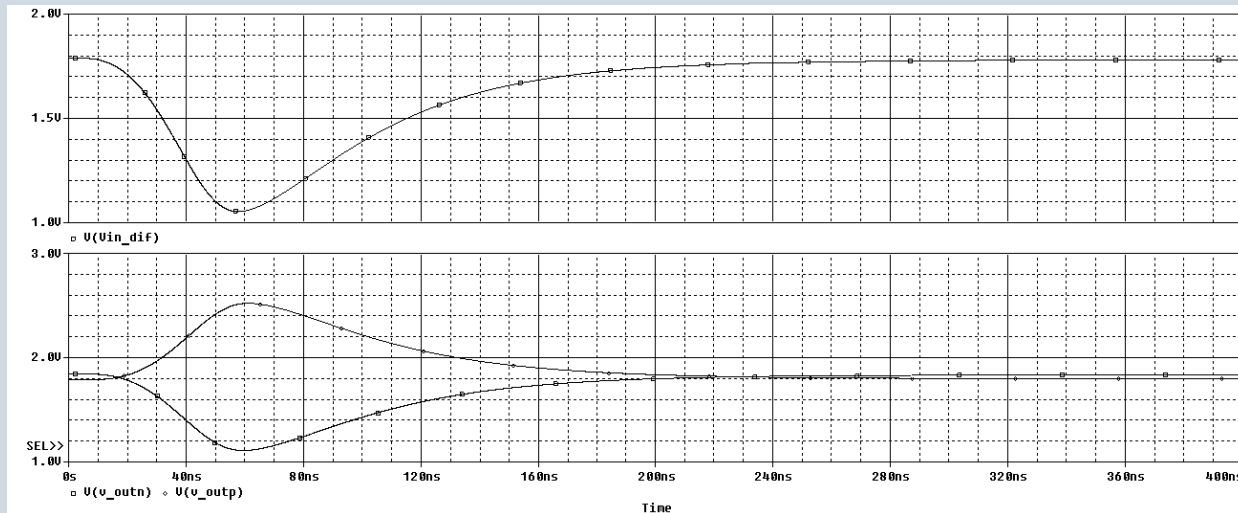
$$K \sim \frac{1}{\tau_1 s + 1} \sim Ka$$

Т.е. в нашем случае общая функция передачи в широком диапазоне частот ведет себя также, как и система без обратной связи, и имеет доминантный полюс около 300 МГц

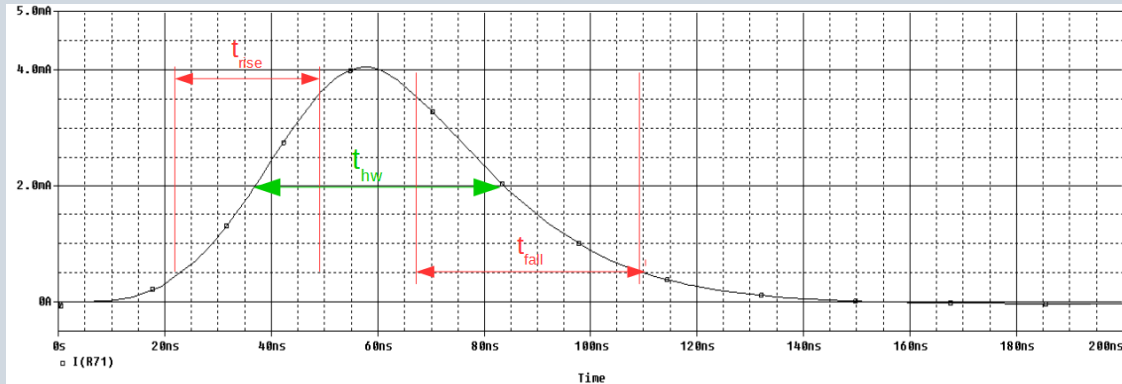


Рассчитанные в пакете Matlab (сверху), системе схемотехнического моделирования PSpice АЧХ (в середине) и ФЧХ (снизу) для усилительного каскада плат FEE v1. В широком диапазоне частот 100 кГц – 1 ГГц система скомпенсирована и ведет себя как система первого порядка с доминирующим полюсом около 300 МГц.

# Сравнение с PSpice моделированием. Сигнал на выходе предусилителя

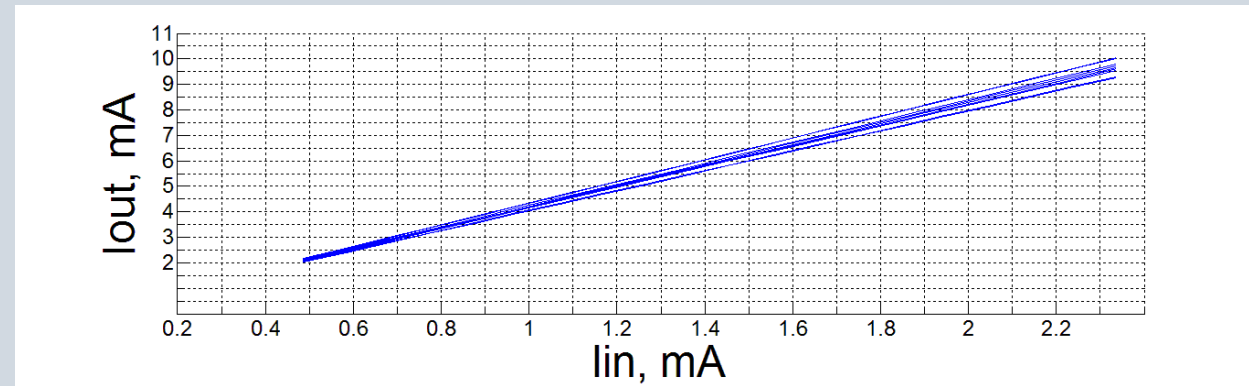


# Измерение параметров ФЭЕ. Стенд для контроля качества предусилителей



Для каждого усилителя оцениваются:

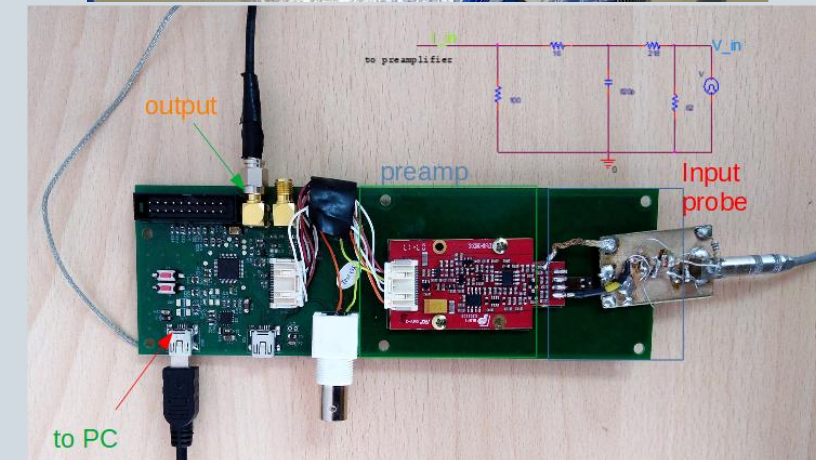
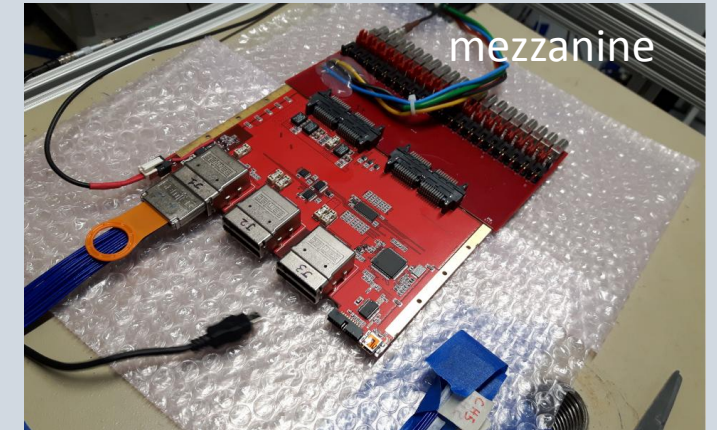
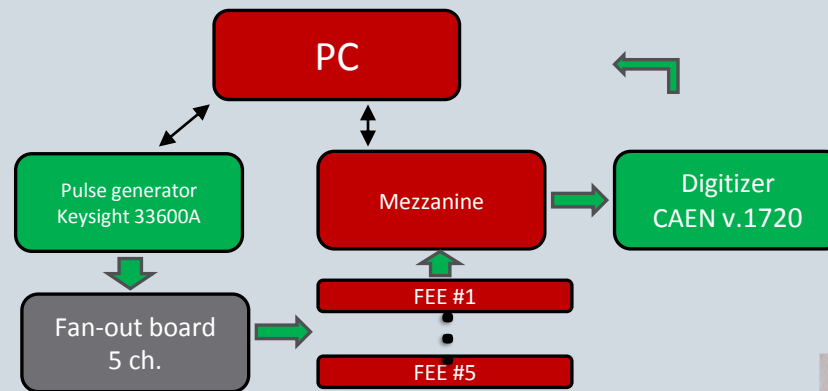
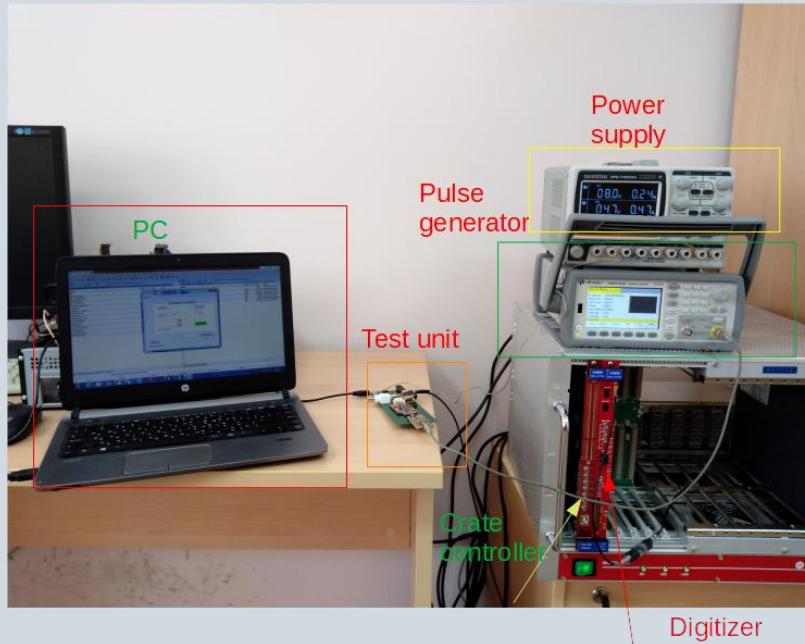
- полоса пропускания предусилителя
- время переднего и заднего фронта отклика на эталонный входной импульс
- максимальная частота следования импульсов
- энергопотребление
- коэффициент усиления
- нелинейность
- амплитуда шумовой полки на выходе усилителя



Измерение нелинейности и разброса коэффициента усиления для пробной партии усилителей

Критерий нелинейности  
 $\langle \max(dy/y) \rangle = 0.5\%$

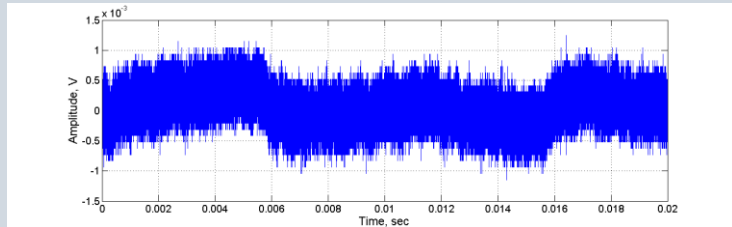
# Измерение параметров FEE. Стенд для контроля качества предусилителей



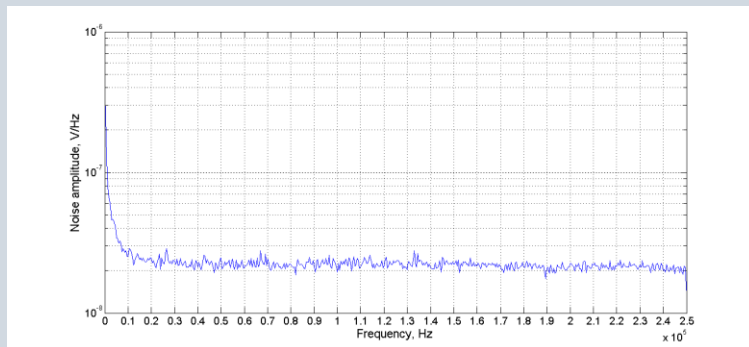
Перед установкой в калориметр **необходимо провести тестирование всего набора из 3500 предусилителей**. Для проведения этой работы в Лаборатории Ядерных Проблем (ОИЯИ, Дубна) разработан тестовый стенд – программно-аппаратный комплекс для тестирования и контроля качества



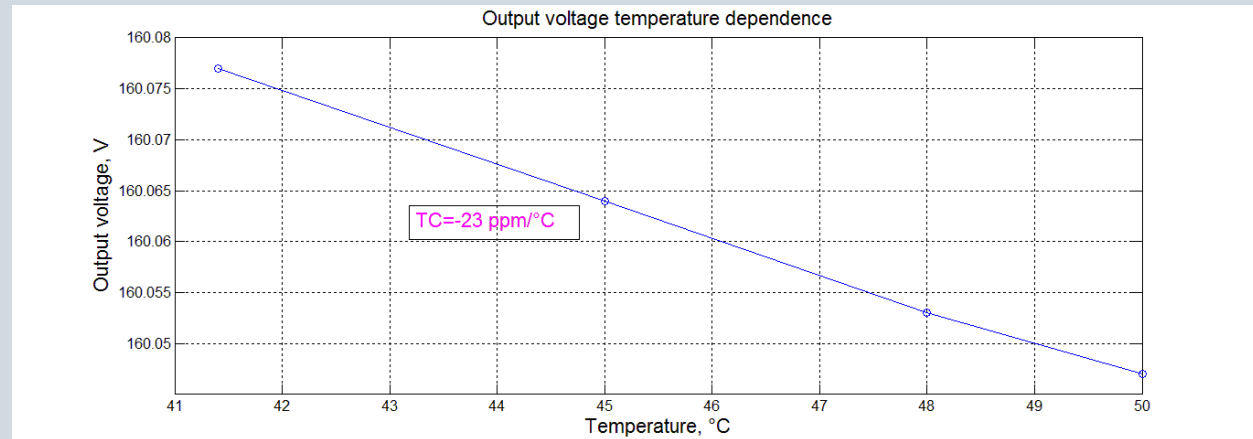
# Измерение параметров линейного регулятора



Шум на выходе линейного регулятора для высокого нагрузочного тока  $I_{load} = 2$  mA



Спектр амплитуд шума регулятора, ток нагрузки  $I_{load} = 2$  mA,  $V_{вх} = 200$  V,  $V_{вых} = 160$  V



