



Национальный исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»



Кафедра физики элементарных частиц №40

Выпускная квалификационная работа студента на тему:

# Система для регистрации аннигиляционных гамма-квантов на основе сцинтилляторов GAGG в сочетании с матрицами кремниевых фотоумножителей

Научный руководитель:

Тетерин П. Е.

Научный консультант:

Дубинин Ф. А.

Студентка 2 курса:

Журкина А. О.

г. Москва, 2024

# Введение

Позитронно-эмиссионная томография - эффективный и современный метод диагностики онкологических заболеваний.

В современных ПЭТ-сканерах для регистрации аннигиляционных гамма-квантов от радиофармпрепарата, вводимого пациенту, используются тысячи сцинтилляционных элементов, от размера которых зависит пространственное разрешение и, в конечном итоге, четкость изображения изучаемого органа.

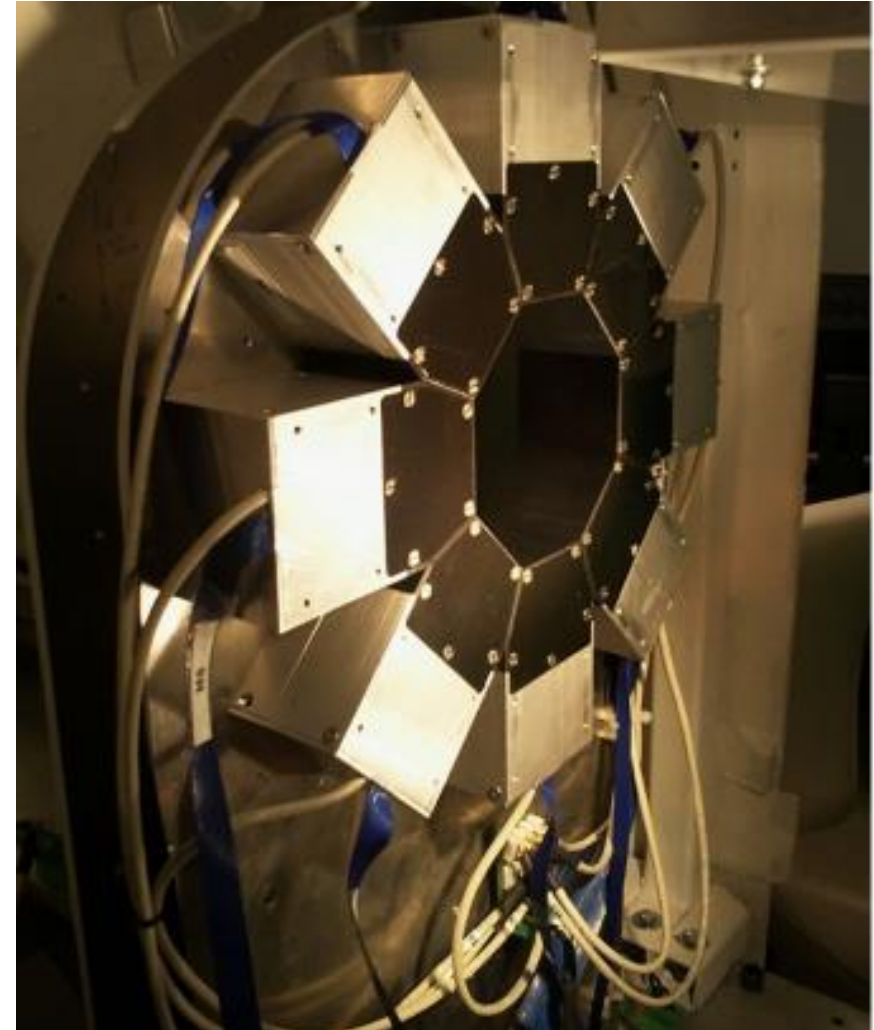


Рисунок 1 – ПЭТ-сканер для исследования внутренних органов маленьких животных

# Применение монокристаллических сцинтилляторов и матриц SiPM в ПЭТ

Альтернативой большому количеству элементов ПЭТ является использование кристаллических пластин (monolithic detectors) с матрицами кремниевых фотоумножителей в качестве фотодетекторов.

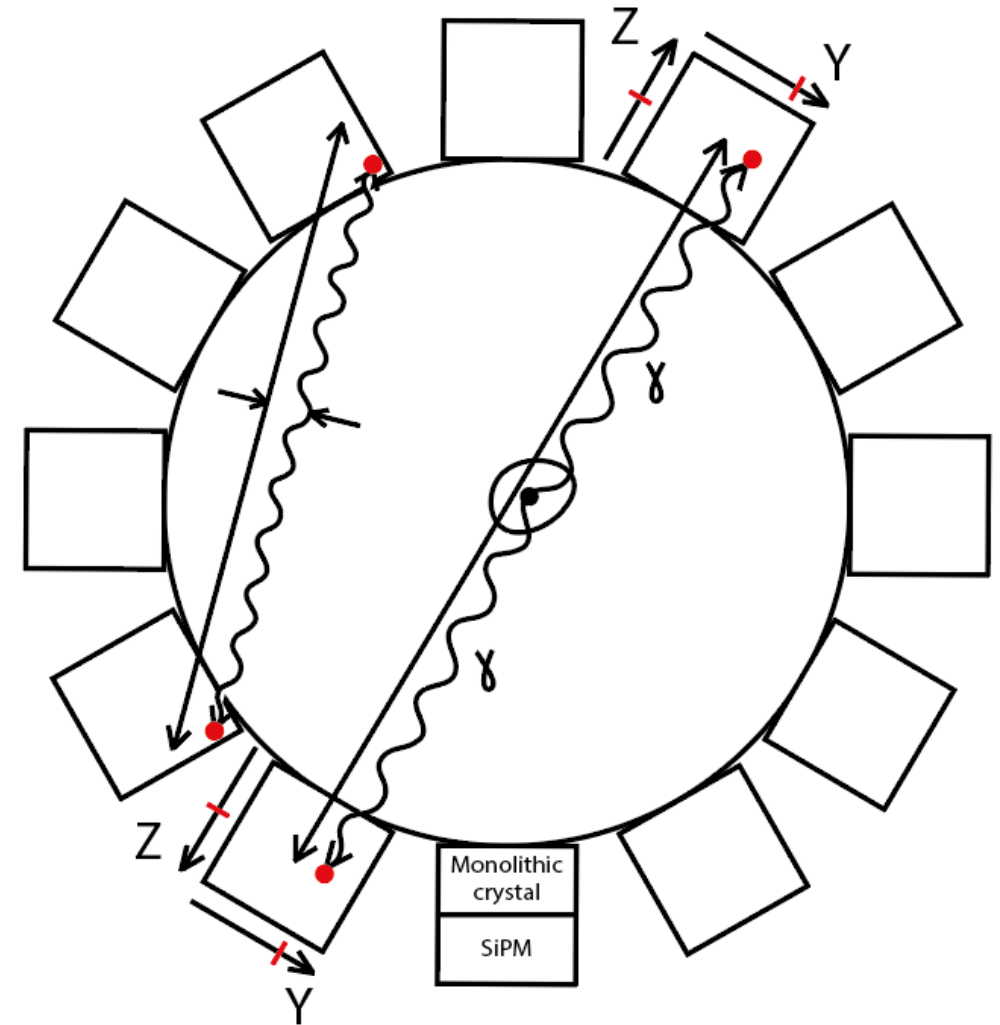


Рисунок 2 – Принципиальная схема ПЭТ

# Цель

- Изучить характеристик позиционно-чувствительных детекторов на основе монокристаллов GAGG и матриц кремниевых фотоэлектронных умножителей

# Поставленные задачи

- Оценить разброс коэффициентов усиления ячеек матриц SiPM
- Разработать алгоритм для определения напряжений пробоя ячеек матриц SiPM
- Оценить энергетическое и временное разрешений детектора
- Разработать алгоритм для восстановления координаты XY-взаимодействия
- Оценить загрузки детектора

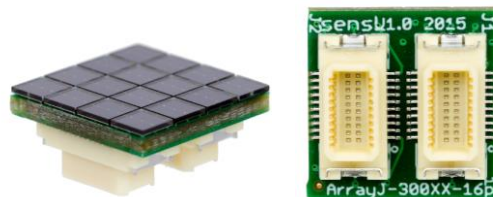
# Исследуемые детекторы

Матрица SiPM SensL  
SPMArray4



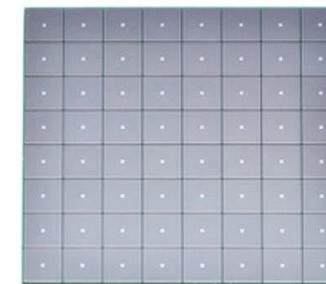
Размерность матрицы: 4 x 4  
Общая эффективная площадь  
матрицы: 13,4 x 13,4 мм

Матрица SiPM Onsemi  
ARRAYJ-30035-16P



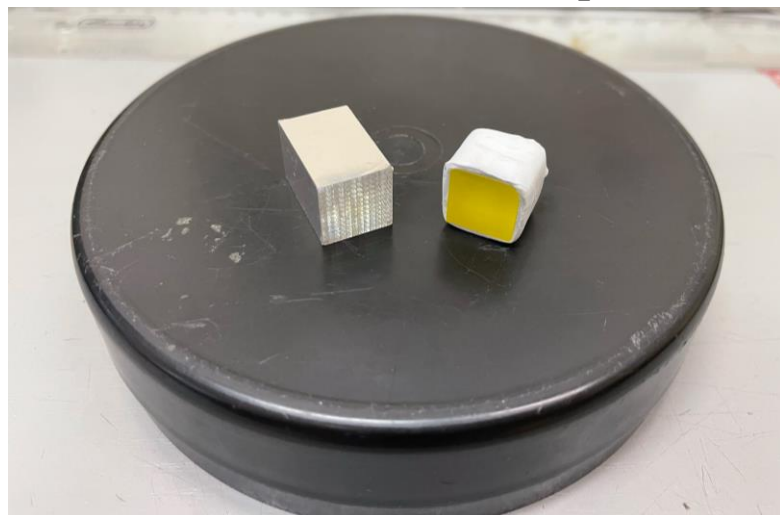
Размерность матрицы: 4 x 4  
Общая эффективная площадь  
матрицы: 12,64 x 12,64 мм