Температурная зависимость напряжения на выходе линейного регулятора

Точность установки напряжения

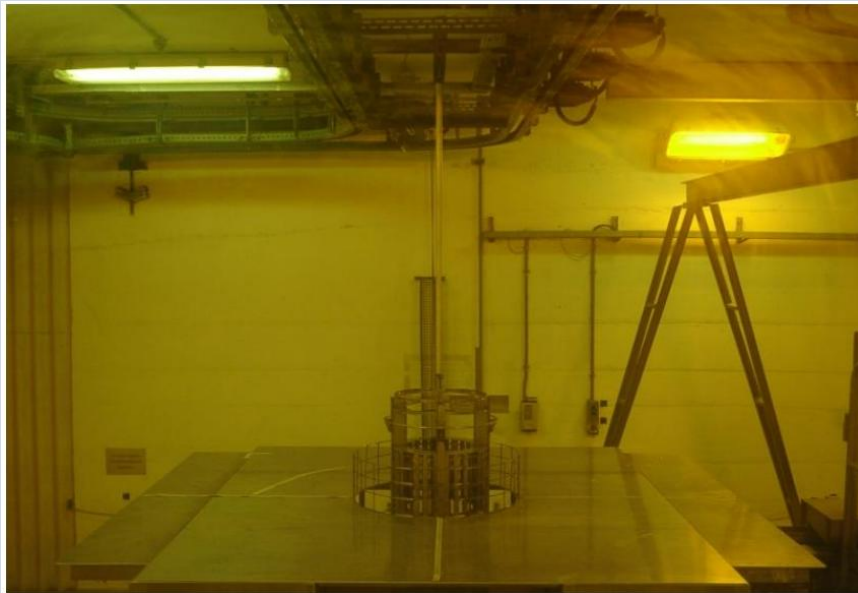
Уровень шума на выходе

Калибровочные коэффициенты для ЦАП/АЦП

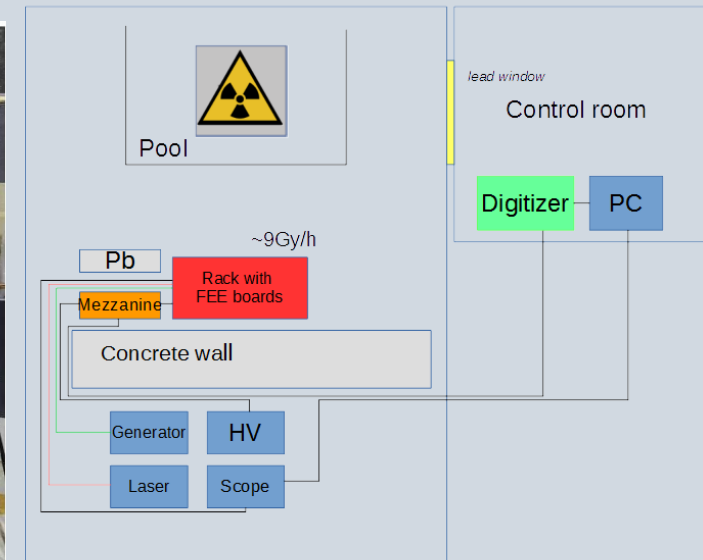
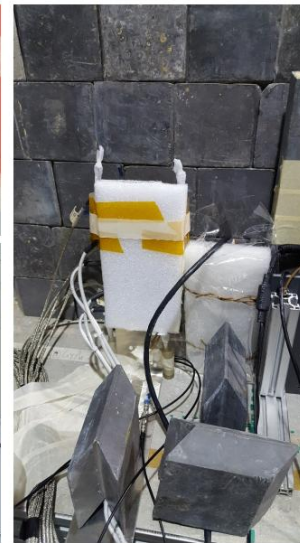
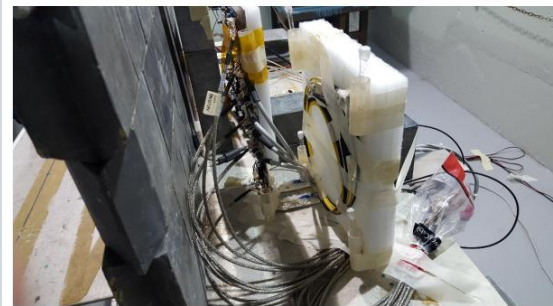
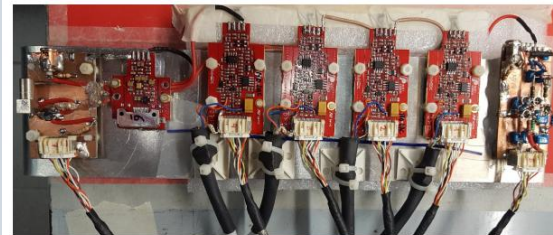
Температурная зависимость выхода

- Измеренное значение температурного коэффициента  $T_c = -23$  ppm/°C

# Тестирование FEE электроники. Радиационные тесты. Гамма-излучение

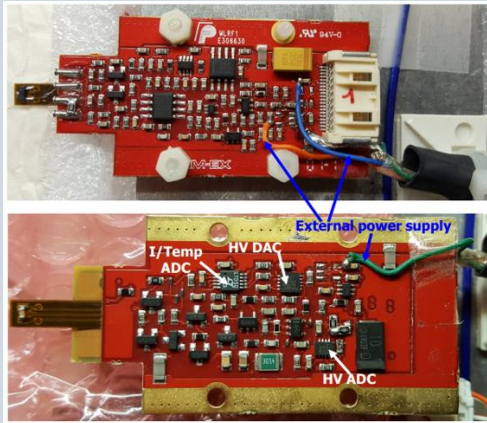


Вид на бассейн с источником  $^{60}\text{Co}$  в экранированном помещении через смотровое окно из свинцового стекла в контрольном зале установки CALLIOPE (ENEA, Италия)



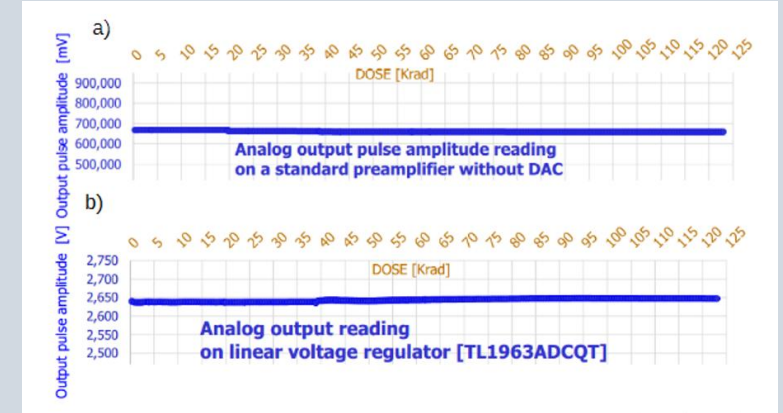
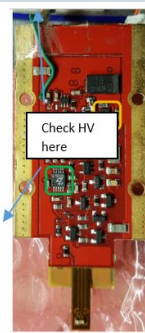
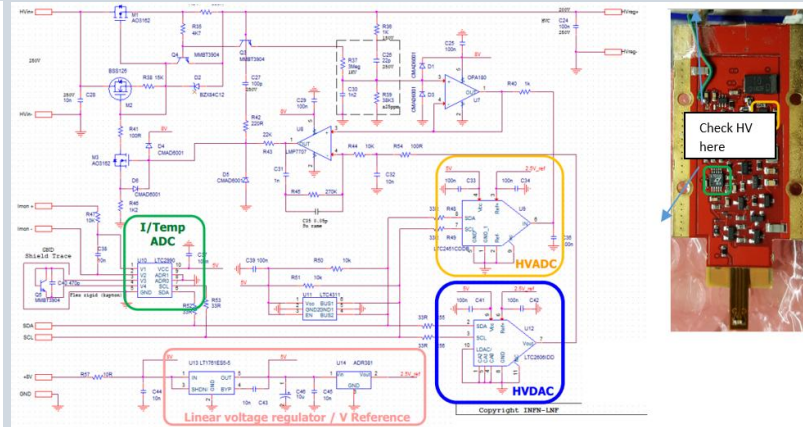
Установка для изучения устойчивости плат FEE к гамма-излучению

# Тестирование FEE электроники. Радиационные тесты. Гамма-излучение



Standard PRE-REG  
Top side  
(Preamplifier side)

Standard PRE-REG  
Bottom side  
(HV regulator side)



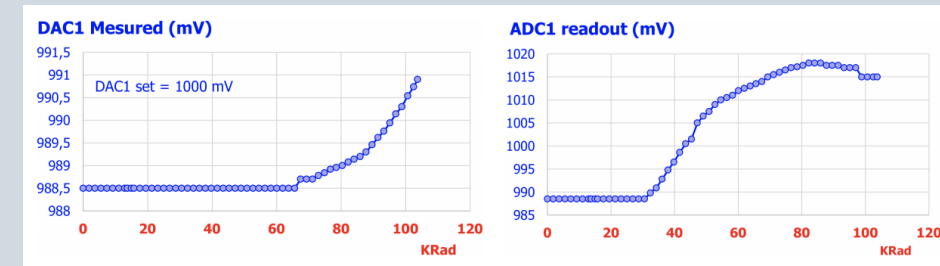
Аналоговая петля

Несколько специально разработанных для радиационных тестов модификаций плат front-end электроники FEE v1 предназначены для независимой проверки различных частей предусилителя и линейного регулятора для локализации отказавшего участка при облучении.

Все конфигурации имеют внешний источник питания вместо низковольтной микросхемы регулятора напряжения

Считывание показаний высоковольтного линейного регулятора выполнялось разными способами:

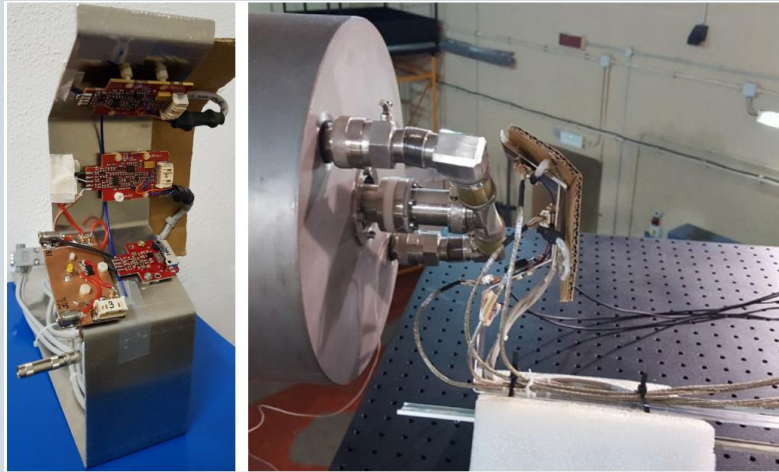
- прямое считывание значения напряжения на разьеме для подключения фотодетектора через резисторный делитель при помощи вольтметра FLUKE
- считывание при помощи осциллографа напряжения на входе АЦП в петле обратной связи линейного регулятора. Измеряя это напряжение до и после облучения, можно посчитать коэффициент передачи петли обратной связи линейного регулятора : он должен оставаться неизменным, если аналоговые активные компоненты, входящие в эту обратную связь, не повреждены;
- цифровое считывание показаний АЦП. Сравнивая это значение с аналоговыми измерениями, мы можем контролировать работоспособность АЦП.



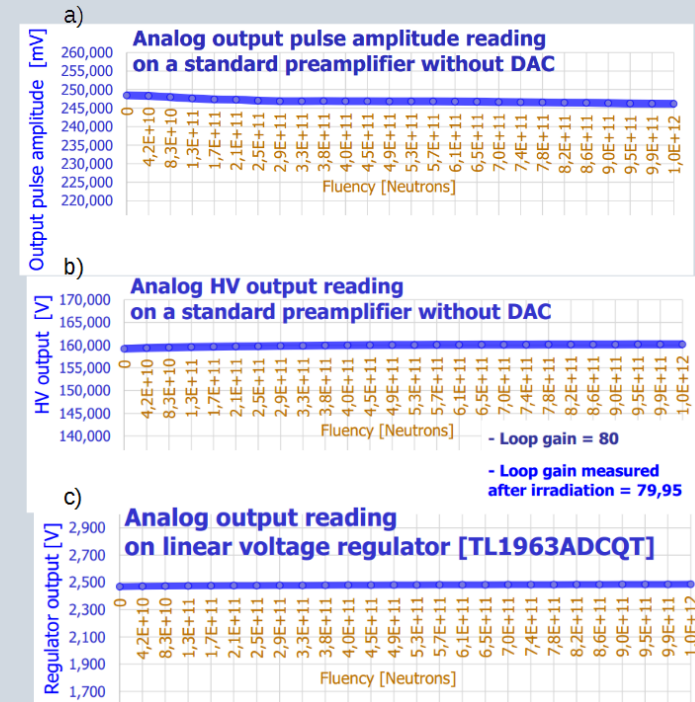
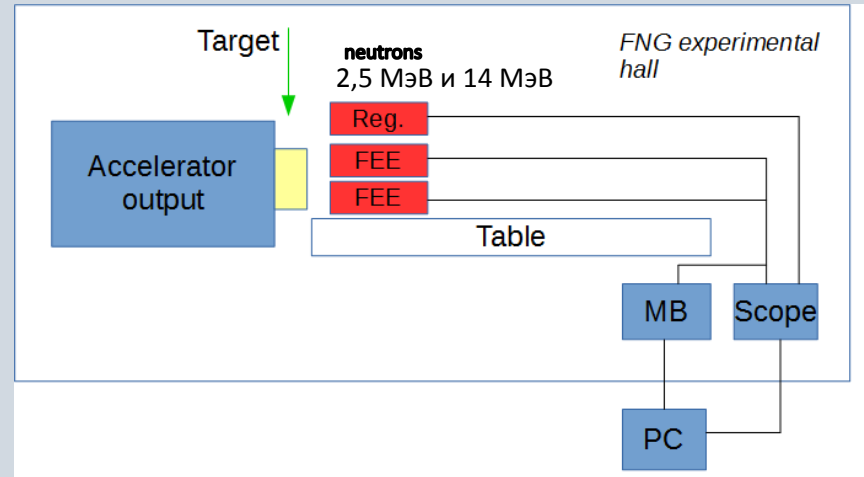
Цифровая петля



# Тестирование FEE электроники. Нейтронные тесты



Тестирование модулей электроники на устойчивость к воздействию потока нейтронов было проведено на установке FNG (ENEA, Фраскати, Италия).



Испытываемые образцы размещались на столе напротив пушки в нескольких сантиметрах от излучающей трубки, плата концентратора для считывания сигнала с предусилителей была помещена в стороне от потока. Суммарный поток нейтронов через испытываемые образцы составил  $10^{12} \text{ n}_{1\text{МэВ}}/\text{см}^2$  за время сеанса около 260 минут

# Радиационные тесты. Итоговый результат

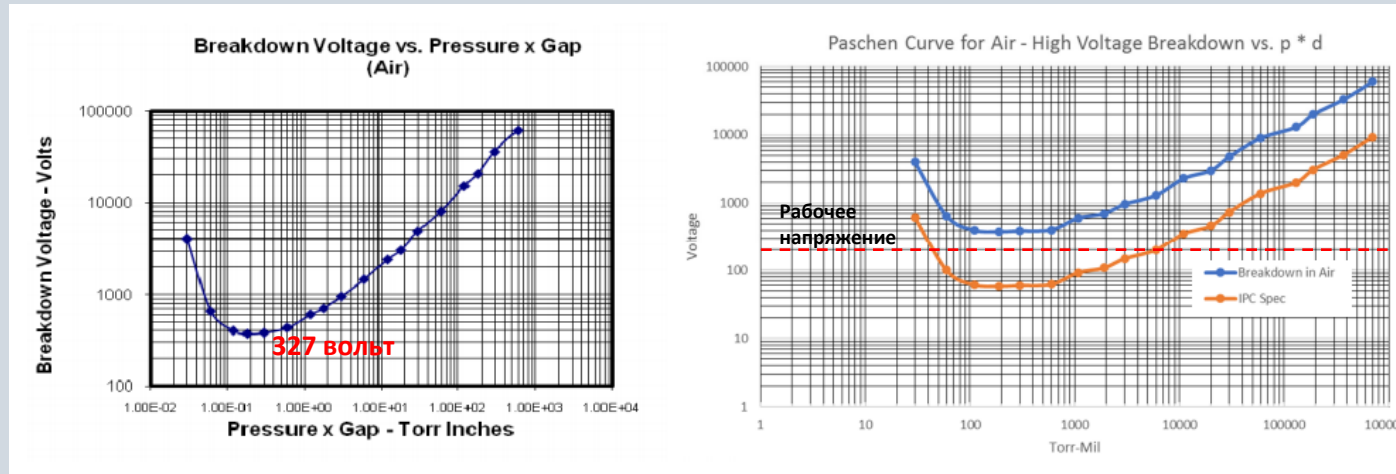
---

Все аналоговые компоненты предусилителя и аналоговой петли линейного регулятора успешно прошли испытания гамма лучами (поглощенная доза >100 кРад) и потоком нейтронов (суммарный поток  $10^{12}$  н<sub>1МэВ</sub>/см<sup>2</sup>). Однако, в первых тестах при воздействии гамма-лучами произошли отказы цифровых микросхем АЦП, ЦАП и низковольтного линейного регулятора в цепи питания плат FEE.

Были предложены варианты их замены из числа аналогичных микросхем фирмы Texas Instruments. Были проведены специальные сеансы, подтверждающие работоспособность предложенных аналогов в условиях эксперимента Mu2e, после чего были разработаны новые версии плат front-end электроники FEE v3.



# Тестирование FEE электроники. Вакуумные тесты. Эффект Пашена

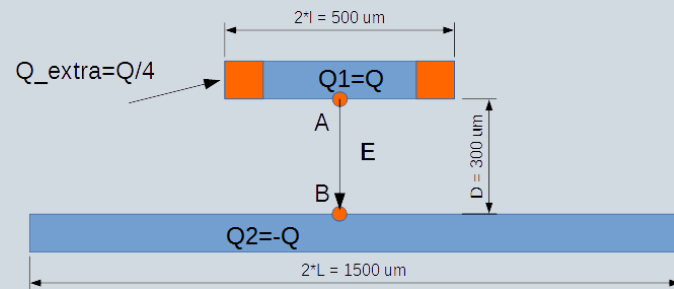
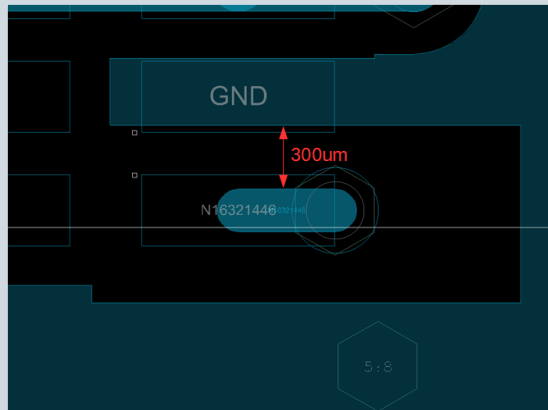


Для однородного поля  $V_B = \frac{Bpd}{\ln Apd - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma_{se}})]} = 327 \text{ В}$  для воздуха

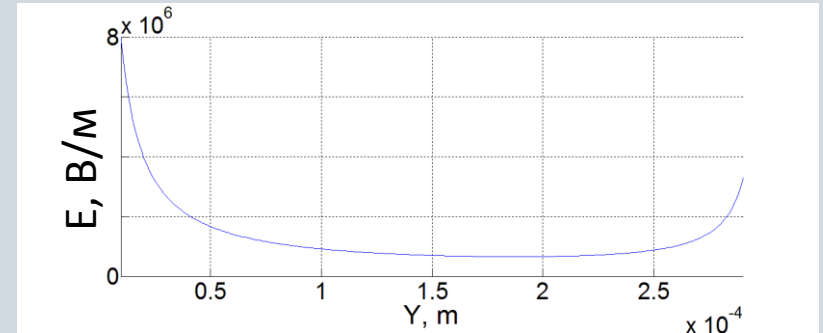
При работе в вакууме (условие эксперимента Mu2e) возможно существенное снижение напряжение пробоя в воздухе => выход из строя каналов калориметра

По спецификации IPC необходим 5-кратный запас => важно оценить, насколько далеко рабочая точка высоковольтных узлов плат FEE находится от текущего значения напряжения пробоя

# Вакуумные тесты. Эффект Пашена для неоднородного поля. Расчет минимального напряжения пробоя



Две тонких заряженных нити конечного размера



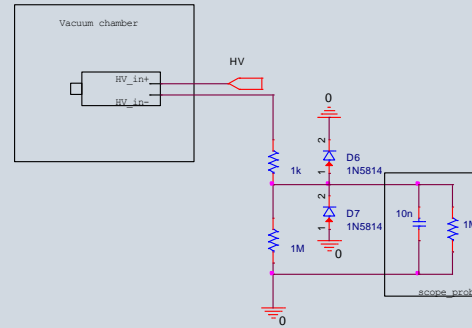
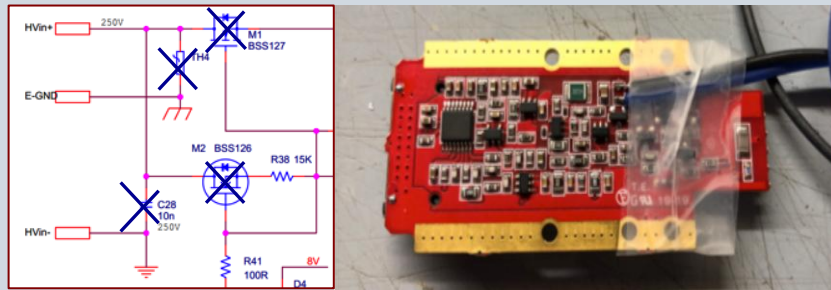
При таком профиле напряженности электрического поля возможно увеличение минимального напряжения пробоя

$$\int_0^D \alpha(y) dy \geq \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma_{se}} \right), \quad \text{критерий Таунсенда для пробоя, где}$$

$$\alpha(y) = A p e^{-\frac{Bp}{E(y)}}, \quad \text{где следовательно } A=112.5 \text{ кПа/см и } B=2737.5 \text{ В/(кПа*см)}$$

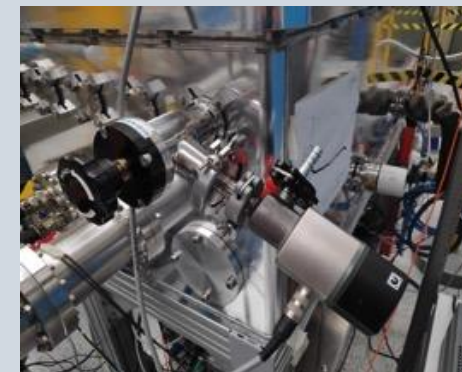
$$\int_0^D \alpha(y) dy \geq 254,59 \text{ и } V_{\text{breakdown}} > 630 \text{ В}$$

# Вакуумные тесты. Эффект Пашена для неоднородного поля. Экспериментальное исследование



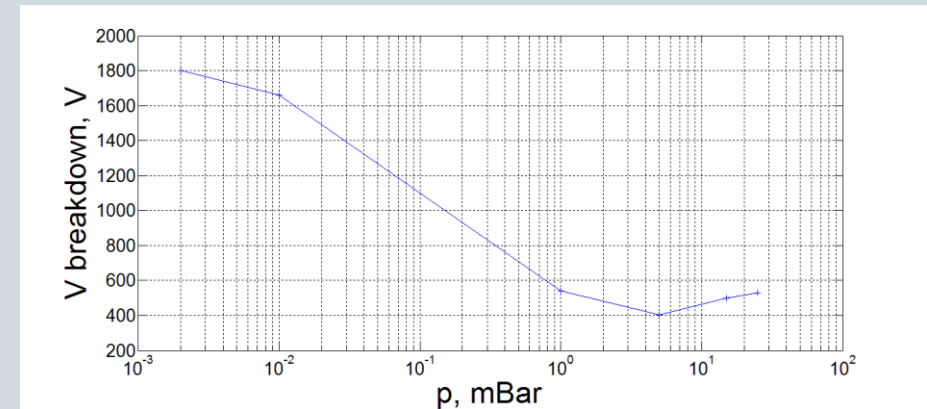
Чтобы измерить напряжение пробоя в плате предусилителя как функцию давления один из предусилителей был помещен в вакуумную камеру

Для обнаружения начала пробоя разработан специальный щуп



# Вакуумные тесты. Эффект Пашена для неоднородного поля. Экспериментальное исследование

HV [V]	25 mbar	15 mbar	5 mbar	1 mbar	10 <sup>-2</sup> mbar	2x10 <sup>-3</sup> mbar
300	ok	ok	ok	ok	ok	ok
350	ok	ok	ok	ok	ok	ok
400	ok	ok	bd @ 405 V	ok	ok	ok
450	ok	ok		ok	ok	ok
500	ok	bd		ok	ok	ok
530	breakdown			ok	ok	ok
540				bd	ok	ok
600					ok	ok
900					ok	ok
1200					ok	ok
1600					ok	ok
					Bd @ 1660	Bd @ 1800



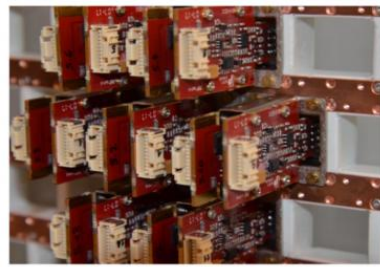
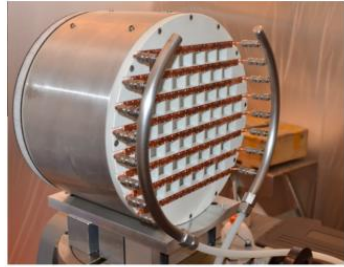
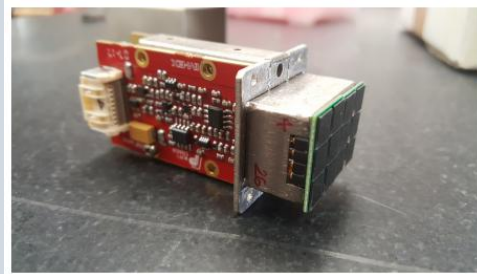
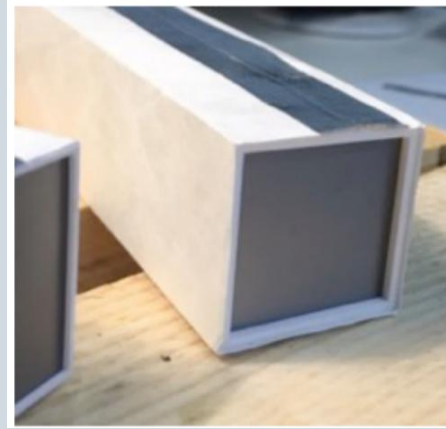
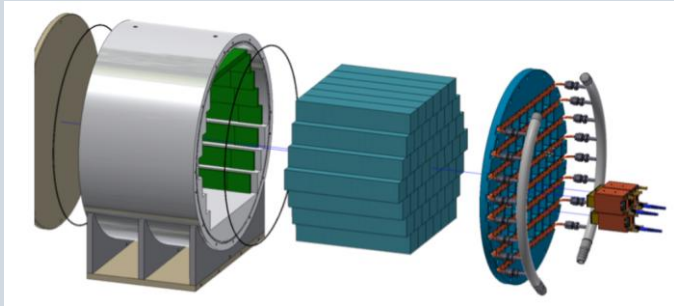
В области рабочих значений давлений для калориметра Mu2e  $p = 10^{-3} - 10^{-2}$  мБар напряжение выходит пробоя выше, чем 1600 В, и мы имеем фактор запаса по напряжению больше 8.

Увеличение минимального напряжения пробоя до 405 В.

Присутствует только один минимум.

При прохождении через точку минимума 405 В мы имеем запас по надежности в 2,2 раза, т.к. рабочее напряжение <200 В.