Матрица SiPM Hamamatsu  
S13361-3050AE-08



Размерность матрицы: 8 x 8  
Общая эффективная площадь  
матрицы: 24 x 24 мм

Многопиксельный сцинтиллятор LYSO и  
монолитный сцинтиллятор GAGG



Характеристики сцинтилляторов GAGG и LYSO:

Параметр	GAGG	LYSO
$Z_{эфф}$	51	63
Плотность, г/см <sup>3</sup>	6,6	7,1
Время затухания, нс	30–100	41
Энергетическое разрешение (662 кэВ), %	6	7
Длина волны (макс. эмиссия), нм	520	420
Гигроскопичность	-	-
Собственная радиоактивность	-	+
Световыход (фотонов/кэВ)	35–55	30

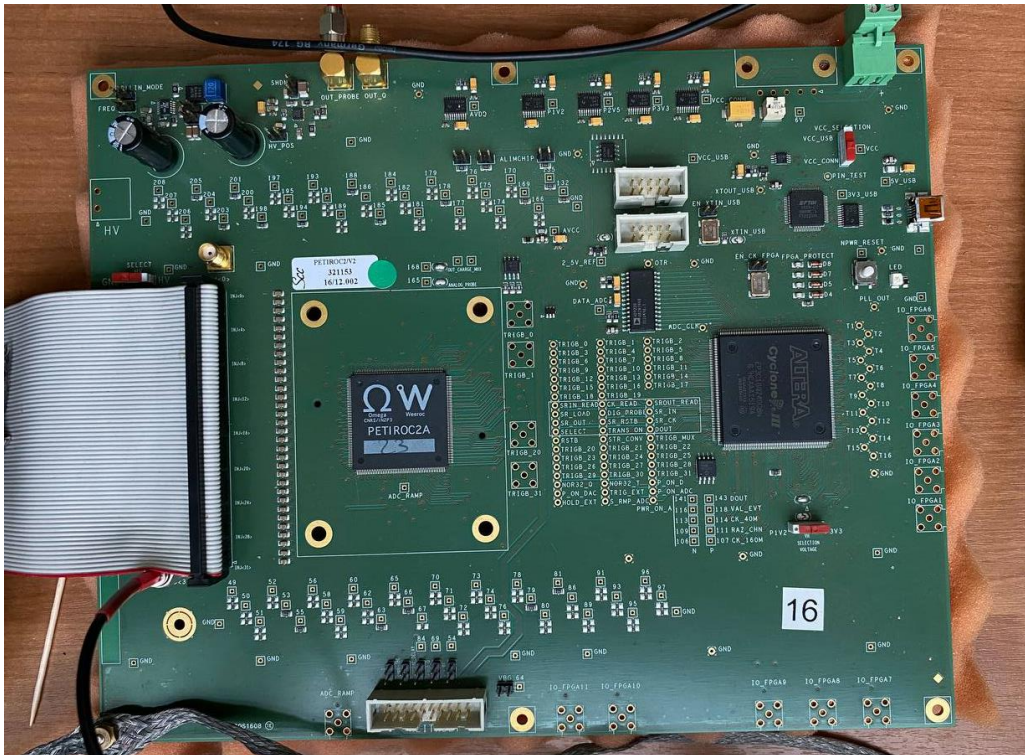


# Многоканальная электроника

Petiros 2A - 32-канальный ASIC (application-specific integrated circuit, “интегральная схема для конкретного применения”), предназначенный для считывания данных с кремниевых фотоумножителей (SiPM).

Petiros 2A сочетает в себе возможность точных измерений заряда и времени. Заряд и время оцифровываются внутри прибора с помощью 10-битных АЦП и ВЦП.

Многоканальная считывающая система CAEN FERS-5200 (DT-5202) на основе двух чипов Citiros-1A сочетает в себе собственное питание, фронт-энд электронику, АЦП, триггерную логику, синхронизацию, локальную память и интерфейс считывания.



# Установка для измерения коэффициентов усиления SiPM

1. Монолитные сцинтилляционные кристаллы GAGG(Ce) 12x12x12 мм;
2. матрицы SiPM 4x4 Onsemi ARRAYJ-30035-16P;
3. считывающие платы AiT Instruments AB16VB-ARRAYJ16P на 16 каналов;
4. источник питания (x2);
5. считывающая плата на основе чипа Petiroc-2A.

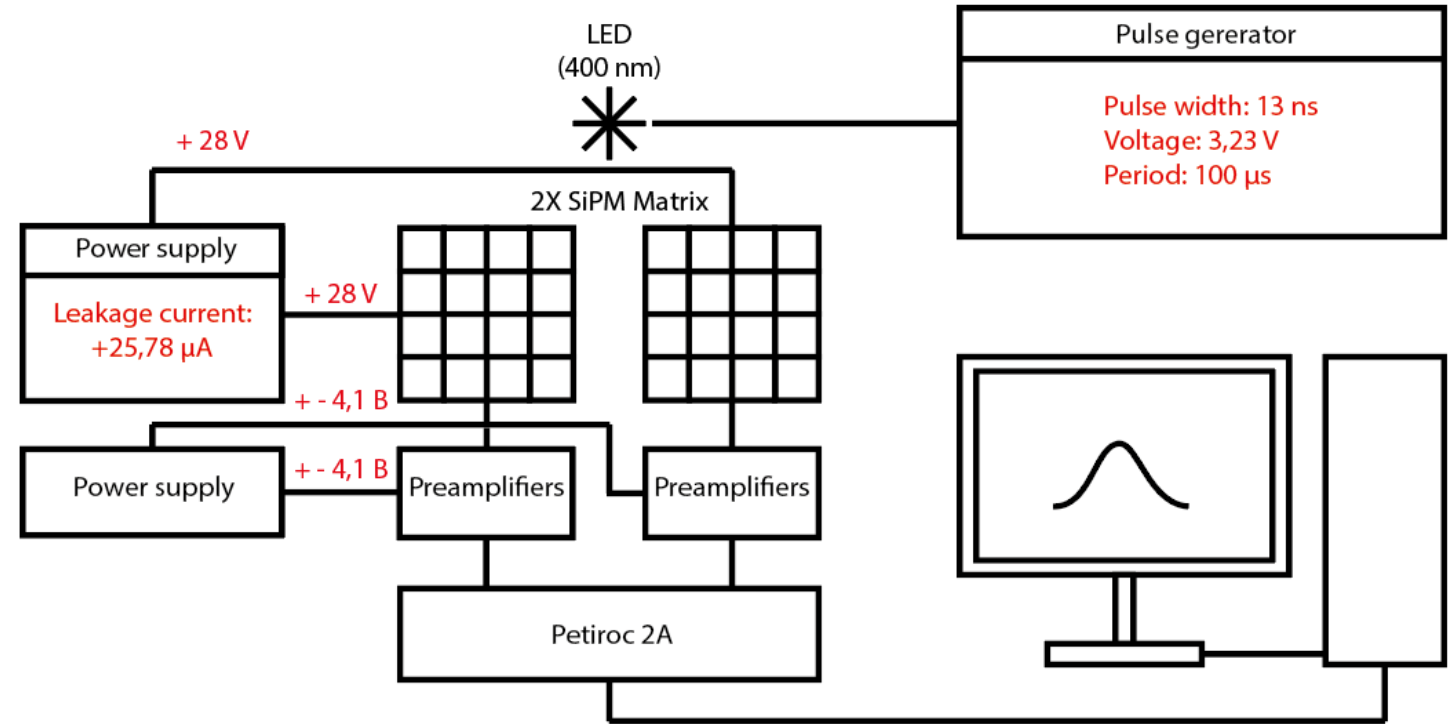


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки для измерения коэффициентов усиления SiPM