# Прототип CsI калориметра Module0



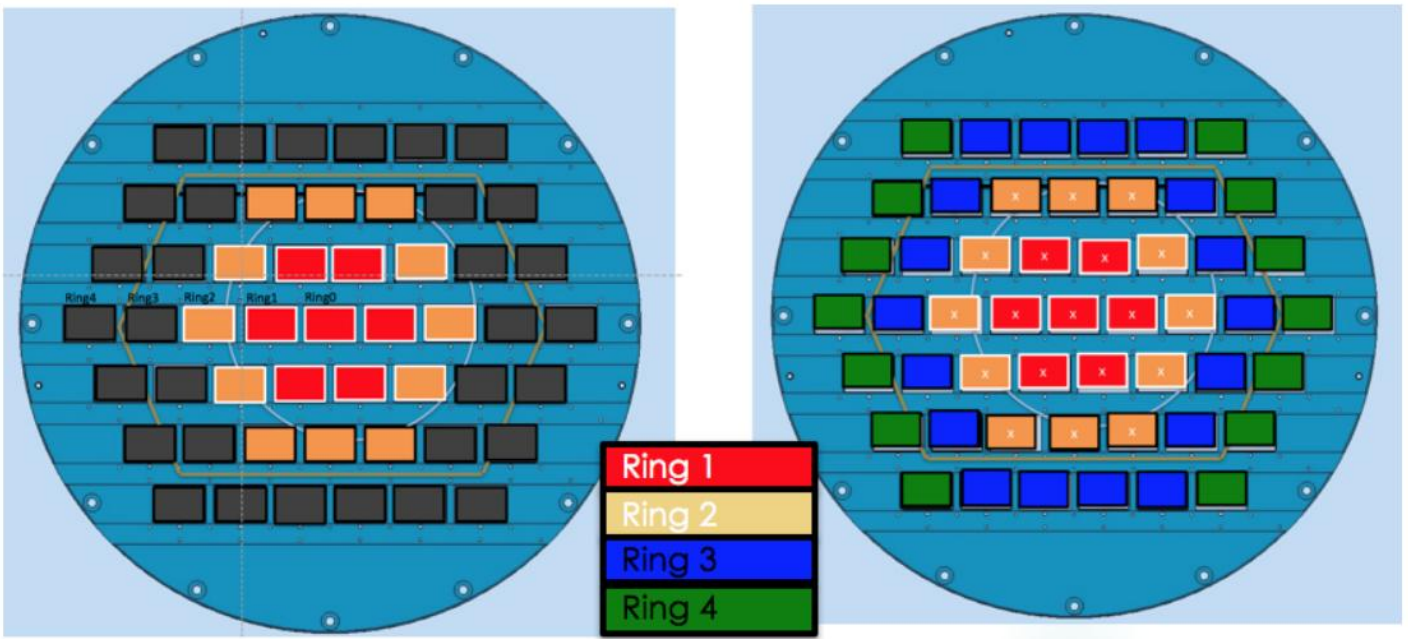
Проведены испытания на электронном пучке в ВТФ (DAΦNE, Фраскати, Италия)

Прототип электромагнитного калориметра Module0 был создан для того, чтобы воссоздать как можно более точно конечную конфигурацию дисков калориметра в первой фазе эксперимента Mu2e

Module0 состоит из 51 кристалла размерами 34x34x200 мм, сигнал с каждого из них считывается одним модулем front-end электроники, состоящим из двух массивов SiPM 2x3 и двух плат FEE v1



# Прототип CsI калориметра Module0. Испытания на электронном пучке. Калибровка каналов



Внутренние кольца калибруем по  
электронам пучка

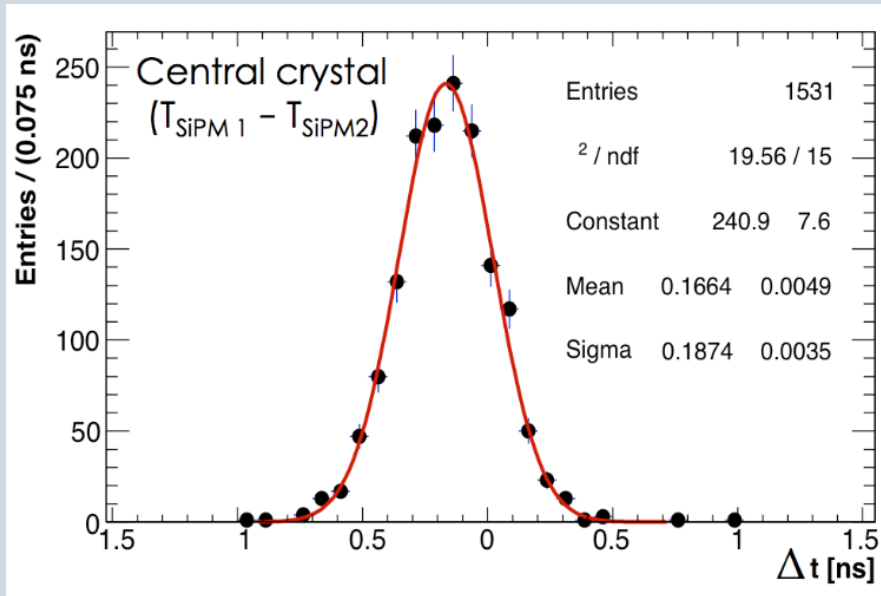
Все каналы – по  
космическому излучению

Для измерения энергии на  
электронном пучке в ВТФ (DAPHNE,  
Фраскати) калибровка выполнялась:

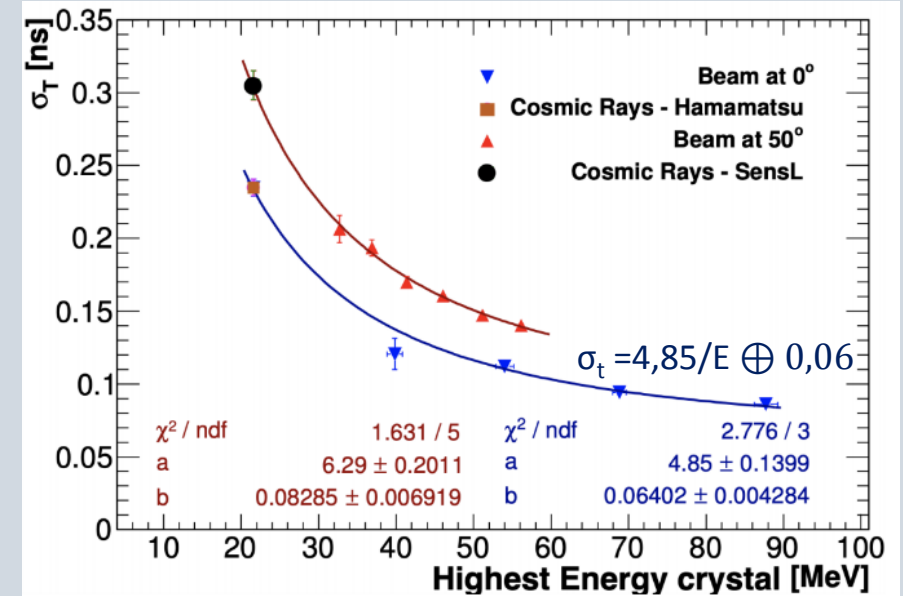
- по значению поглощенной в  
кристалле энергии частиц пучка  
(для двух внутренних колец)
- по энергиям космических частиц

*Два внутренних кольца  
содержат 99% энергии ливня*

# Тестирование FEE электроники и прототипа CsI калориметра Module0. Временное разрешение

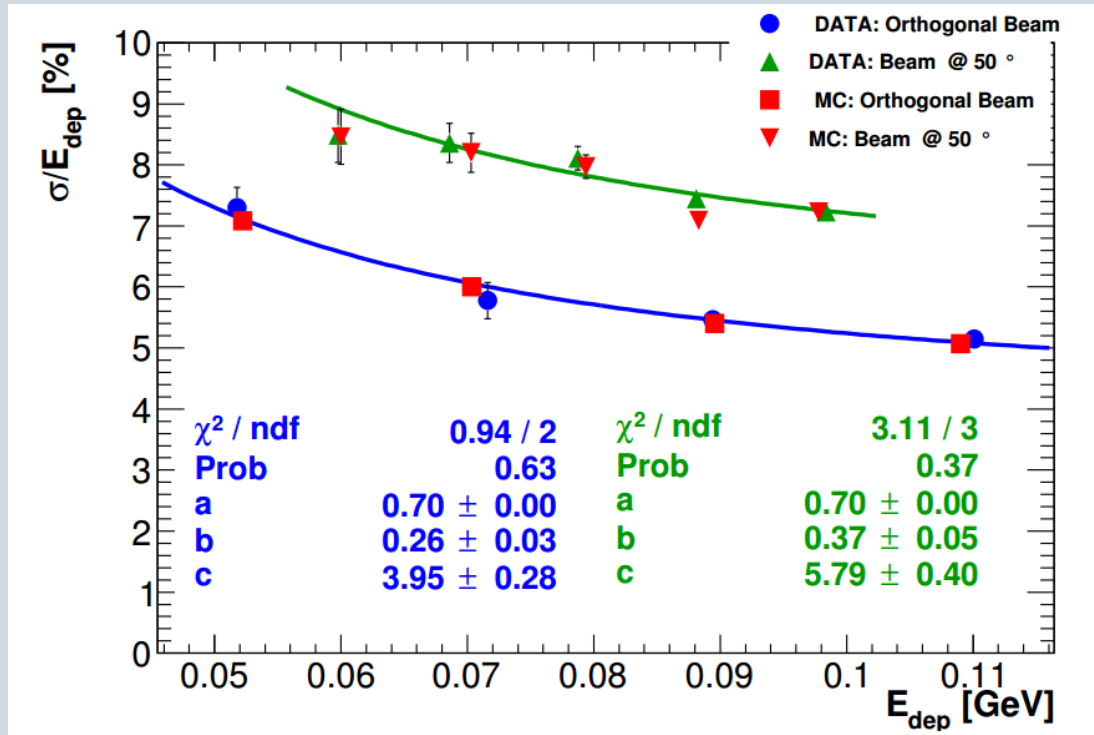


Временное разрешение для ортогонально падающего электронного пучка с энергией около 100 МэВ, измеренное по данным двух фотосенсоров центрального кристалла прототипа калориметра Module0



Временное разрешение прототипа калориметра как функция от энергии для ортогональной конфигурации пучка с дополнительной точкой в районе 22 МГц, построенной по данным от космического излучения

# Тестирование FEE электроники и прототипа CsI калориметра Module0. Энергетическое разрешение



$$\sigma_E/E = 0,7/\sqrt{E} \oplus 0,37/E \oplus 5,79$$

Прототип Module0 был протестирован на электронном пучке с энергией от 60 до 120 МэВ в ВТФ (LNF, Frascati)

Энергетическое разрешение 5.4 % (7.3%) при энергии пучка 100 МэВ для угла падения 0° (50°).

Временное разрешение < 150 пс с одним сенсором.

**Требования эксперимента Mu2e выполняются**

# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для Mu2e-II

---

По данным Монте-Карло моделирования для калориметра Mu2e-II накопленная кристаллами и FE электроникой за три года доза радиации составит:

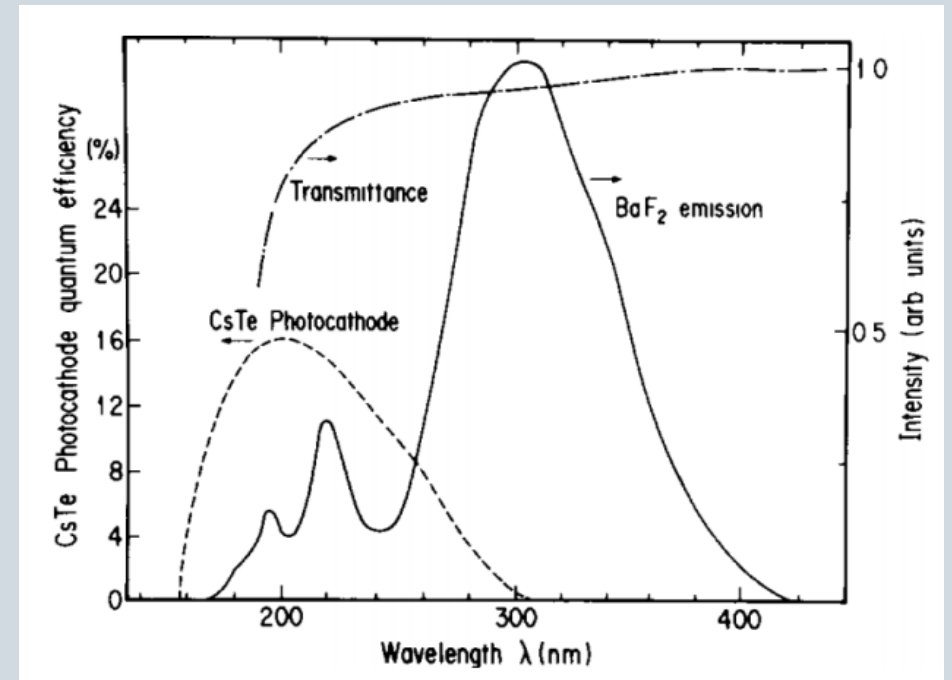
- до 900 кРад во внутренних слоях первого диска; 180 кРад во внешних слоях первого диска;
- до 150 кРад во внутренних слоях второго диска; до 75 кРад во внешних;
- максимальные значения фона для фотосенсоров первого диска до 300 кРад во внутренних слоях, до 75 кРад во внешних.
- суммарный поток нейтронов  $6 \times 10^{13}$ .



Электромагнитный калориметр предполагается сделать из кристаллов  $\text{BaF}_2$ , которые более стойкие к радиационному воздействию, чем используемые в первой фазе эксперимента кристаллы чистого CsI.

# Сравнение свойств сцинтилляционных кристаллов $BaF_2$ и $CsI$

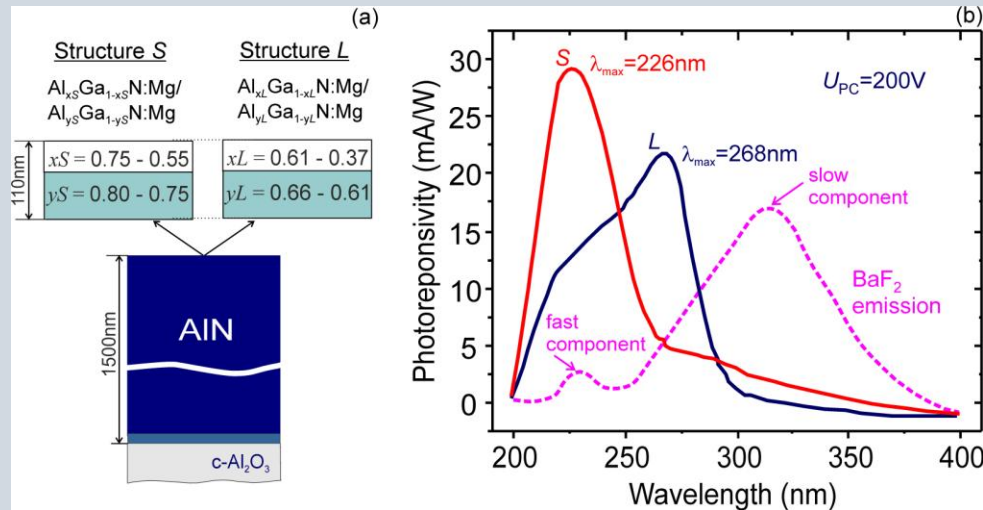
Кристалл	$BaF_2$	$CsI$
Плотность (г/см <sup>3</sup> )	4.89	4.51
Радиационная длина (см) $X_0$	2.03	1.86
Радиус Мольера (см) $R_m$	3.10	3.57
Длина взаимодействия (см)	30.7	39.3
$dE/dx$ (МэВ/см)	6.5	5.56
Показатель преломления $\lambda_{max}$	1.50	1.95
Пик люминесценции (нм)	220, 300	310
Время затухания $\tau$ (нс)	0.9, 650	26
Световыход ( по сравнению с $NaI(Tl)$ ) (%)	4.1, 36	3.6
Зависимость световыхода от температуры (% / °C)	0.1, -1.9	-1.4
Гигроскопичность	Нет	Небольшая



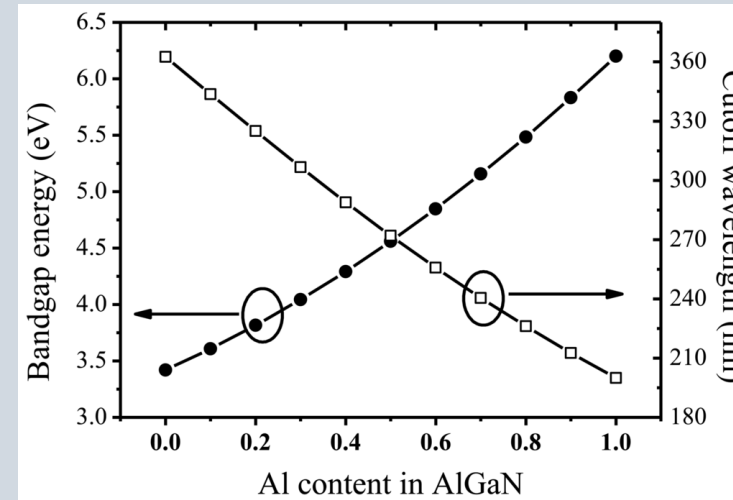
Спектр излучения кристаллов  $BaF_2$ : **высокий уровень медленной компоненты, быстрая компонента находится в UVC диапазоне => нужен специальный детектор**



# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для $\text{Mu}2e\text{-II}$ . Медленная компонента излучения и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фотодетекторы



Схематический вид гетероструктуры катода и спектры чувствительности двух произведенных фотокатодов с разным содержанием алюминия



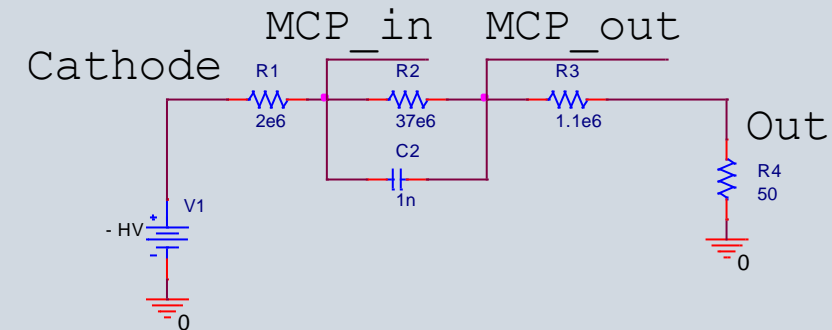
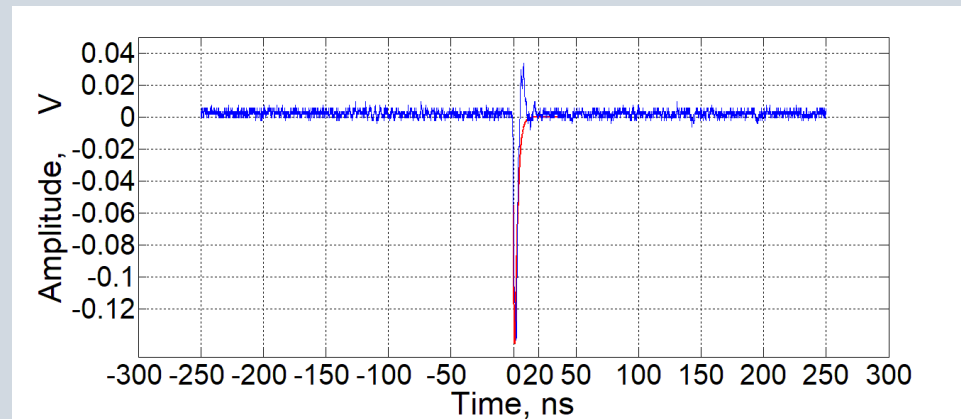
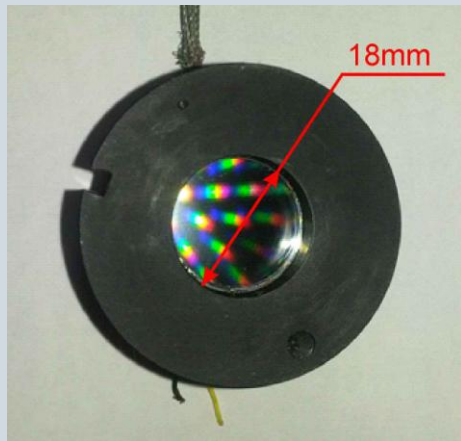
Зависимость длинноволновой границы от массовой доли Al в сплаве  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

Для подавления медленной компоненты излучения в ОИЯИ предложено использовать фотоумножитель на основе  $\text{AlGaIn}$  гетероструктур

Изменяя содержание алюминия в активных слоях возможно изменять ширину запрещенной зоны от 3,5 эВ до 6,1 эВ, что соответствует изменению длинноволновой границы в диапазоне 210-360 нм

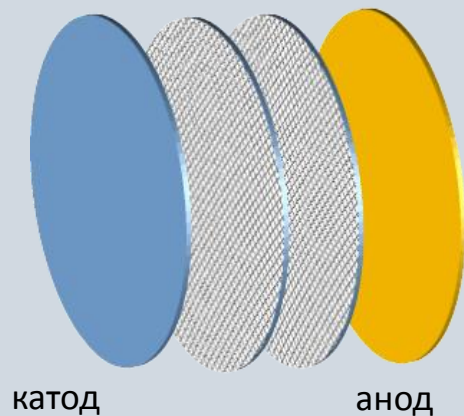
Для изготовления фотокатодов для ФЭУ в ФТИ имени Иоффе (Россия, Санкт-Петербург) с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПА МПЭ) были выращены две  $\text{AlGaIn}$  гетероструктуры на подложках с-сапфира с различным содержанием алюминия

# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для $\text{Mu2e-II}$ . ФЭУ с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фотокатодом



Из произведенных гетероструктур были изготовлены фотокатоды диаметром 20 мм (АО «НИИ Полюс», Москва). Из одного такого катода собран на производстве ОАО «Катод» (Новосибирск) и доработан в ЛЯП ОИЯИ (изменена схема подачи напряжения, разработан делитель) фотоумножитель с микроканальными пластинами

# Электромагнитный калориметр из ВаF<sub>2</sub> для Mu2e-II. Микроканальные пластины для ФЭУ с Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N фотокатодом



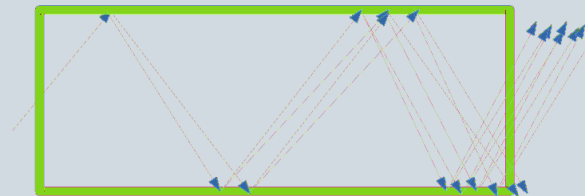
Диаметр микроканалов 30 мкм



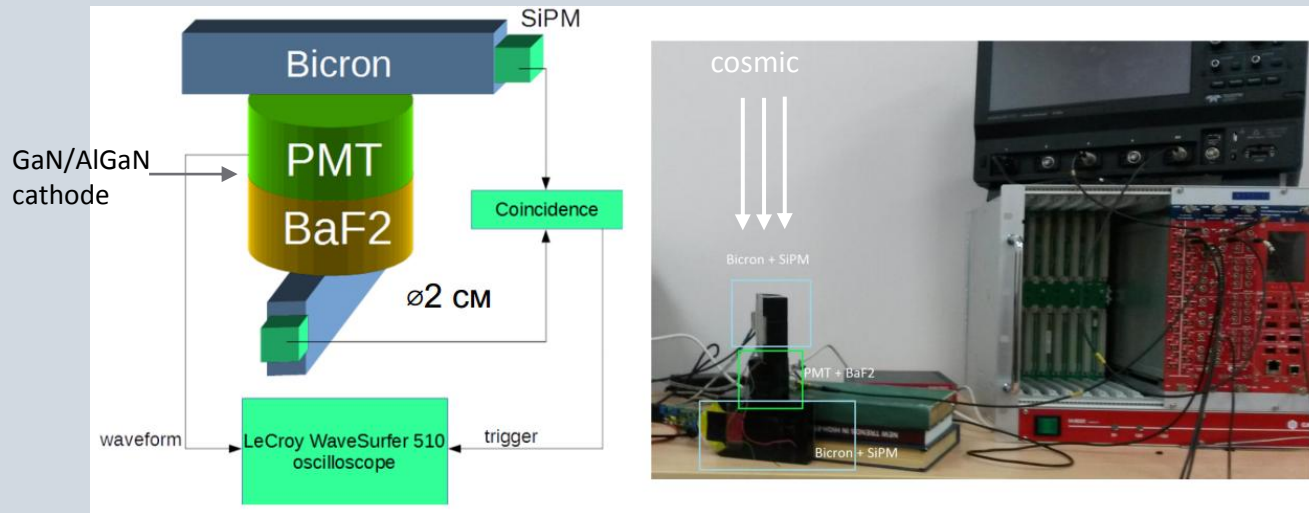
Шевронная конфигурация

усиление до 10<sup>6</sup>

Один канал пластины

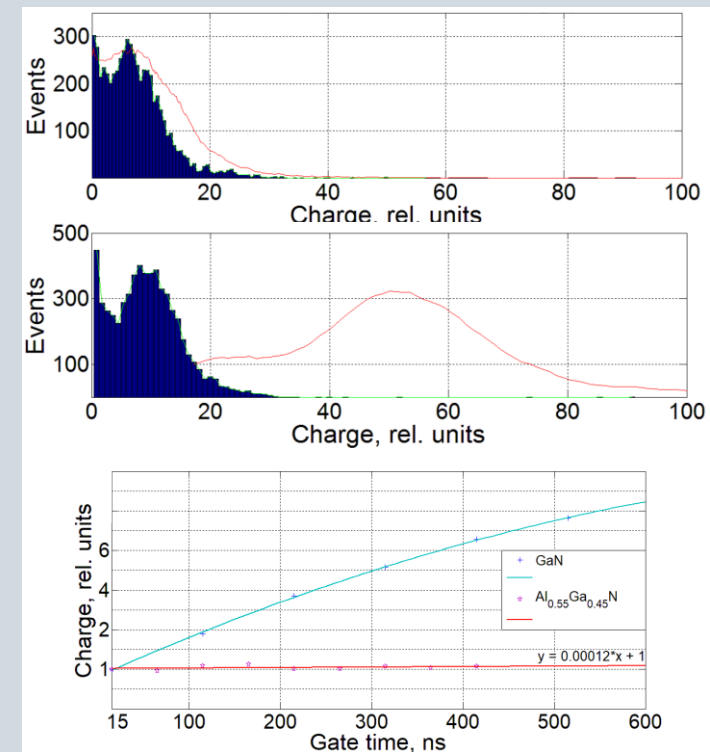


# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для Mu2e-II. ФЭУ с $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фотокатодом



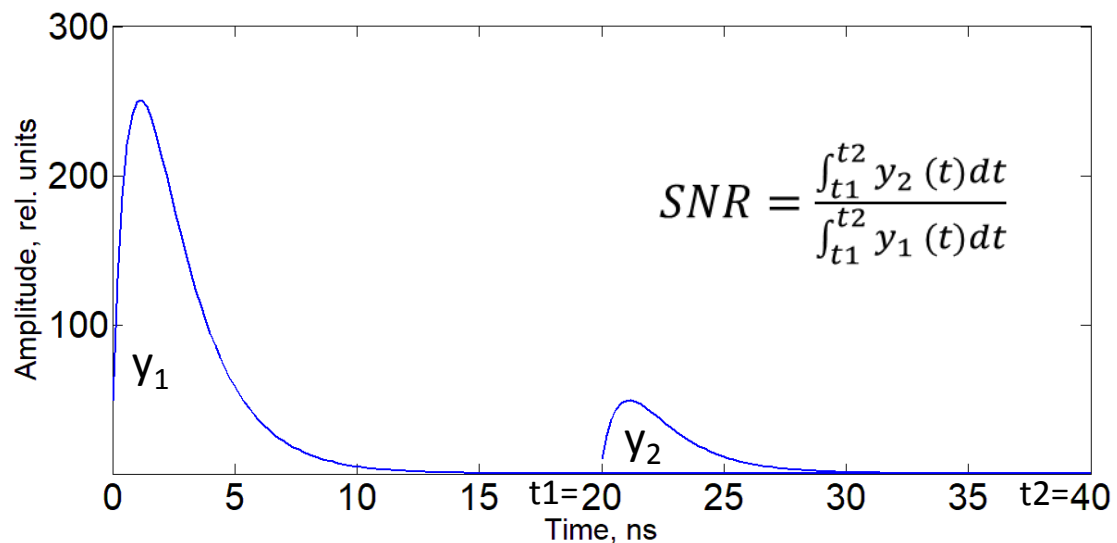
Изменение ворот интегрирования в диапазоне от 15 нс до 500 нс не приводит к значительному сдвигу спектра вправо. Для сравнения был использован канал с GaN ФЭУ УФК-4Г-4 (ОАО «Катод», Новосибирск), имеющим аналогичную конфигурацию

Количественная оценка глубины подавления медленной компоненты – в 60 раз.

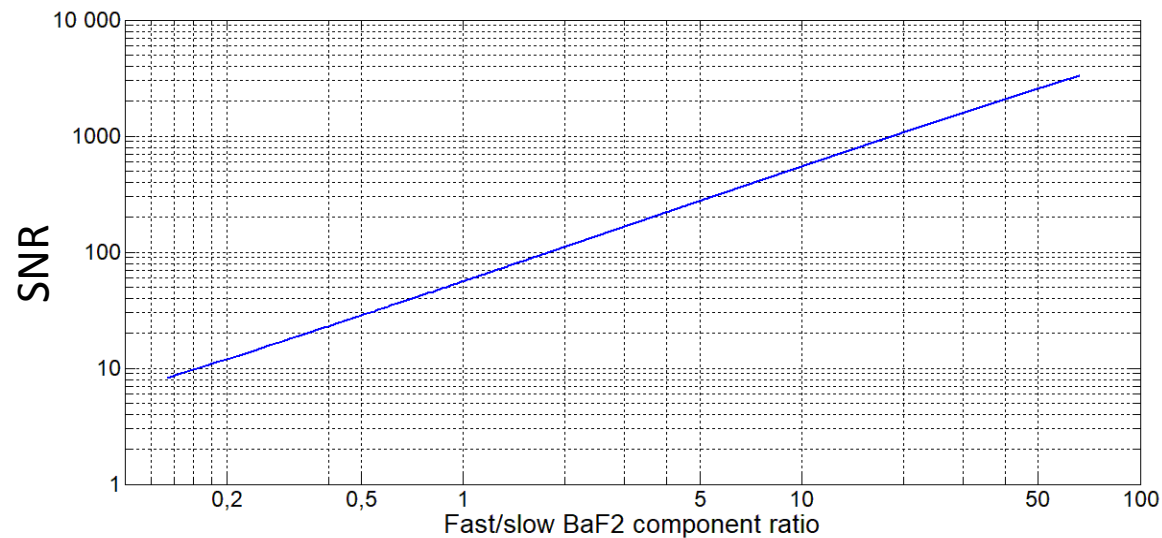


# Электромагнитный калориметр из BaF<sub>2</sub> для Mu2e-II. ФЭУ с Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N фотокатодом. Модель сигнала, оценка необходимой глубины подавления

Чем лучше мы подавляем медленную компоненту, тем меньше «шумовая» полка и выше SNR



$$SNR = \frac{\int_{t_1}^{t_2} y_2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} y_1(t) dt}$$