# Оценка разброса коэффициентов усиления SiPM

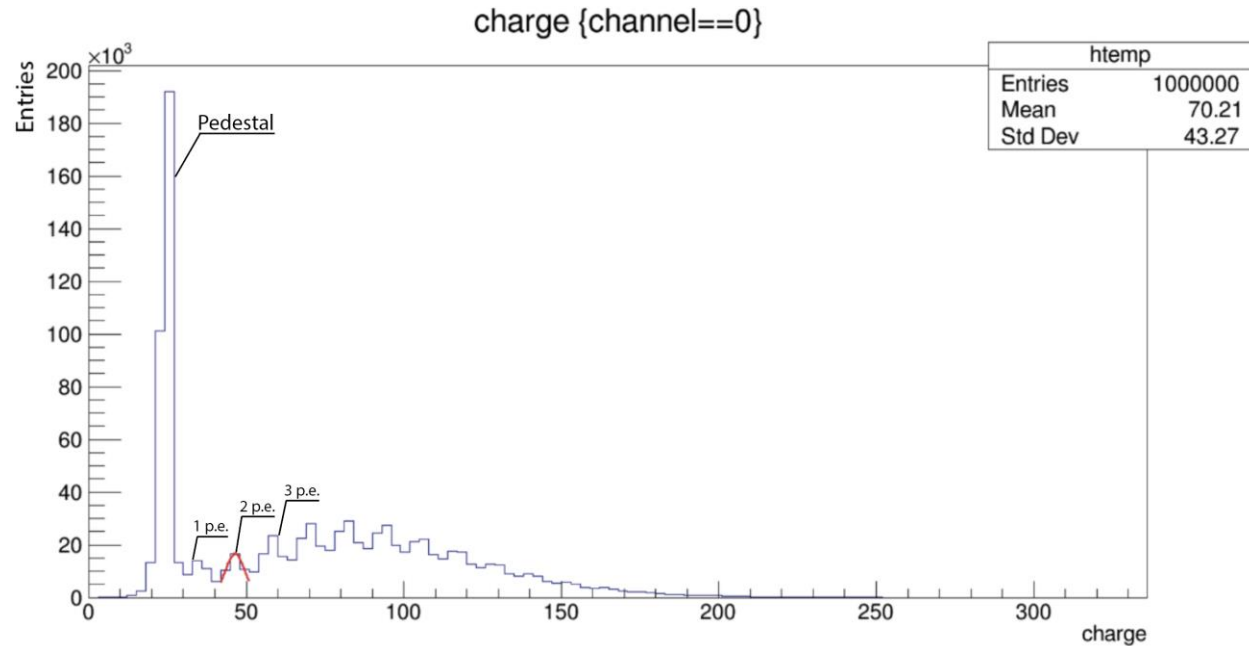


Рисунок 4 – Одноэлектронный зарядовый спектр 0-го канала матрицы

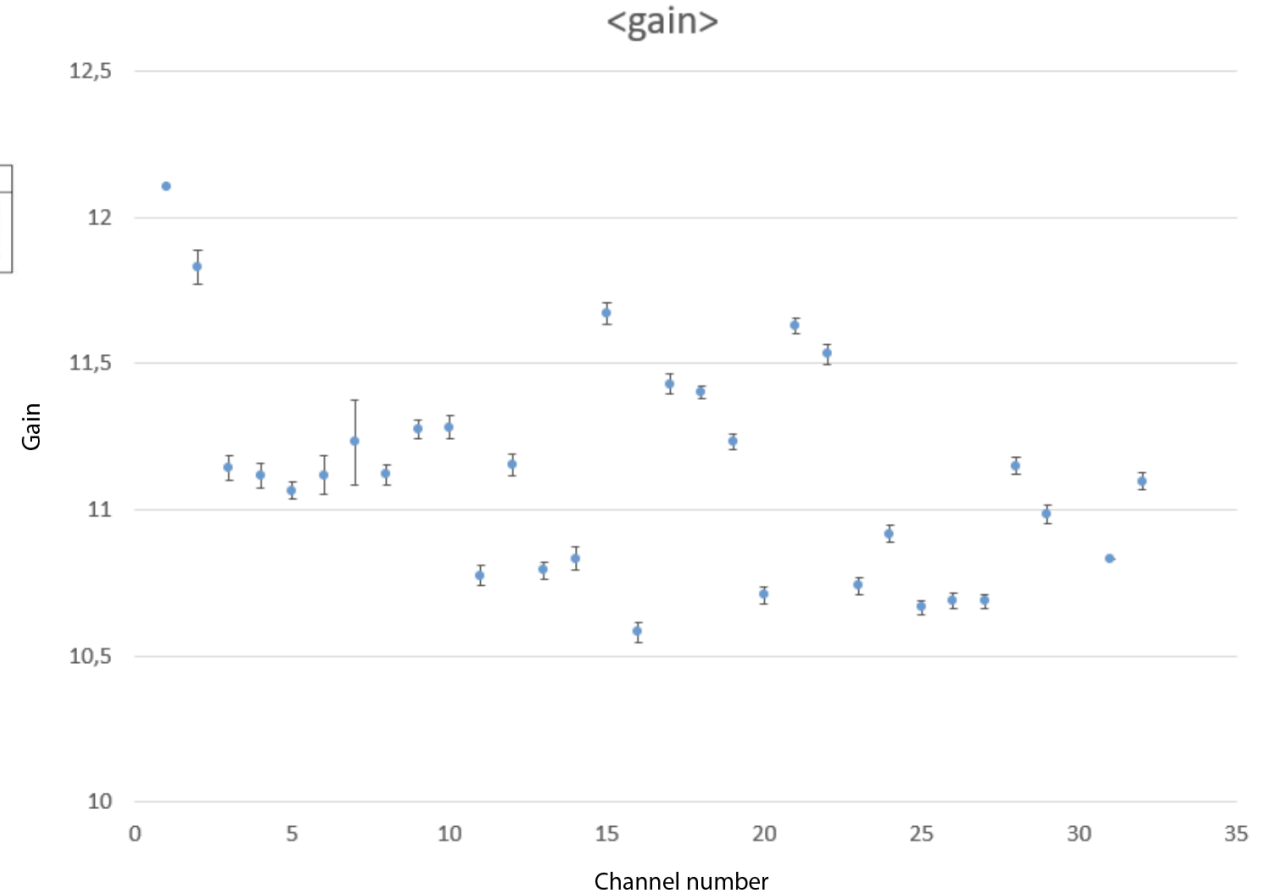


Рисунок 5 – График зависимости коэффициентов усиления от номеров каналов матриц

Максимальный разброс относительно среднего для первой матрицы составил  $0,98 \pm 0,07$ , для второй –  $0,55 \pm 0,05$



# Установка для определения напряжений пробоя SiPM

1. Матрица SiPM 8x8 Hamamatsu S13361-3050AE-08;
2. считывающая плата A5251 на 64 канала для обеспечения усиления сигналов с матрицы;
3. считывающая система CAEN FERS-5200 (DT-5202) на основе двух чипов Citiros-1A;
4. CAEN SP5601 LED driver.

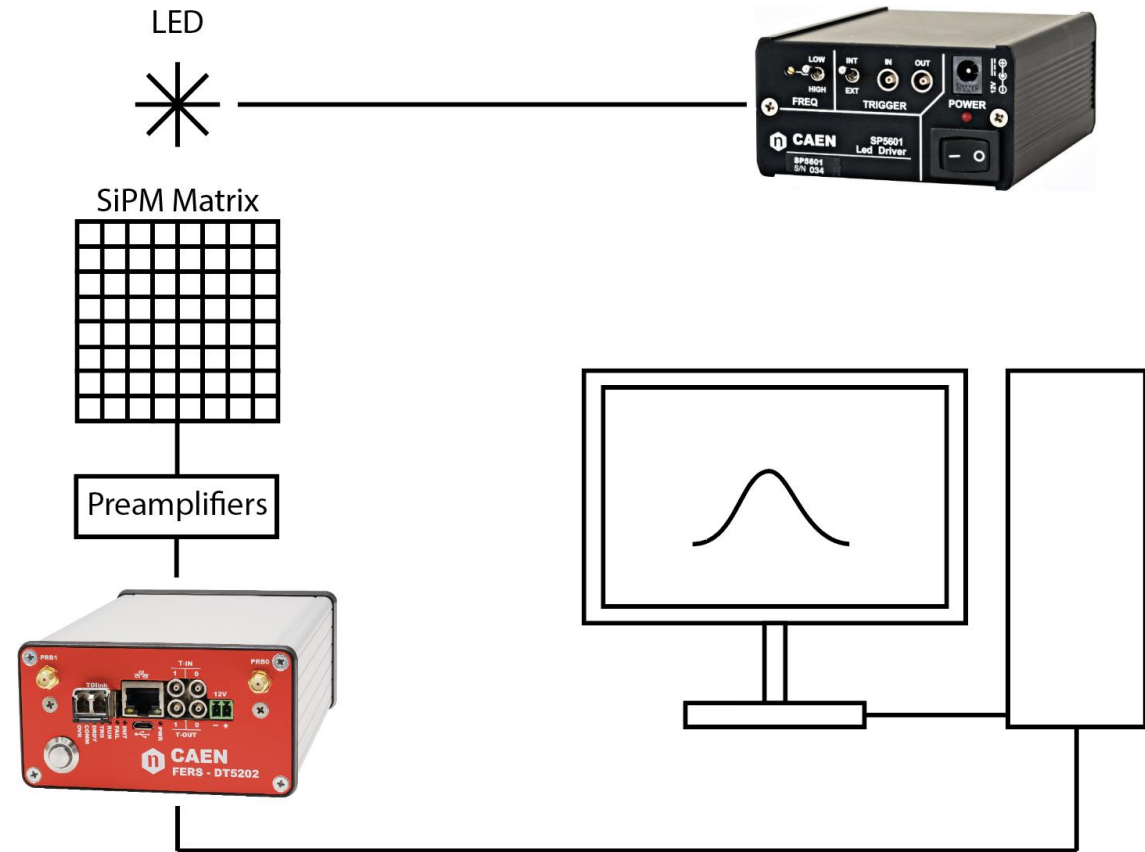
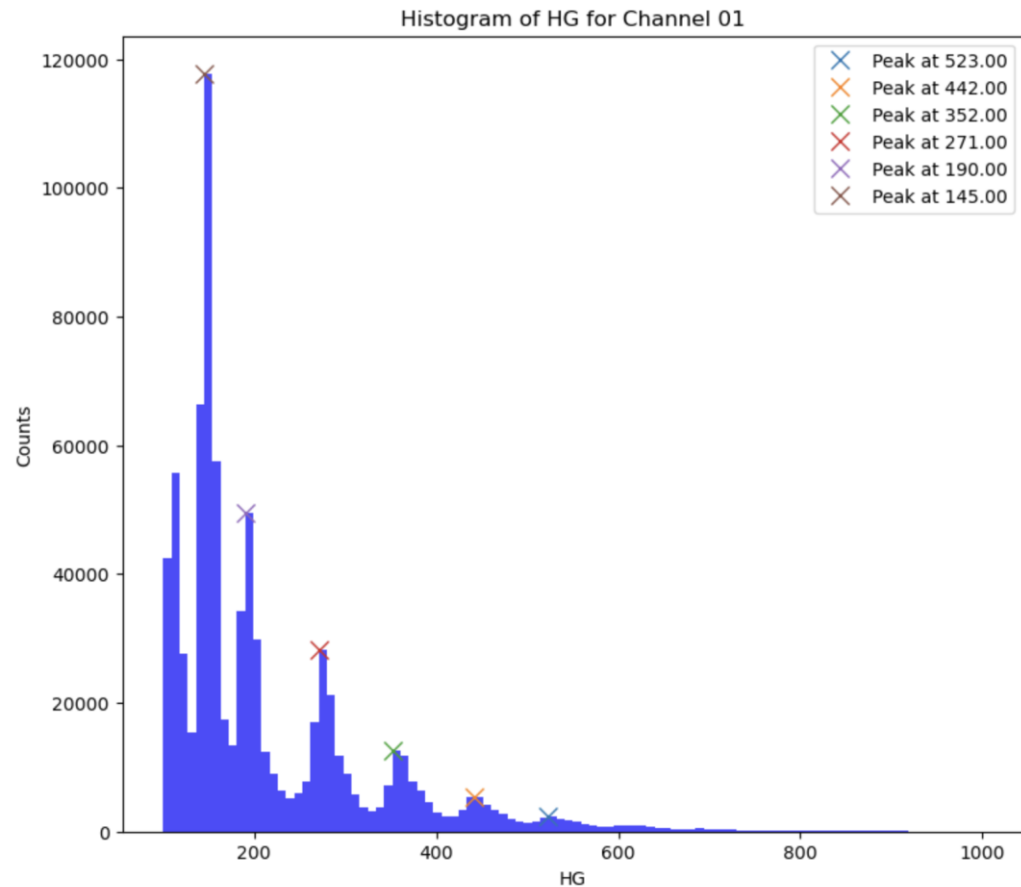