Для ширины полосы пропускания  
 $f_0 = 80$  МГц

и

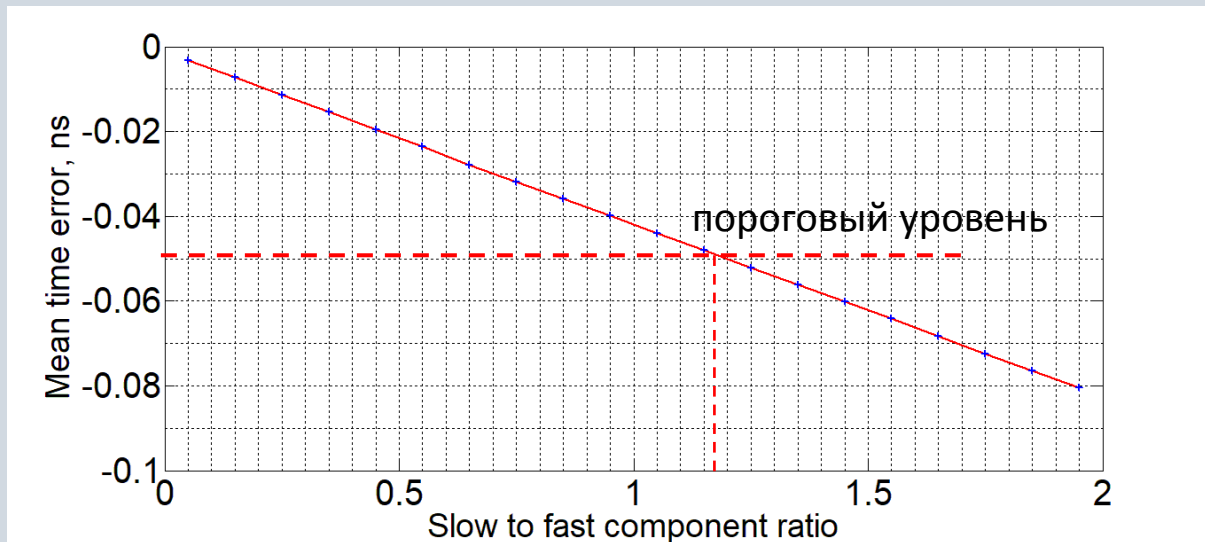
$$\begin{cases} J(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_{fast}}} + Be^{-\frac{t}{\tau_{slow}}}, \\ y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) J(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} a_0 e^{-2\pi f_0 \tau} \left( Ae^{-\frac{t-\tau}{\tau_{fast}}} + Be^{-\frac{t-\tau}{\tau_{slow}}} \right) d\tau; \end{cases}$$

$f_0$  – shaper bandwidth

$$Q = Q_{signal} + Q_{noise} \sim \int_{t_1}^{t_2} [J_1(t) + J_{1\_noise}(t)] dt \sim \int_{t_1}^{t_2} y(t) dt$$



# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для Mu2e-II. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фотодетекторы. Модель сигнала, оценка необходимой глубины подавления

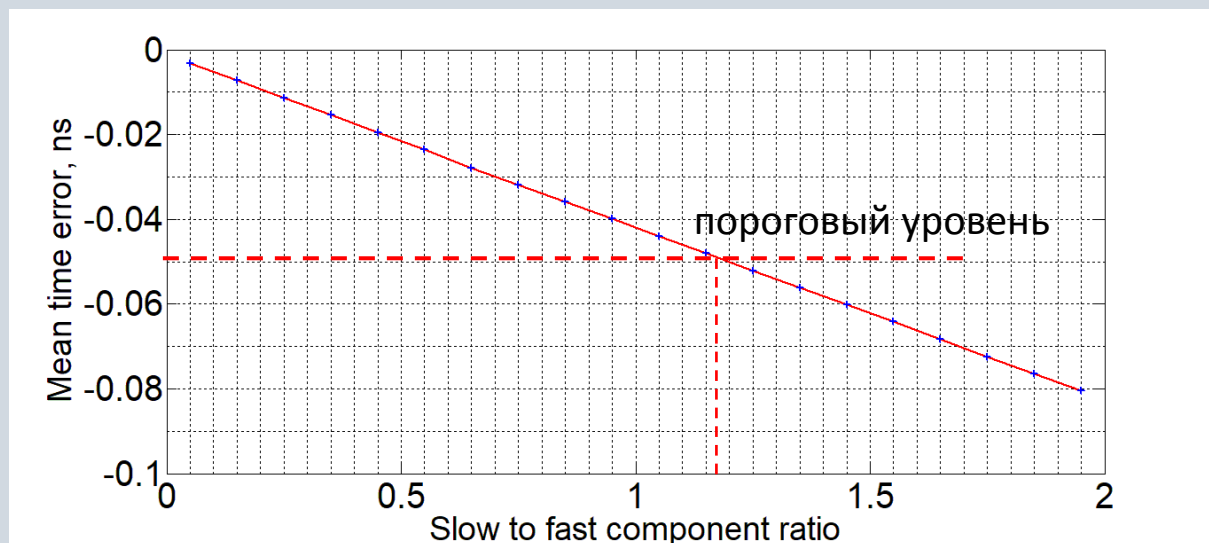


для полосы пропускания  $f_0 = 80$  MHz

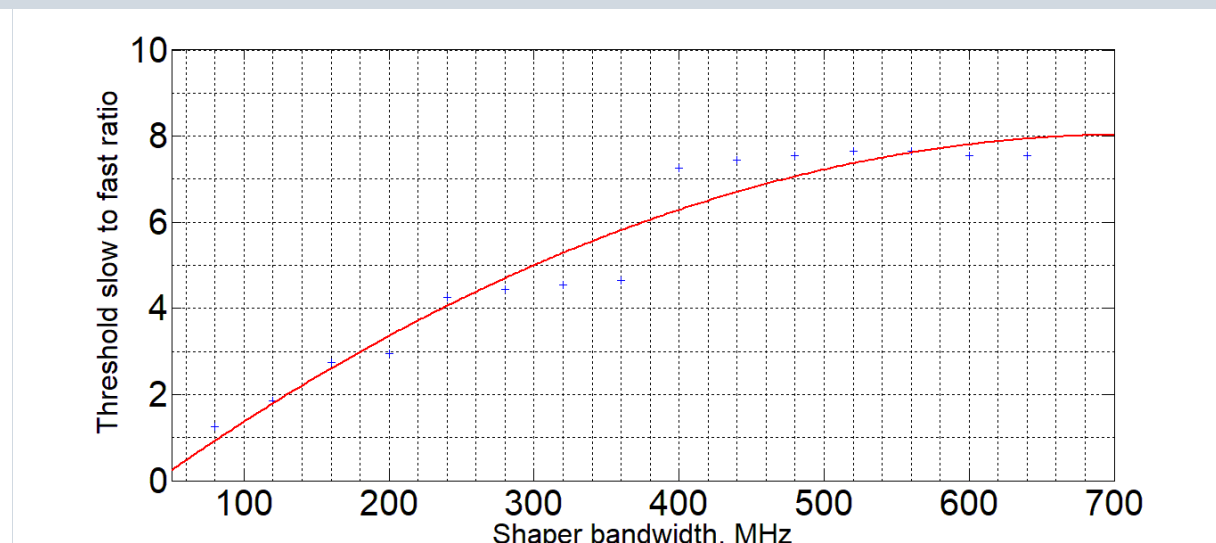
Для заданной полосы пропускания детектора оценим глубину подавления медленной компоненты, дающий ошибку определения временной метки 50 пс («пороговый уровень»), 10% от требования к временному разрешению электромагнитного калориметра Mu2e

Для определения временной метки используем следящий порог на отметке 5% от высоты импульса

# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для Mu2e-II. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фотодетекторы. Модель сигнала, оценка необходимой глубины подавления



для полосы пропускания  $f_0 = 80$  MHz



При увеличении полосы пропускания детектора  $f_0$  можно получить тот же результат при большем остаточном уровне медленной компоненты излучения  $\text{BaF}_2$ , т.к. SNR остается прежним => **можно использовать детектор с длинноволновой границей 280-290 нм, но при этом емкость детектора должна быть ниже**

Соотношение медленной компоненты к быстрой равно 1 для CsTe фотокатодов соответствует пороговой длине волны 300 нм (см М. Kobayashi et al., Nucl. Instrum. Meth. A, **270**, 106 (1988))

# Электромагнитный калориметр из $\text{BaF}_2$ для Mu2e-II. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ фотодетекторы. Выводы

---

- Используя фотокатод из AlGaN соединений с массовой долей алюминия до 0,8 в слоях p-типа удалось создать опытный образец ФЭУ, имеющий длинноволновую границу на уровне 260 нм, который подходит для эффективной регистрации быстрой компоненты эмиссии сцинтилляционного кристалла  $\text{BaF}_2$  и существенного подавления медленной.
- На основе данных, полученных при наблюдении космического излучения, показано, что эффективность подавления медленной компоненты возрастает при увеличении массовой доли содержания алюминия в верхних слоях гетероструктуры фотокатода, и можно достичь уровня ее подавления в 60 раз.
- Используя модель сигнала канала детектора с сцинтилляционным кристаллом  $\text{BaF}_2$ , описанную на языке Matlab, оценены оптимальные значения эффективности подавления медленной компоненты излучения фотодетектором для различных значений ширины полосы пропуска, обеспечивающие выполнение требований эксперимента Mu2e по энергетическому и временному разрешению.

# Заключение

---

- Разработана схема радиационно-стойкого предусилителя с двухплечевым входным каскадом на биполярных транзисторах и схема линейного регулятора, задающего напряжение смещения матрицы фотосенсоров в постоянном магнитном поле до 1 Тл для первой фазы эксперимента Mu2e. Параметры схемы проверены при помощи PSpice моделирования и в лабораторных измерениях.
- На основе данной схемы реализована опытная партия устройств, успешно прошедших серию испытаний на радиационную стойкость при воздействии ионизирующим излучением и потоком нейтронов, испытания в вакуумной камере. Разработанные платы front-end электроники прошли комиссию Construction Readiness Review (CRR) и рекомендованы коллаборацией для применения в установке электромагнитного калориметра эксперимента Mu2e.
- Проведено успешное испытание front-end электроники в тестовом сеансе многоканального прототипа Module0 электромагнитного калориметра на электронном пучке в LNF (INFN, Фраскати, Италия), в котором достигнуты требуемые значения временного (менее 500 пс) и энергетического ( $\sigma E/E < 10\%$  при  $E \approx 100$  МэВ) разрешений.
- В результате проведенных нами расчетов и исследований образцов гетероструктуры AlGaIn, по нашему техническому заданию, создан опытный образец фотоумножителя с микроканальными пластинами и AlGaIn-фотокатодом, имеющий длинноволновую границу на уровне 260 нм.
- Проведено моделирование сигнала калориметра на кристаллах BaF<sub>2</sub> с учетом частотной характеристики фотодетектора, определяемой емкостью фотодетектора и делителем. Получены оптимальные значения полосы пропускания для разных значений уровня

# Публикации

---

1. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., "The Mu2e Calorimeter Final Technical Design Report", arXiv:1802.06341 [physics.ins-det], Feb. 2018.
2. N. Atanov, V. Baranov, F. Colao et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 812, 104(2016), doi:10.1016/j.nima.2015.12.055.
3. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., "Electron beam test of the large area Mu2e calorimeter prototype", J. Phys.: Conf. Ser. 1162 012027 (2018), doi: 10.1088/1742-6596/1162/1/012027.
4. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., "The Mu2e undoped CsI crystal calorimeter", JINST 13, C02037 (2018), doi: 10.1088/1748-0221/13/02/C02037.
5. N. Atanov, J. Budagov, F. Cervelli et al., "The Mu2e crystal calorimeter", JINST 12, P09017 (2018), doi: 10.1088/1748-0221/12/09/P09017.
6. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., "Design and status of the Mu2e electromagnetic calorimeter", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 824, 695(2016), doi: 10.1016/j.nima.2015.09.074
7. N. V. Atanov, Yu. I. Davydov, V. V. Glagolev et al., "A Photomultiplier with an AlGaIn Photocathode and Microchannel Plates for BaF2 Scintillator Detectors in Particle Physics", Trans. on Nucl. Sc., 2020, vol.67, no.7, pp. 1760-1764, Jul. 2020, doi: 10.1109/TNS.2020.2998433.
8. N. Atanov, S. Bini, G. Corradi, S. Ceravolo, R. Donghia, "Paschen curve for a PCB trace in low vacuum", arXiv:2010.06570 [physics.ins-det], Oct. 2020.
9. N. Atanov, V. Baranov, C. Bloise et al., "Construction status of the Mu2e crystal calorimeter", Journ. Inst., vol.15, no.9, C09035, Sept. 2020, DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09035.



# Апробация результатов

---

Результаты были представлены на следующих семинарах/международных конференциях:

1. Результаты исследований многократно докладывались на совещаниях рабочей группы по электромагнитному калориметру коллаборации Mu2e, 2014-2020 (Дубна, Россия и Фраскати, Италия).
2. Mu2e-II Workshop at Northwestern University, 29-30 августа, 2018 (Northwestern University, Эванстон, США). MCP devices with AlGaN photocathodes for BaF<sub>2</sub> fast component detection.
3. Mu2e Calorimeter Front-End Electronics Construction Readiness Review, 18 ноября, 2019 (Fermilab, Батавия, США).
4. Snowmass 2021 Mu2e-II Workshop, 22 сентября 2020, Zoom Meeting. AlGaN photocathodes and Schottky diode for BaF<sub>2</sub> scintillator detectors.
5. IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC), 26 октября – 2 ноября, 2019, Манчестер, Великобритания. PMT with AlGaN photocathodes and MCP for BaF<sub>2</sub> scintillator detectors in particle physics.
6. New Trends in High Energy Physics (NTIHEP), 2-8 октября, 2016 (Будва, Черногория). Solar-blind photodetectors with AlGaN photocathodes for light registration in UVC range.
7. New Trends in High Energy Physics (NTIHEP), 24-30 сентября, 2018 (Будва, Черногория). The front-end electronics of the Mu2e electromagnetic calorimeter.
8. Общелабораторный семинар ЛЯП, 26 апреля, 2019 (ОИЯИ, Дубна). ФЭУ с AlGaN фотокатодом и МКП для сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BaF<sub>2</sub>.
9. XXV Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 24-26 мая, 2018 (Москва, Россия). Фотопреобразователи УФ диапазона на основе эпитаксиальных структур AlGaN.

# Основные положения, выносимые на защиту

---

Архитектура предусилителя и линейного регулятора в электромагнитном калориметре для первой фазы эксперимента Mu2e.

Результаты тестирования прототипа электромагнитного калориметра Module0 на электронном пучке.

Методика расчета напряжения пробоя в вакууме для сложной конфигурации проводников в платах front-end электроники и результаты эксперимента по его измерению для плат front-end электроники.