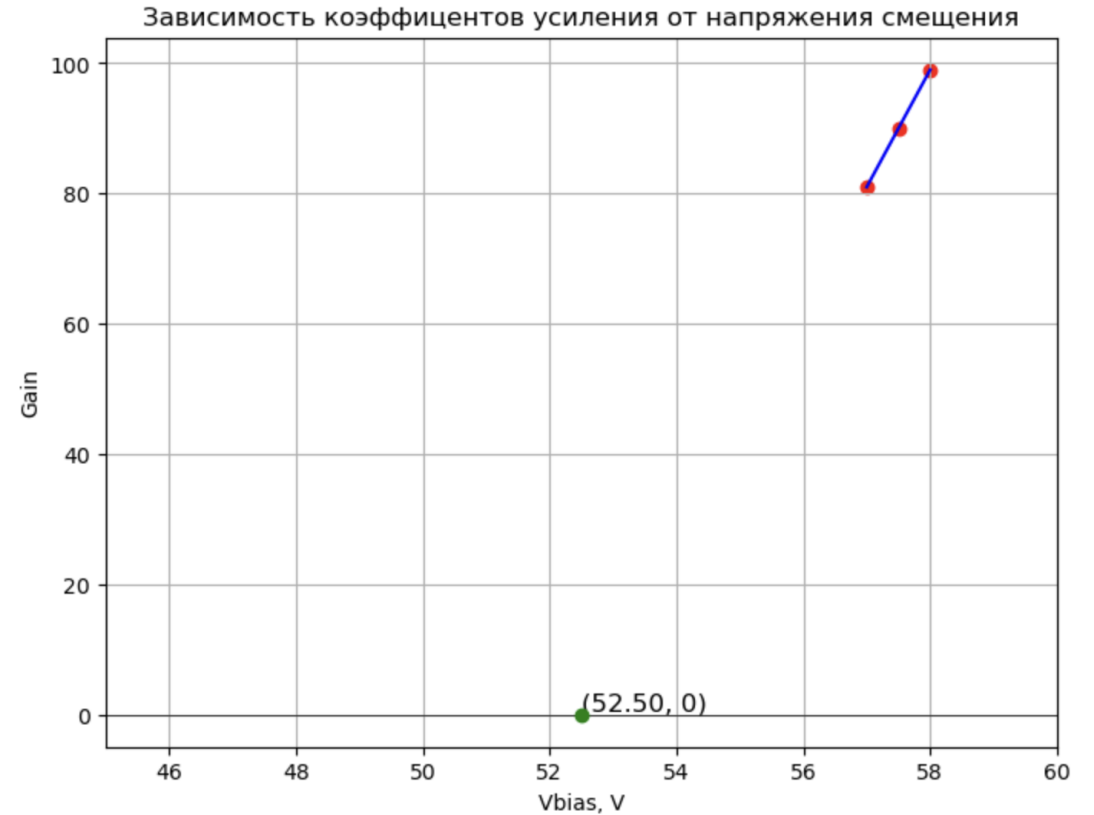
Рисунок 6 – Принципиальная схема установки для определения напряжений пробоя SiPM

# Измерение напряжений пробоя SiPM



Found peaks:  
{'Ch\_01': [523.0, 442.0, 352.0, 271.0, 190.0, 145.0]}  
Gain:  
81.0

Рисунок 7 – Одноэлектронный спектр с первого канала матрицы и результат работы программы по нахождению пиков и вычислению их положений



Уравнение прямой:  $y = 18.00x - 945.00$   
Напряжение пробоя:  $x = 52.50$  В

Рисунок 8 – Результат работы программы по определению напряжения пробоя канала матрицы

# Результат измерений напряжений пробоя

Напряжения пробоя для 64 каналов матрицы  
Hamamatsu S13361-3050AE-08:

Ch	$V_{br}$ , V	Ch	$V_{br}$ , V	Ch	$V_{br}$ , V	Ch	$V_{br}$ , V
0	49.7	16	54.7	32	51.1	48	55.2
1	52.5	17	53.6	33	47.7	49	50.0
2	53.9	18	50.9	34	49.0	50	55.2
3	50.9	19	54.9	35	52.2	51	52.1
4	52.9	20	49.9	36	52.3	52	55.2
5	54.5	21	55.0	37	52.8	53	50.0
6	51.7	22	48.0	38	51.7	54	54.6
7	49.7	23	54.6	39	48.0	55	49.5
8	50.6	24	52.4	40	53.5	56	51.3
9	53.6	25	49.5	41	51.9	57	52.3
10	49.6	26	52.7	42	54.1	58	49.5
11	51.6	27	54.3	43	52.0	59	52.5
12	52.8	28	52.4	44	46.3	60	51.4
13	56.0	29	52.1	45	51.9	61	55.4
14	54.4	30	52.3	46	54.3	62	50.7
15	55.1	31	52.6	47	52.3	63	52.0

Разброс по напряжениям составляет 7,7 В

Разработанный алгоритм позволяет:

1. определять коэффициент усиления и напряжение пробоя SiPM;
2. помогает обеспечить однородный отклик со всех каналов матрицы;
3. является методом контроля стабильности детектора.

# Оценка энергетического разрешения

1. Монолитный сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) 15x12x10 мм;
2. матрица SiPM 4x4 (SensL SPMArray4);
3. считывающая плата на 16 каналов;
4. источник питания (x2);
5. осциллограф.

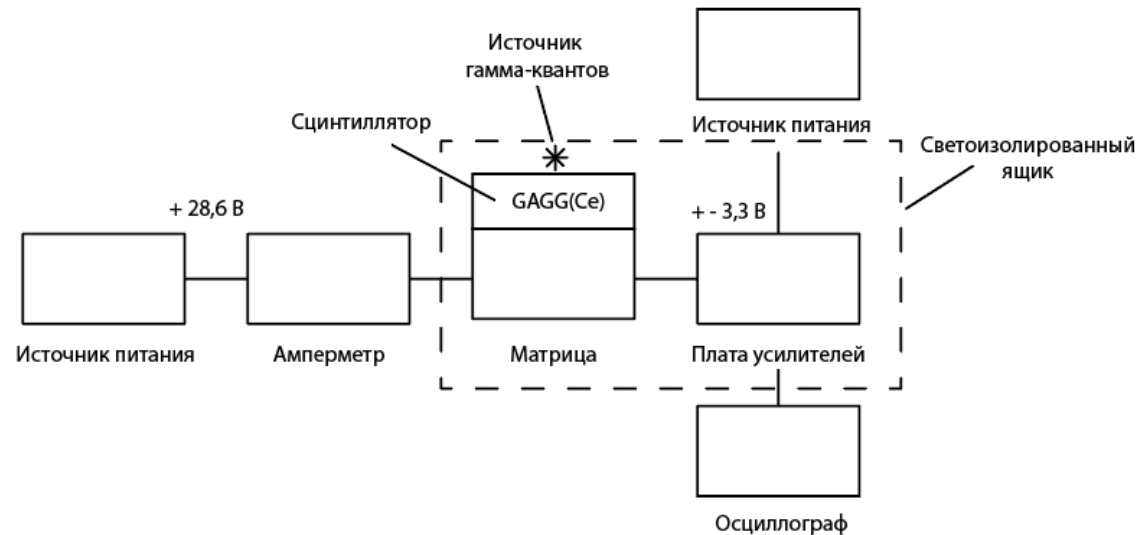


Рисунок 9 – Принципиальная схема установки для измерения энергетического разрешения

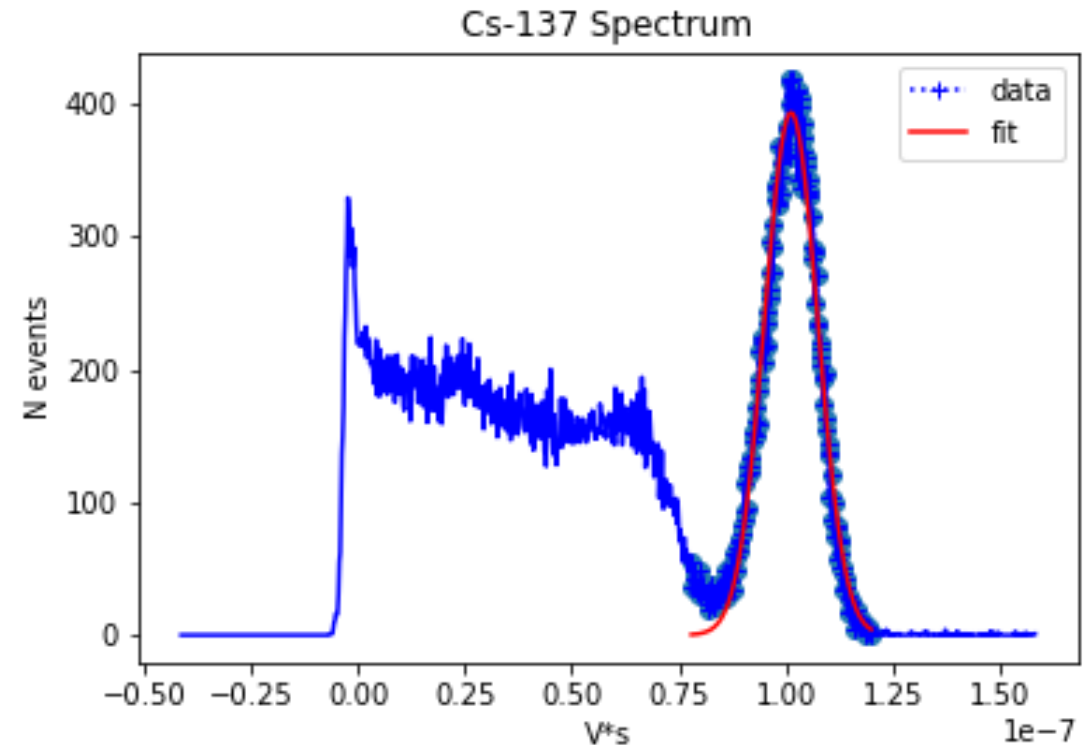


Рисунок 10 – Энергетический спектр Cs-137, снятый с суммарного канала матрицы

Относительное разрешение (662 кэВ):  
 $\delta \sim 14\%$

Собственное разрешение (662 кэВ):  
 $\delta \sim 6\%$

# Установка для оценки энергетического разрешения и восстановления координаты XY – взаимодействия

1. Монолитный сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) 12x12x12 мм;
2. матрица SiPM 4x4 Onsemi ARRAYJ-30035-16P;
3. считывающая платы AiT Instruments AB16VB-ARRAYJ16P на 16 каналов;
4. источник питания (x2);
5. считывающая плата на основе чипа Petiroc-2A;
6. Источник излучения – Cs-137/Ti-44.

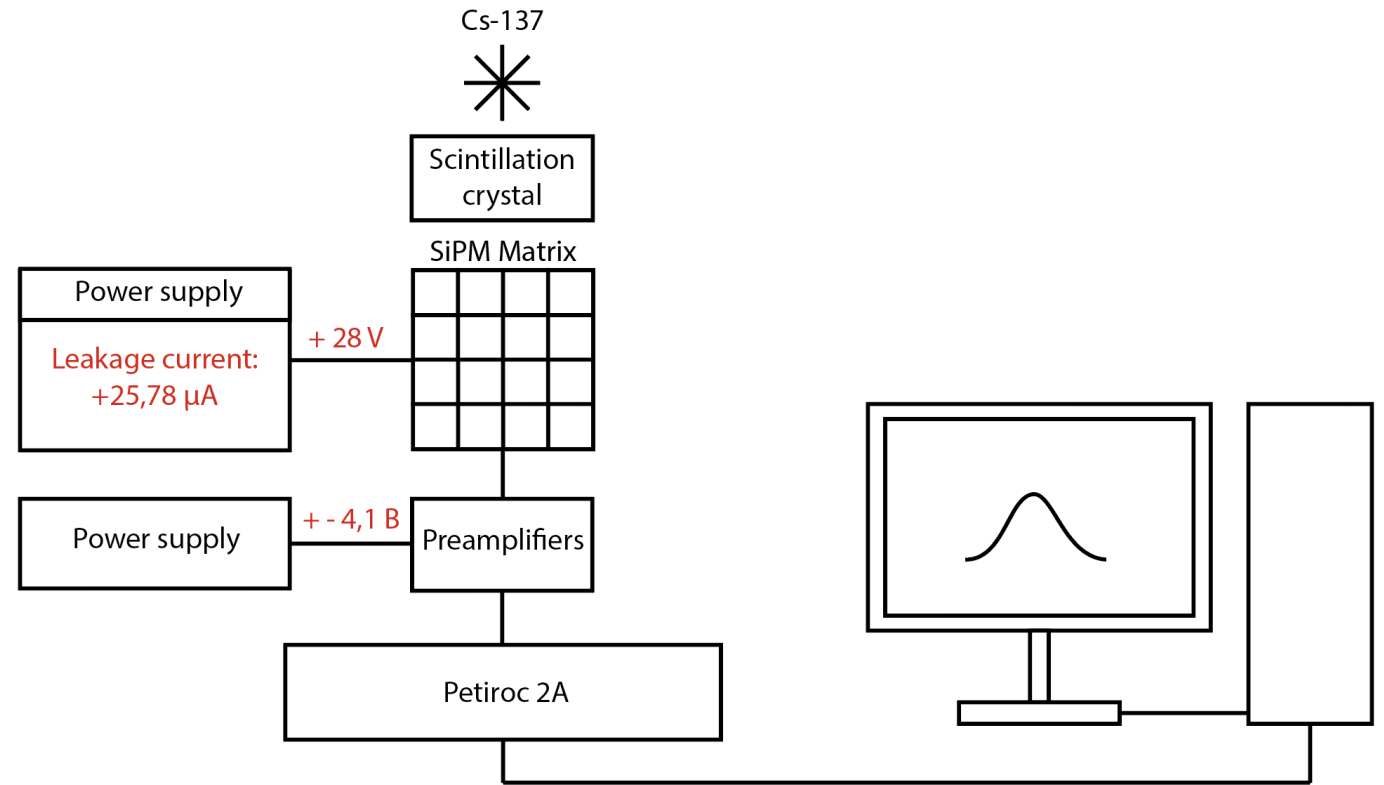


Рисунок 11 – Принципиальная схема установки для измерения энергетического разрешения и восстановления координаты XY – взаимодействия



# Оценка энергетического разрешения

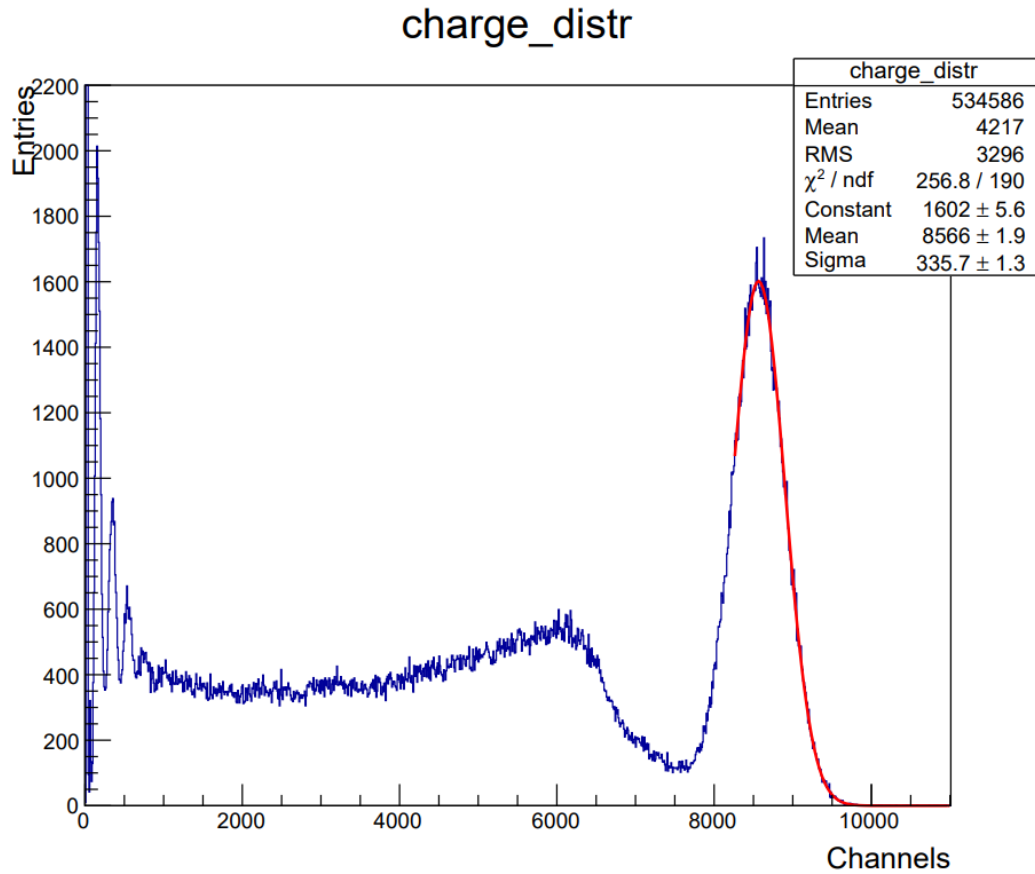


Рисунок 12 – Суммарный зарядовый спектр Cs-137

Относительное разрешение (662 кэВ):

$$\delta \sim 9\%$$

Собственное разрешение (662 кэВ):