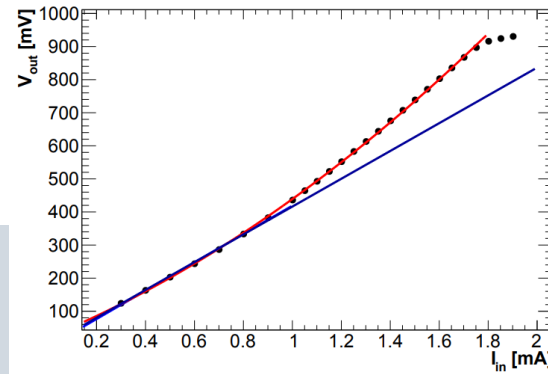
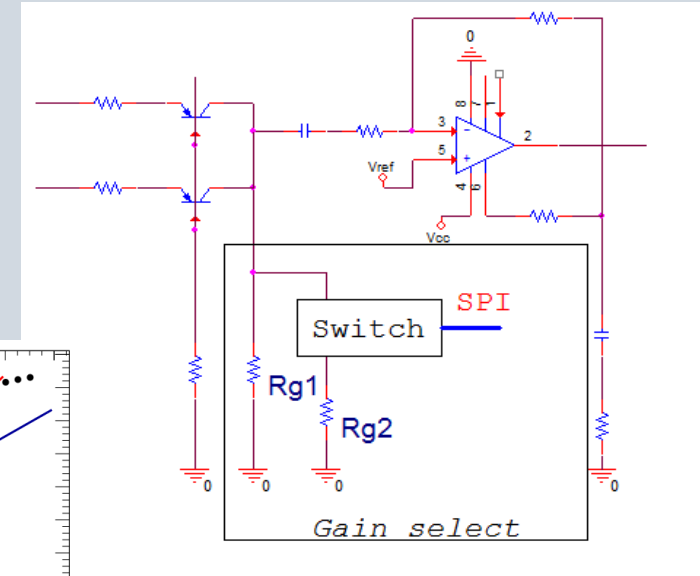
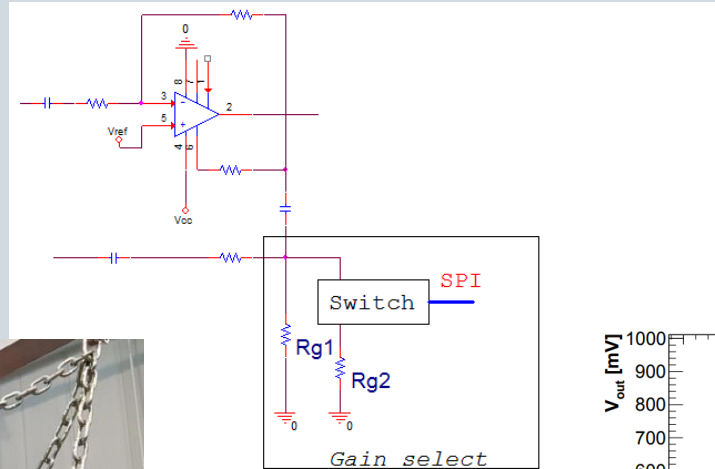
Использование фотоэлектронного умножителя с микроканальными пластинами и AlGaN фотокатодом в качестве возможного варианта фотодетектора для электромагнитного калориметра на кристаллах BaF<sub>2</sub> во второй фазе эксперимента Mu2e.

Математическая модель и результаты измерения эффективности сцинтилляционного детектора с ФЭУ с AlGaN фотокатодом и кристаллом BaF<sub>2</sub>.

---

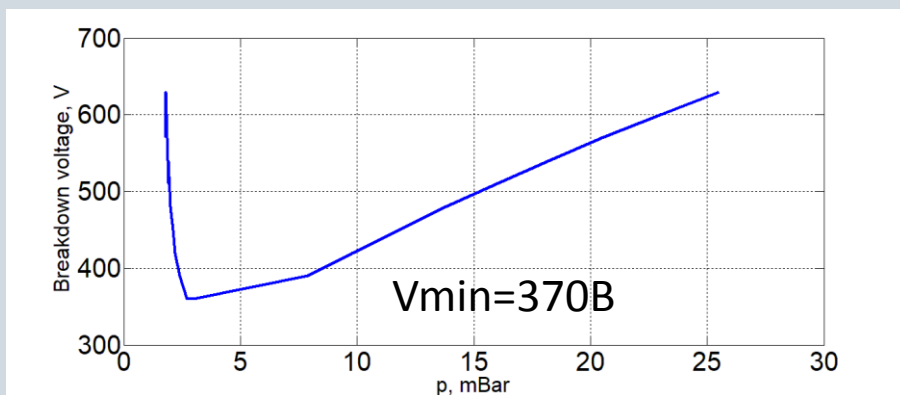
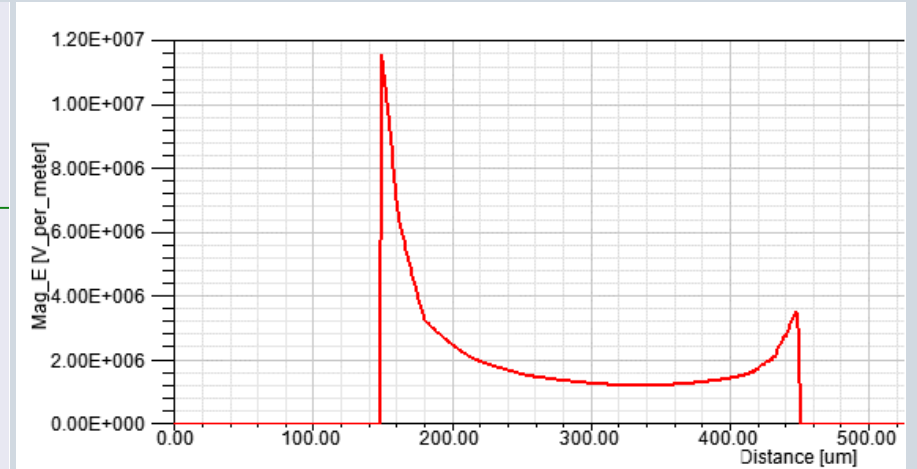
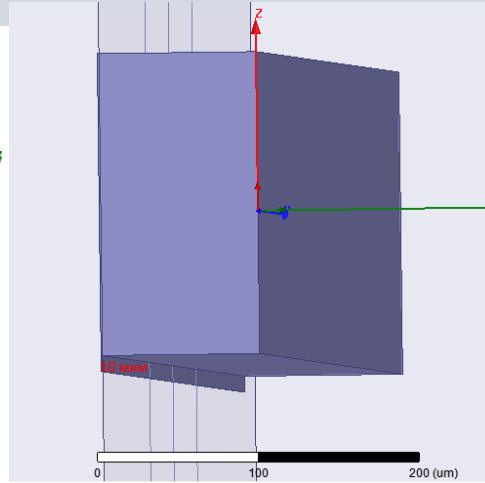
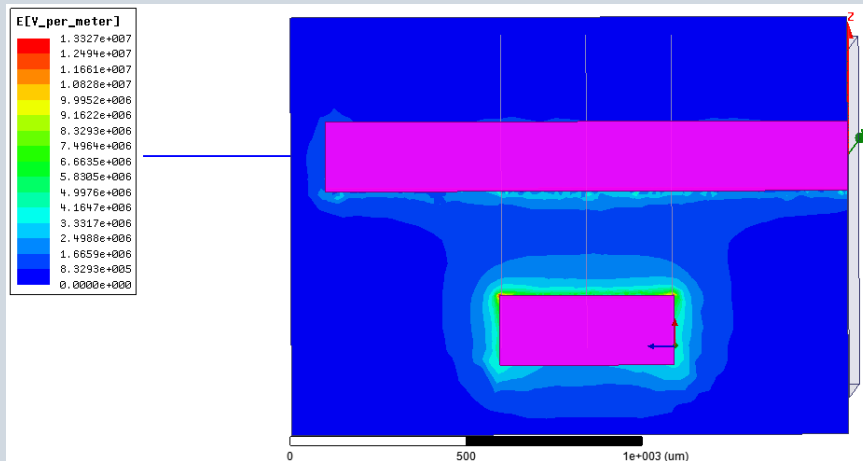
Спасибо за внимание !

# Изменения в схему после лабораторной проверки. Схема выбора коэффициента усиления и её влияние на линейность отклика



- Во второй и последующих версиях плат ФЕЕ механизм выбора коэффициента перенесен на вход усилительного каскада, т.к. в этом случае не возникает нелинейности отклика усилителя, выявленного во время проведения тестирования на электронном пучке (ВТФ, Фраскати, Италия) с энергией электронов до 120 МэВ

# Эффект Пашена для неоднородного поля. Моделирование\*



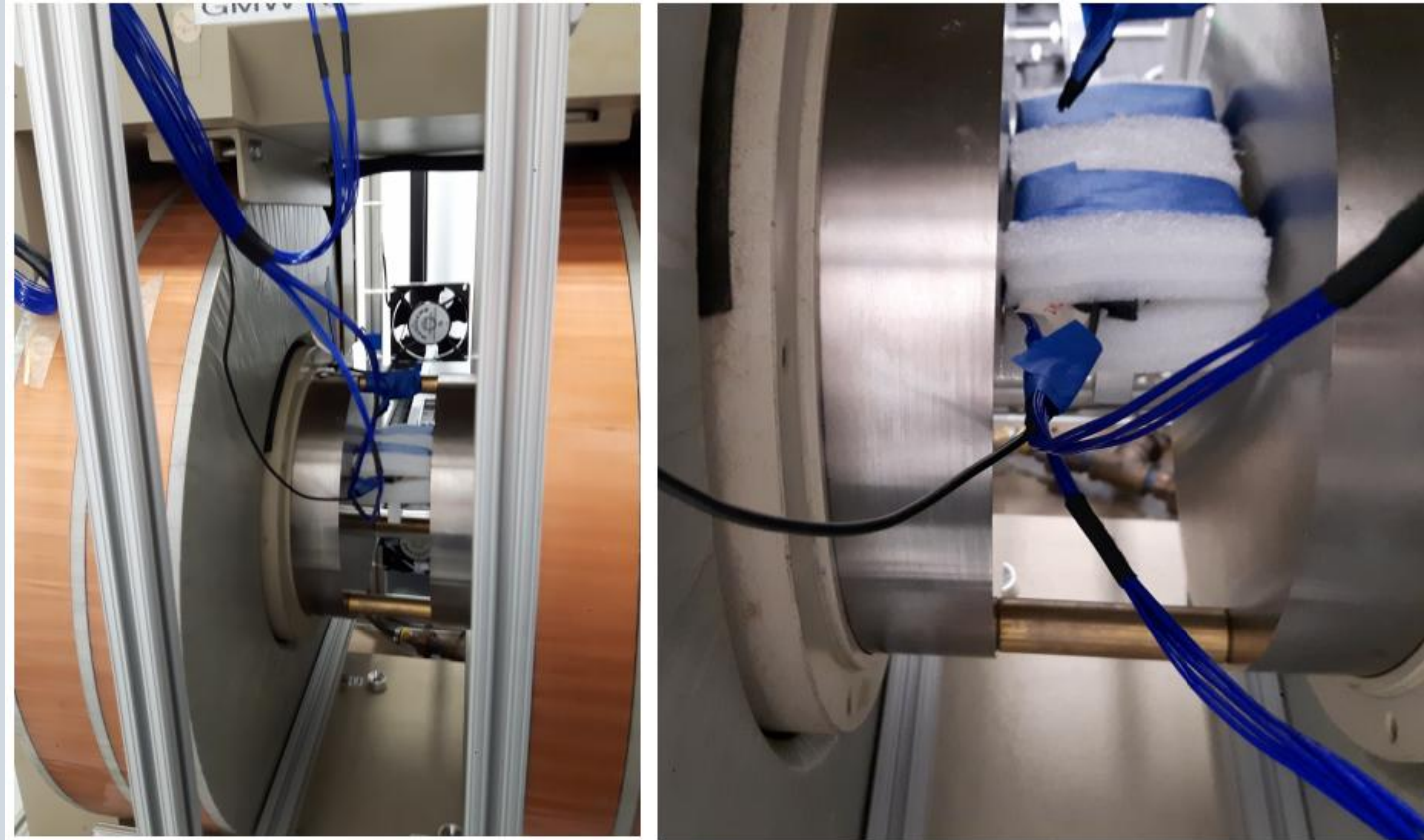
Результат моделирования зависимости напряжения от давления для модуля напряженности электрического поля вблизи двух проводников с прямоугольной кромкой размером 10 мкм, рассчитаного в Ansys.

\* не входит в диссертацию

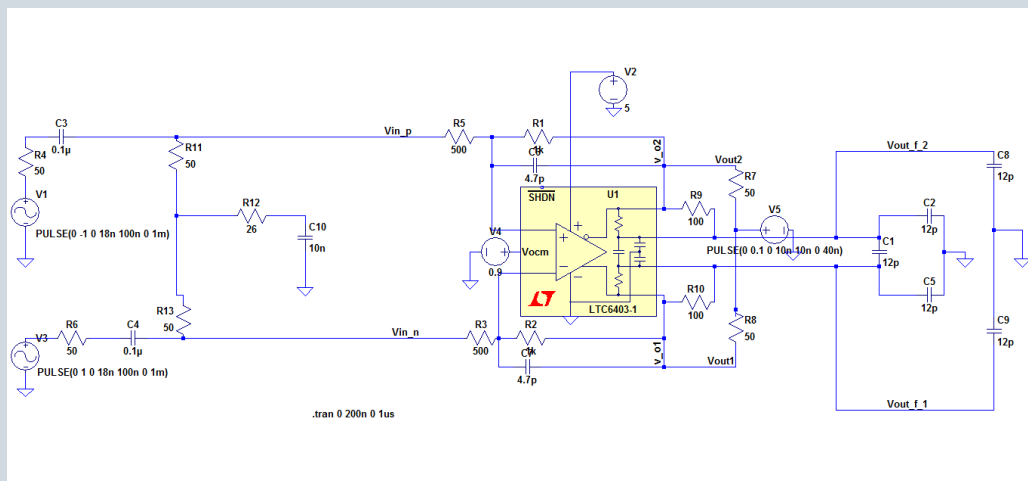


# Тестирование FEE электроники в постоянном аксиальном магнитном поле до 1 Тл

---



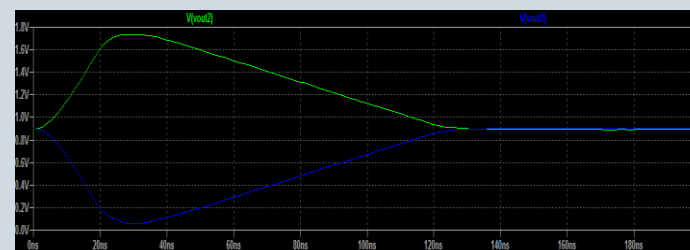
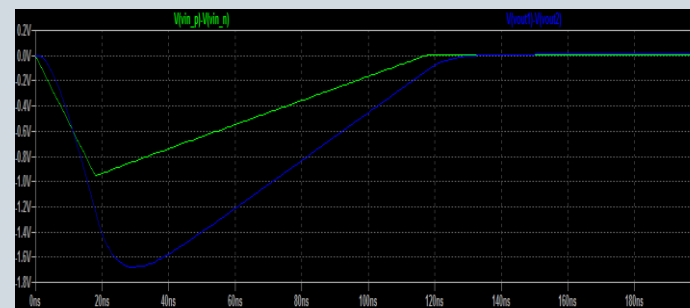
# Схема входного каскада дигитайзера



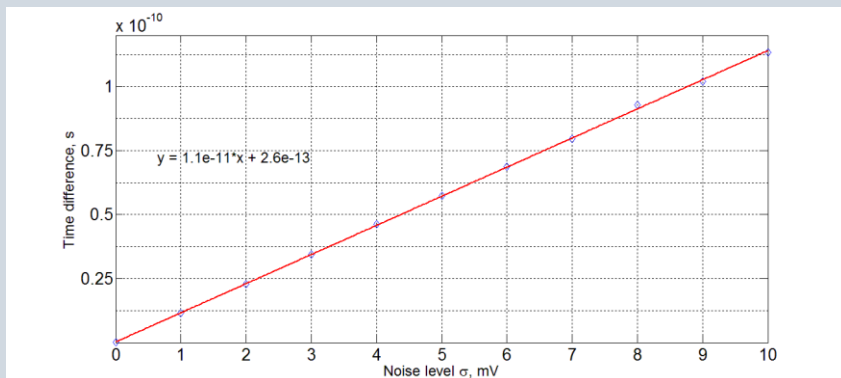
Усилитель с обратной связью входного каскада дигитайзера

Чтобы минимизировать шумы при оцифровке на АЦП, необходимо выполнить коррекцию постоянной составляющей, амплитуды и формы сигналов, пришедших с предусилителя через плату концентратора и передающую линию.

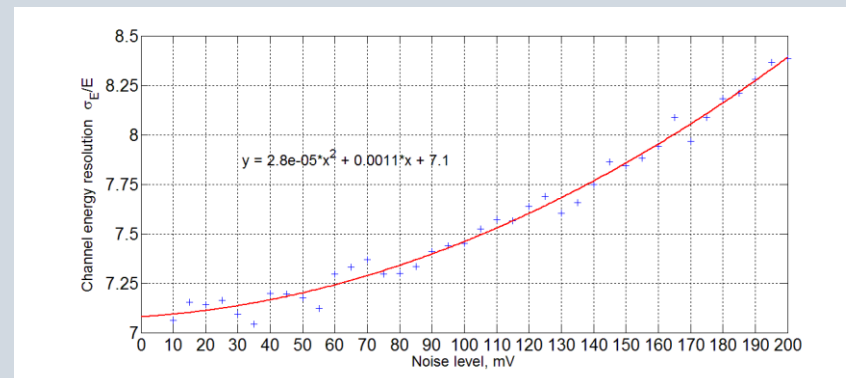
Удлиняется передний фронт сигнала: с 18 нс на входе до 25 нс на выходе,



## Моделирование влияния уровня шумов на энергетическое и временное разрешение



Для временного разрешения зависимость порогового значения уровня гауссова белого шума от энергии, рассчитанной в канале

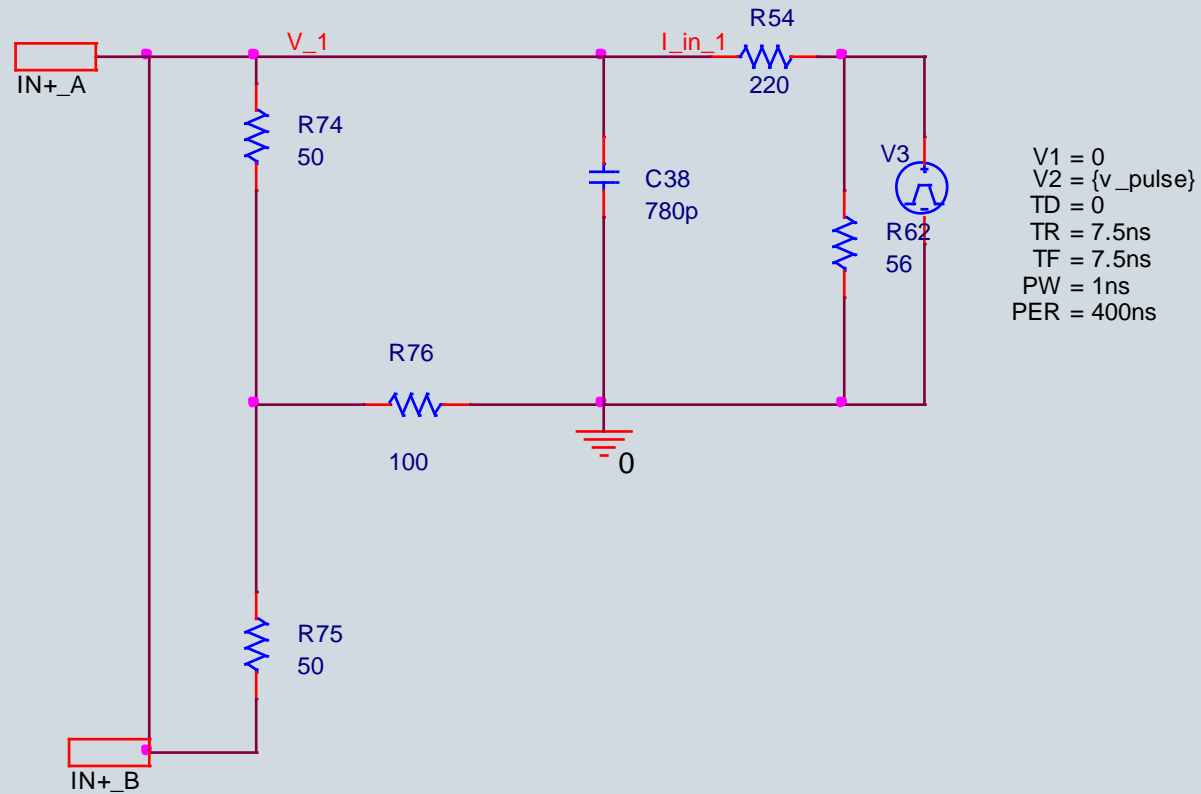


Изменение полного энергетического разрешения при увеличении аддитивного гауссова белого шума в канале для энергии частиц 100 МэВ

Для энергетического разрешения определяем пороговое значение вклада шума как 0,1 доли от второго члена в уравнении для определения энергетического разрешения  
Критерием для определения момента времени по импульсу служит превышение адаптивного порога 5% от высоты импульса

Для соблюдения требования по величине энергетического разрешения максимальный его уровень не должен превышать 80 мВ, что определяется разрешением в районе энергий 10 МэВ. Временное разрешение оказывается более чувствительным к амплитуде шума: максимальное возможное значение находится в диапазоне около 1-5 мВ при энергиях 20-100 МэВ.

# Схема подачи эталонного импульса



# Пример расчета каскадов предусилителя на примере входного каскада

---

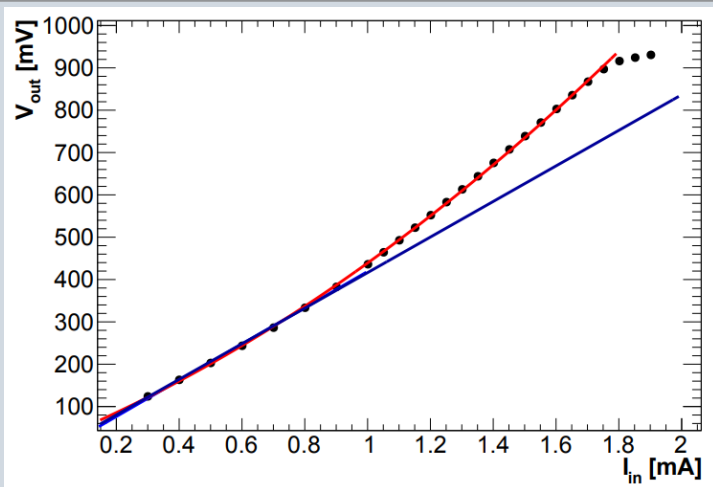
Изменяя номиналы в частотно-зависимой ОС относительно текущих значений, можно осуществлять тонкую подстройку функции передачи, имеющей большой порядок.

$$K = \frac{1}{(As^2 + Bs + C)(1 - \frac{\tau_2 s}{(As^2 + Bs + C)(1 + \tau_3 s)})} = \frac{1 + \tau_3 s}{s^3(A\tau_3) + s^2(A + B\tau_3) + s(B - \tau_2 + C\tau_3) + C}$$

Для всей партии изготовленных усилителей использование точной подстройки при помощи частотно-зависимой петли обратной связи оказалось необязательно для достижения заданной погрешности восстановления заряда, поэтому было решено не включать ее в последующие версии платы FEE



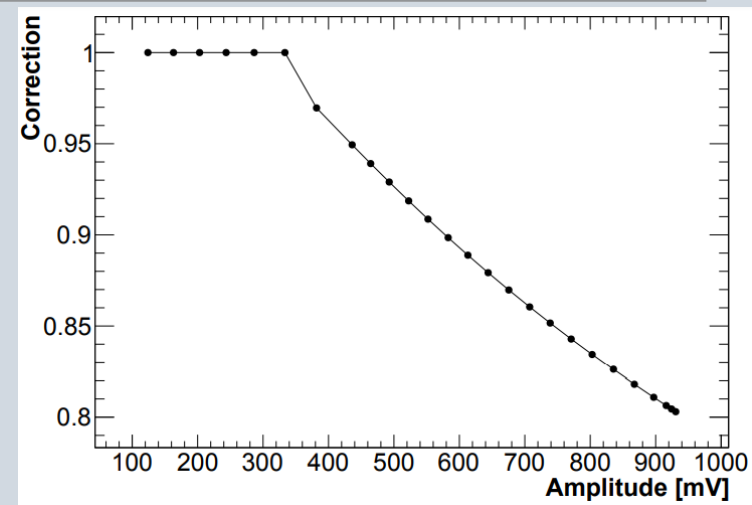
# Тестирование FEE электроники и прототипа CsI калориметра Module0. Калибровки



Нелинейность отклика усилителя для режима удвоенного коэффициента усиления

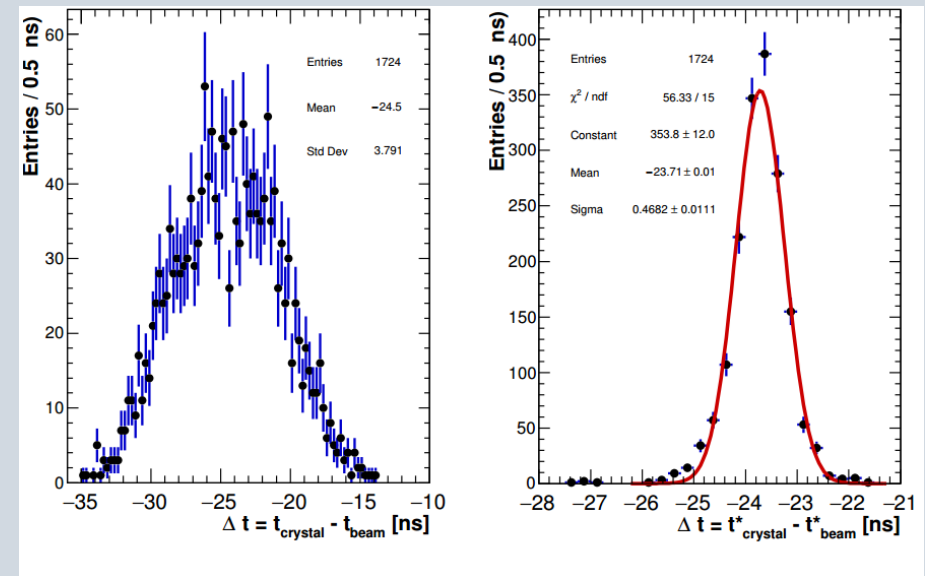
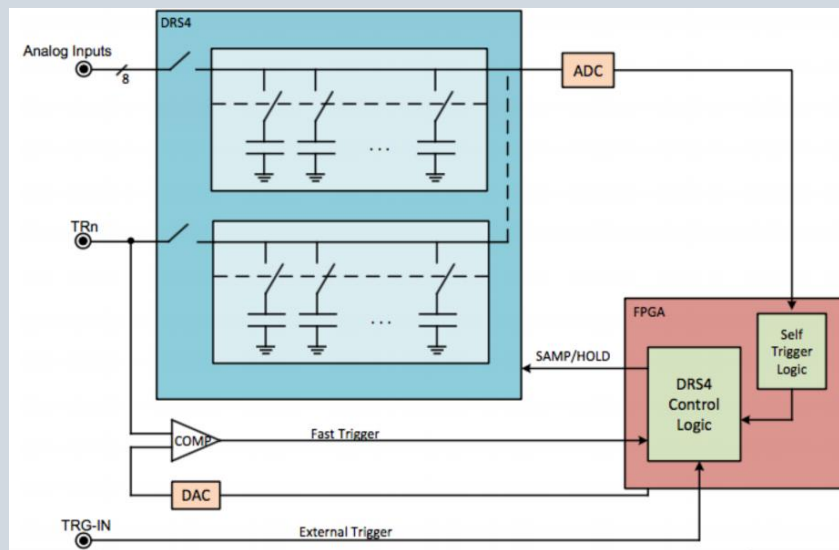
Предварительные результаты анализа данных тестового сеанса на электронном пучке в ВТФ (Frascati, Italy) показали, что в случае работы предусилителей FEE v1 в режиме большего усиления  $G = G_{2x} = 8$  наблюдалось отклонение отклика калориметра от линейного порядка 20%.

Предложено изменить схему выбора коэффициента усиления, а для обработки данных тестового сеанса с Module0, собранных в режиме удвоенного коэффициента усиления  $G=G_{2x}$  ввести корректирующую функцию



$$\begin{cases} Q_i^{corr} = Q_i, & V_i < 400 \text{ mV}, \\ Q_i^{corr} = Q_i \frac{V_i^{theo}}{V_i^{exp}}, & V_i \geq 400 \text{ mV}; \end{cases}$$

# Тестирование FEE электроники и прототипа CsI калориметра Module0. Калибровки



$$t_{crystal}^* = (t_{SiPM-L} - t_{TRG-1-0} + t_{SiPM-R} - t_{TRG-1-0}) / 2,$$

$$t_{beam}^* = (t_{counter1} - t_{TRG-2-4} + t_{counter2} - t_{TRG-2-4}) / 2,$$

Используем триггер:

- пучковый триггер (BT) – основной используемый при анализе данных триггер, создаваемый совпадением сигналов от сцинтилляционных счетчиков, расположенных на пучке;
- лазерный триггер (LT), создаваемый лазерным импульсом, используемым для калибровки каналов;
- триггер, создаваемый совпадением сигналов счетчиков космического излучения (CRT).