$$\delta \sim 6\%$$

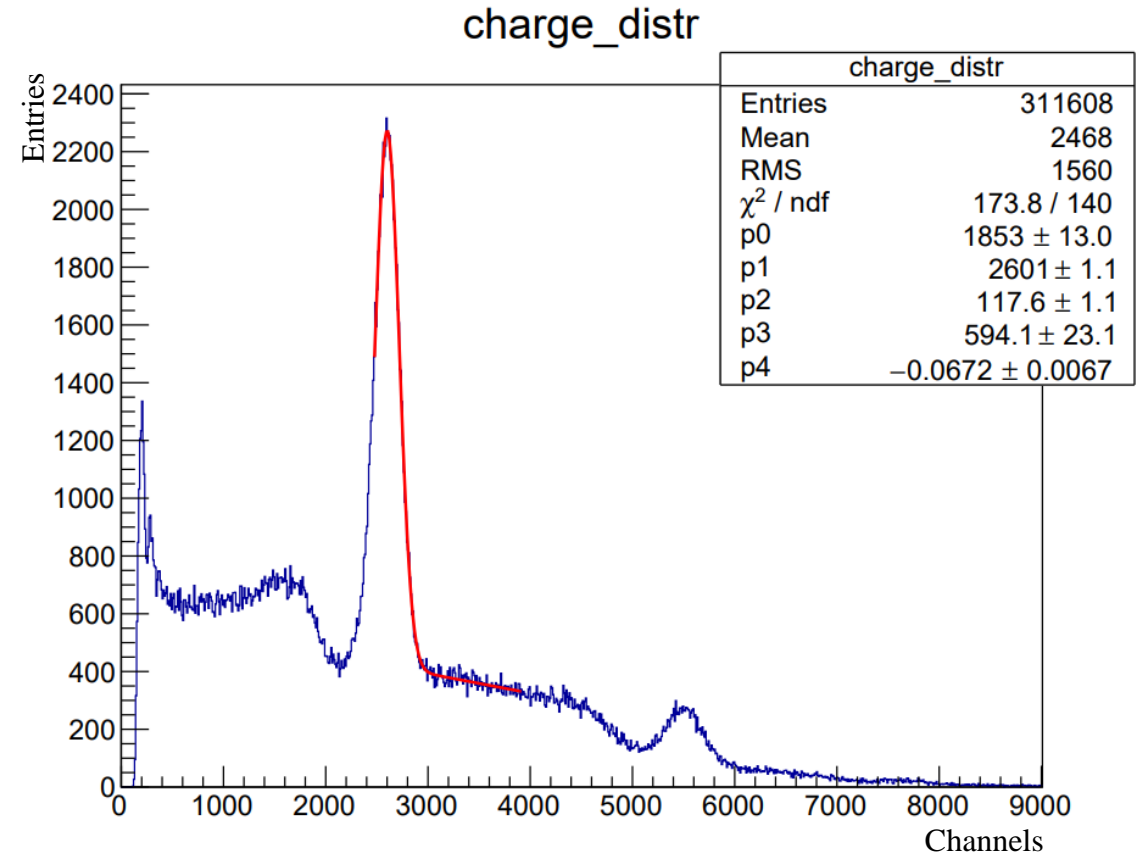


Рисунок 13 – Суммарный зарядовый спектр Ti-44

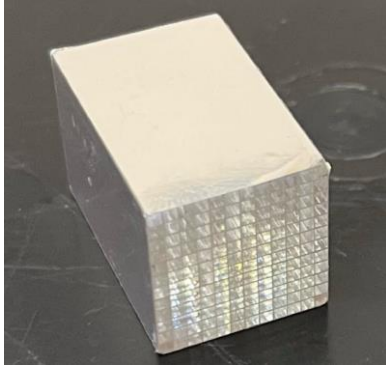
Относительное разрешение (511 кэВ):

$$\delta \sim 11\%$$

Собственное разрешение (511 кэВ):

$$\delta \sim 8\%$$

# Восстановление координаты XY-взаимодействия для кристалла LYSO



$$X = \frac{\sum_i x_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad Y = \frac{\sum_i y_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i}$$

где  $x_i$  - координата центра  $i$ -ой ячейки матрицы в миллиметрах,  
 $\omega_i$  - вес  $i$ -ой ячейки в каналах

XY\_distr

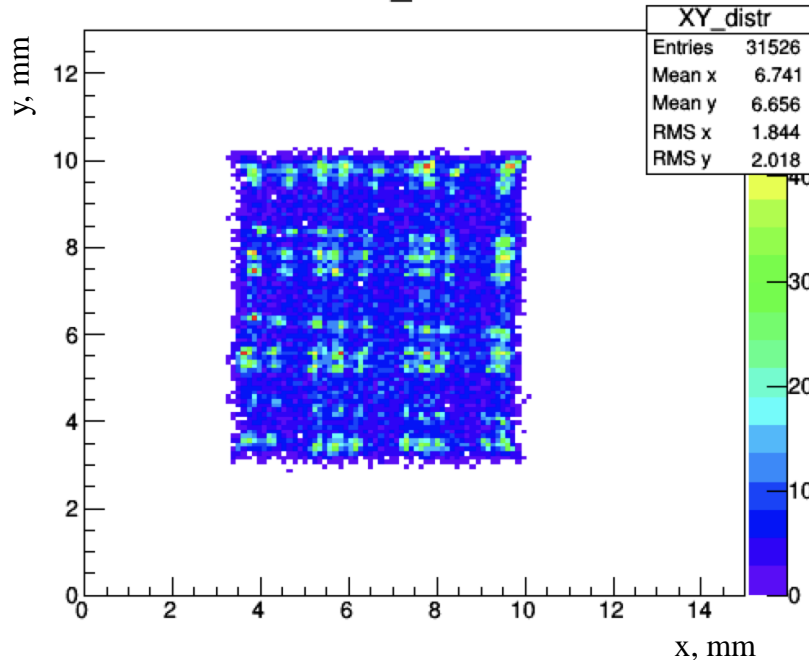


Рисунок 14 – Двумерное распределение плоскости XY

X\_distr

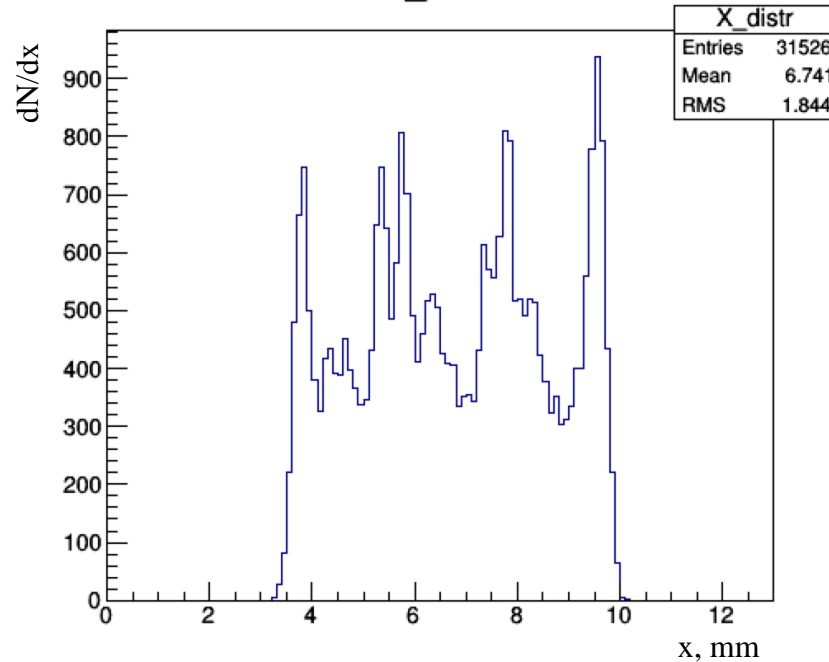


Рисунок 15 – Распределение по координате X

Y\_distr

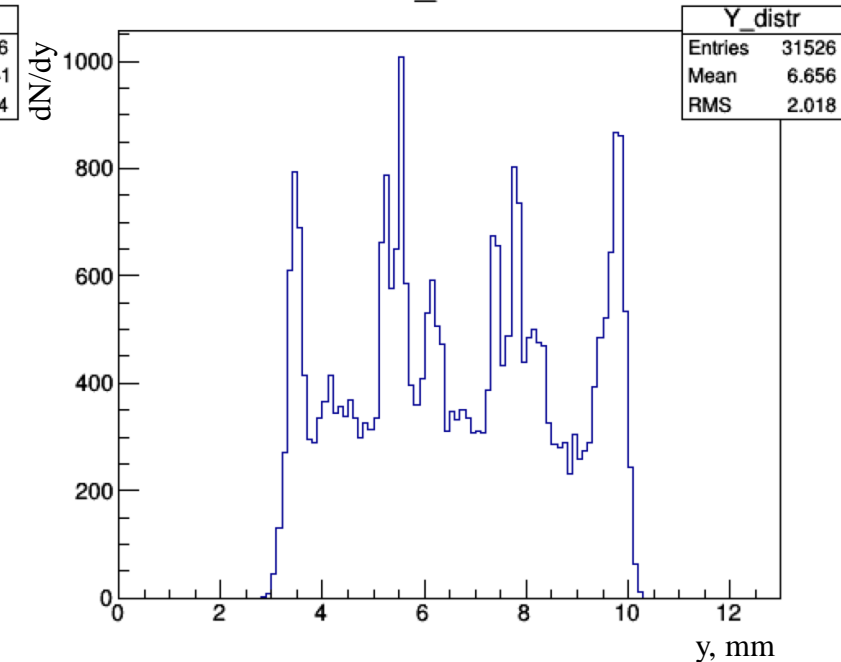


Рисунок 16 – Распределение по координате Y

# Восстановление координаты XY-взаимодействия для кристалла GAGG

Источник – Am-241(60 кэВ)

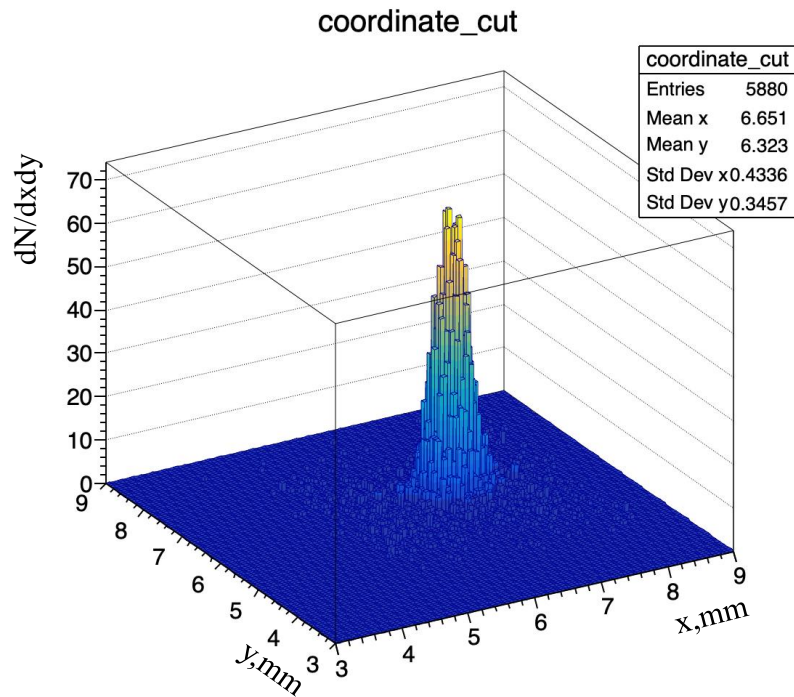
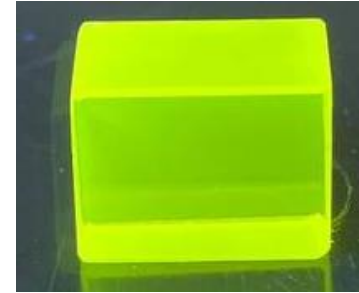


Рисунок 17 – Двумерное распределение плоскости XY

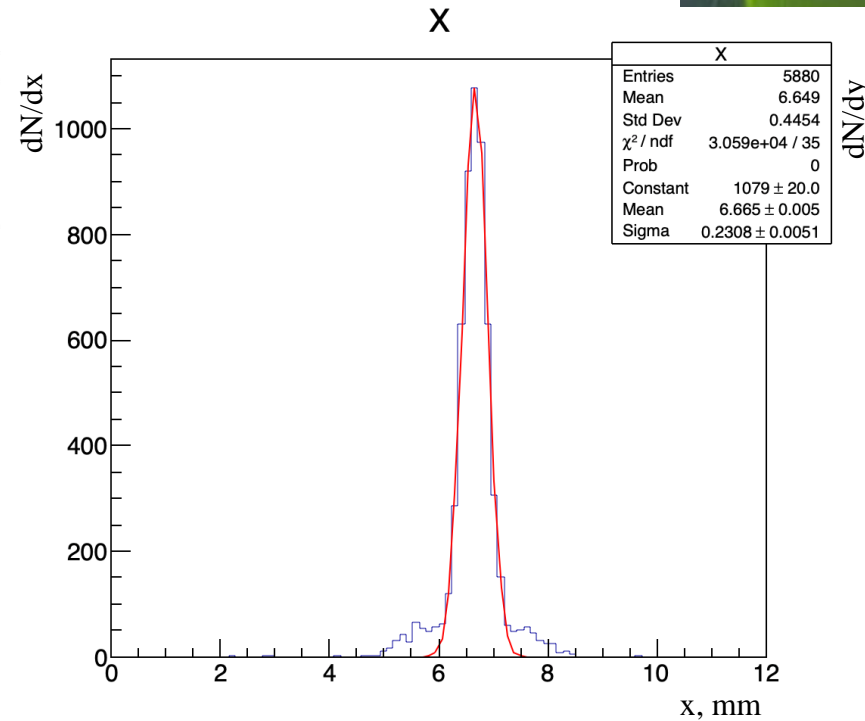


Рисунок 18 – Распределение по координате X

Координатное разрешение (FWHM): 0,5 мм

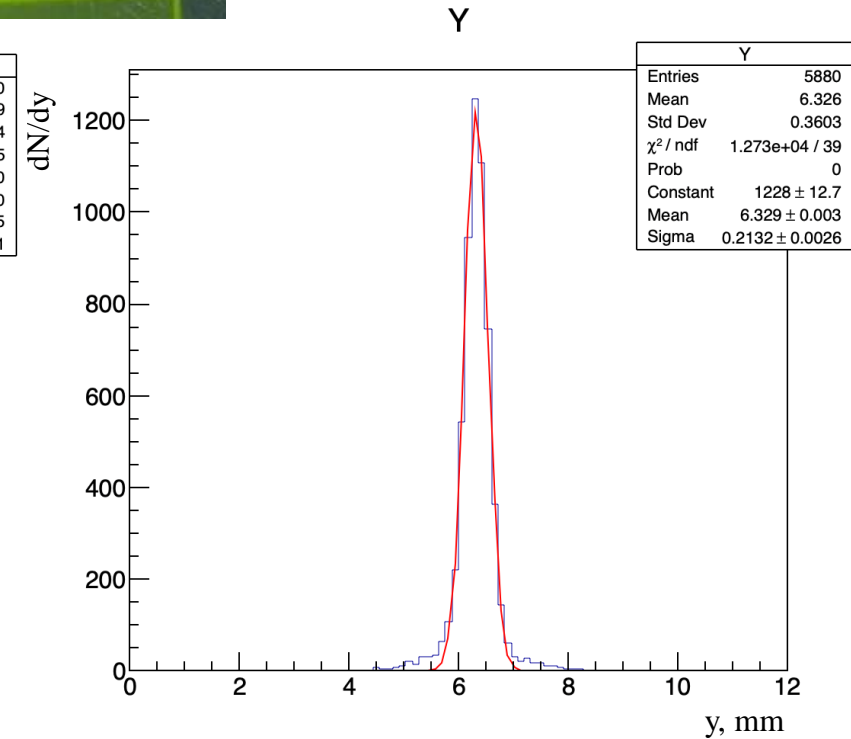


Рисунок 19 – Распределение по координате Y

Координатное разрешение (FWHM): 0,5 мм

# Установка для оценки временного разрешения

1. Монолитные сцинтилляционные кристаллы GAGG(Ce) 12x12x12 мм;
2. матрицы SiPM 4x4 Onsemi ARRAYJ-30035-16P;
3. считывающие платы AiT Instruments AB16VB-ARRAYJ16P на 16 каналов;
4. источник питания (x2);
5. считывающая плата на основе чипа Petiroc-2A;
6. Источник излучения – Ti-44.

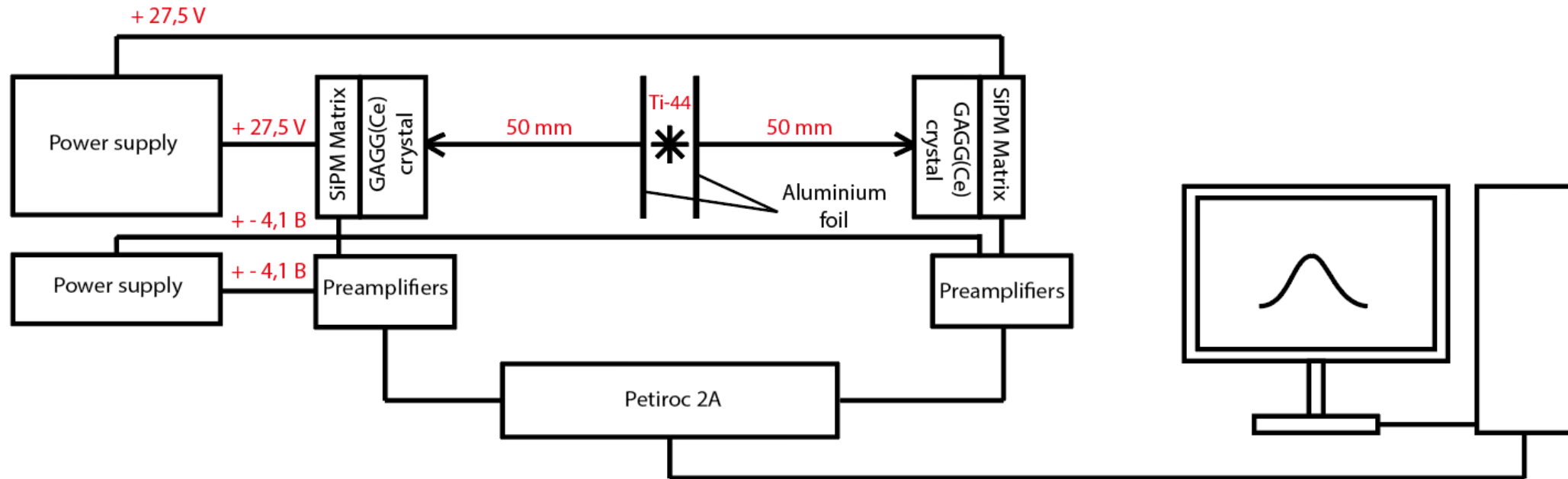


Рисунок 20 – Принципиальная схема установки для измерения временного разрешения

# Оценка временного разрешения

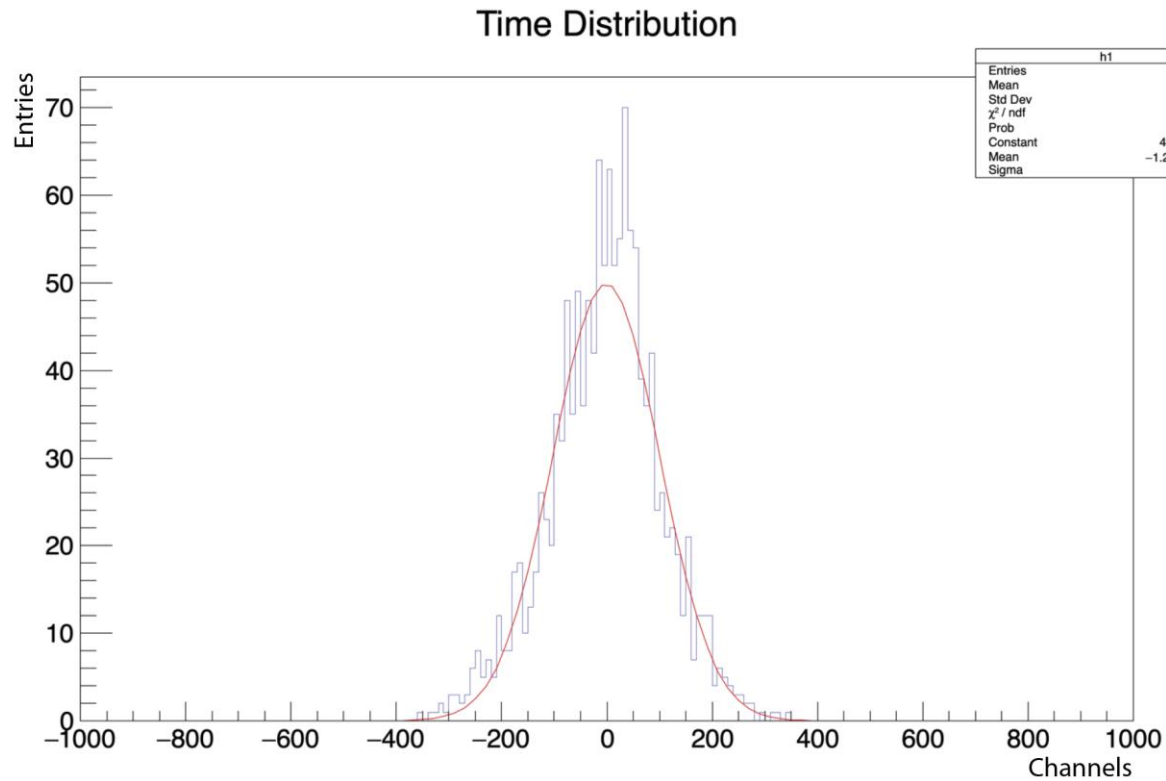


Рисунок 21 – Распределение разности средних времен срабатывания всех SiPM

Временное разрешение (FWHM):

8 нс

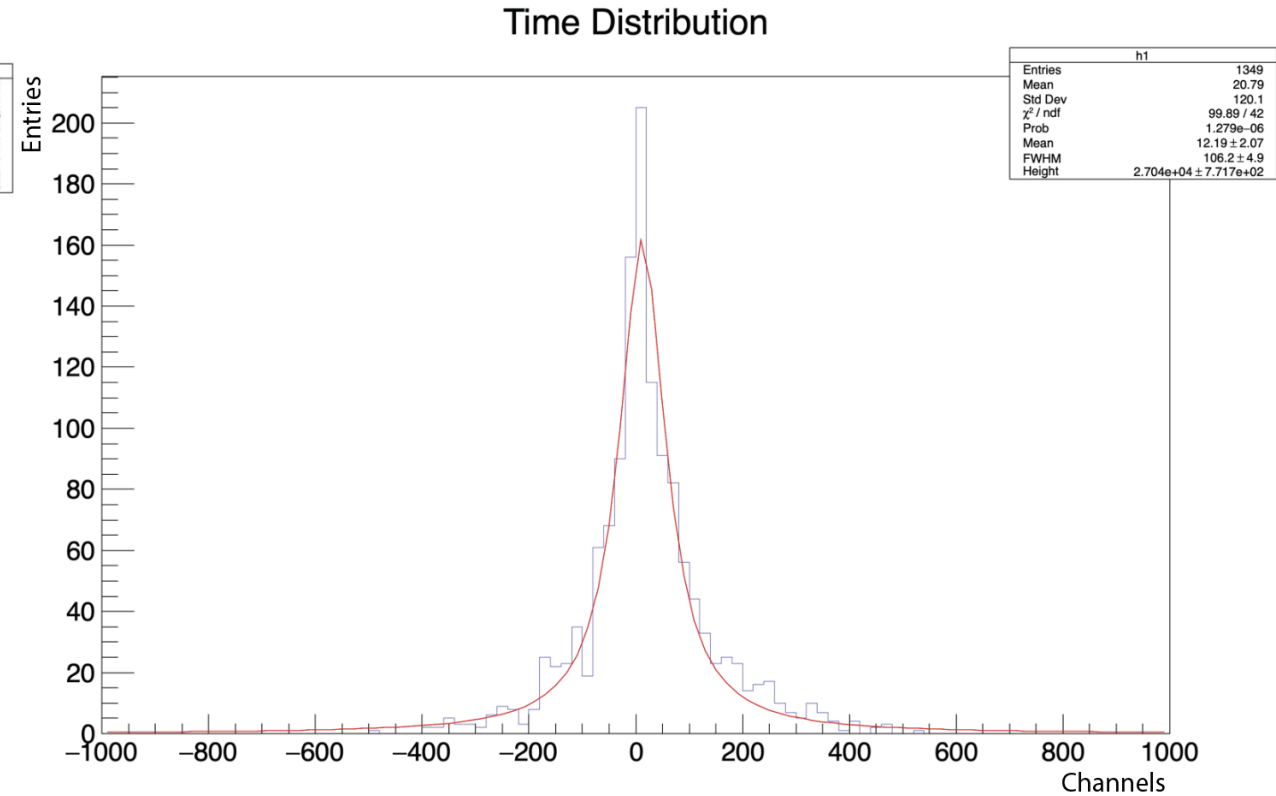


Рисунок 22 – Распределение разности времен первых сработавших SiPM матрицы

Временное разрешение (FWHM):

4 нс



# Оценка загрузки детектора

- Ожидаемая активность источника в ПЭТ для лабораторных животных – 1 МБк;
- средняя частота срабатываний: детектор 5x5 см → 0,1 МГц;
- длительность сигналов с детектора на основе матрицы SiPM SensL SPMArray4 и сцинтилляционного кристалла GAGG 15x12x10 мм – 400 нс.

Вероятность наложений импульсов:

$$\eta \approx n_0 t,$$

где  $n_0$  – средняя частота срабатываний,  $t$  – длительность сигналов.

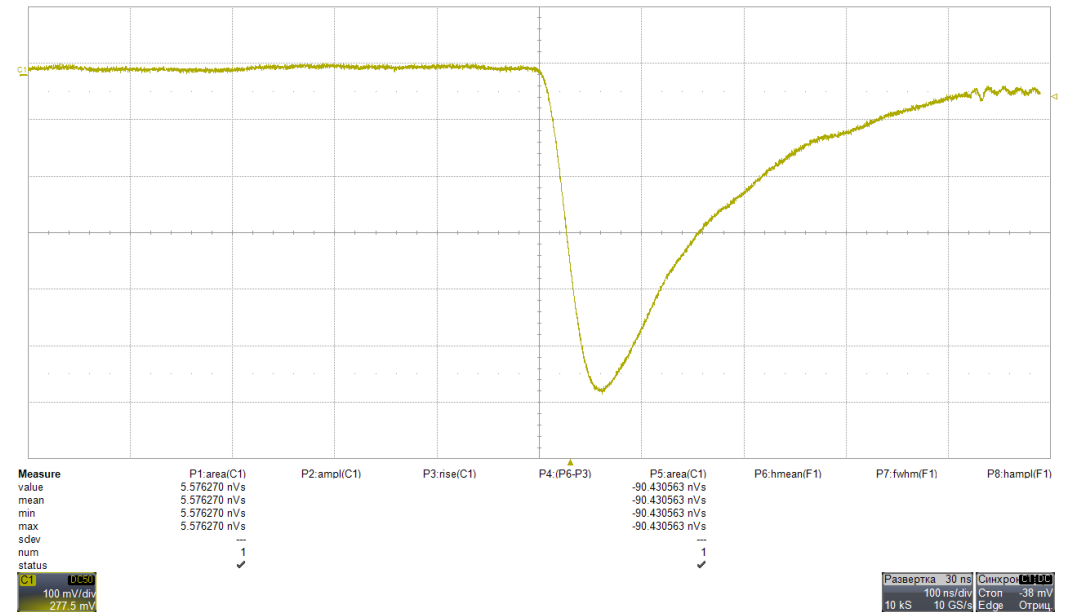


Рисунок 23 – Осциллограмма сигнала с суммарного канала матрицы

$$\eta \approx 4\%$$

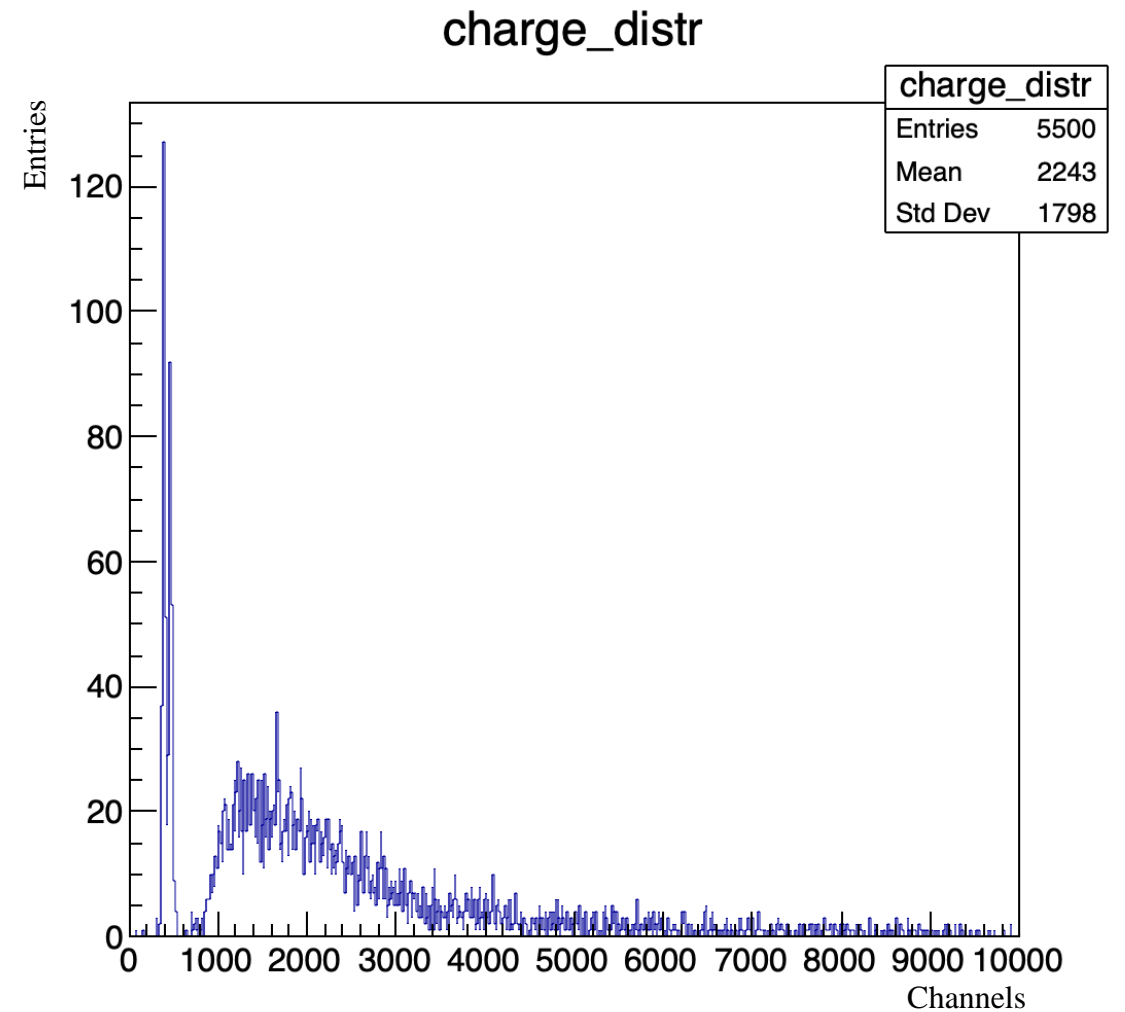
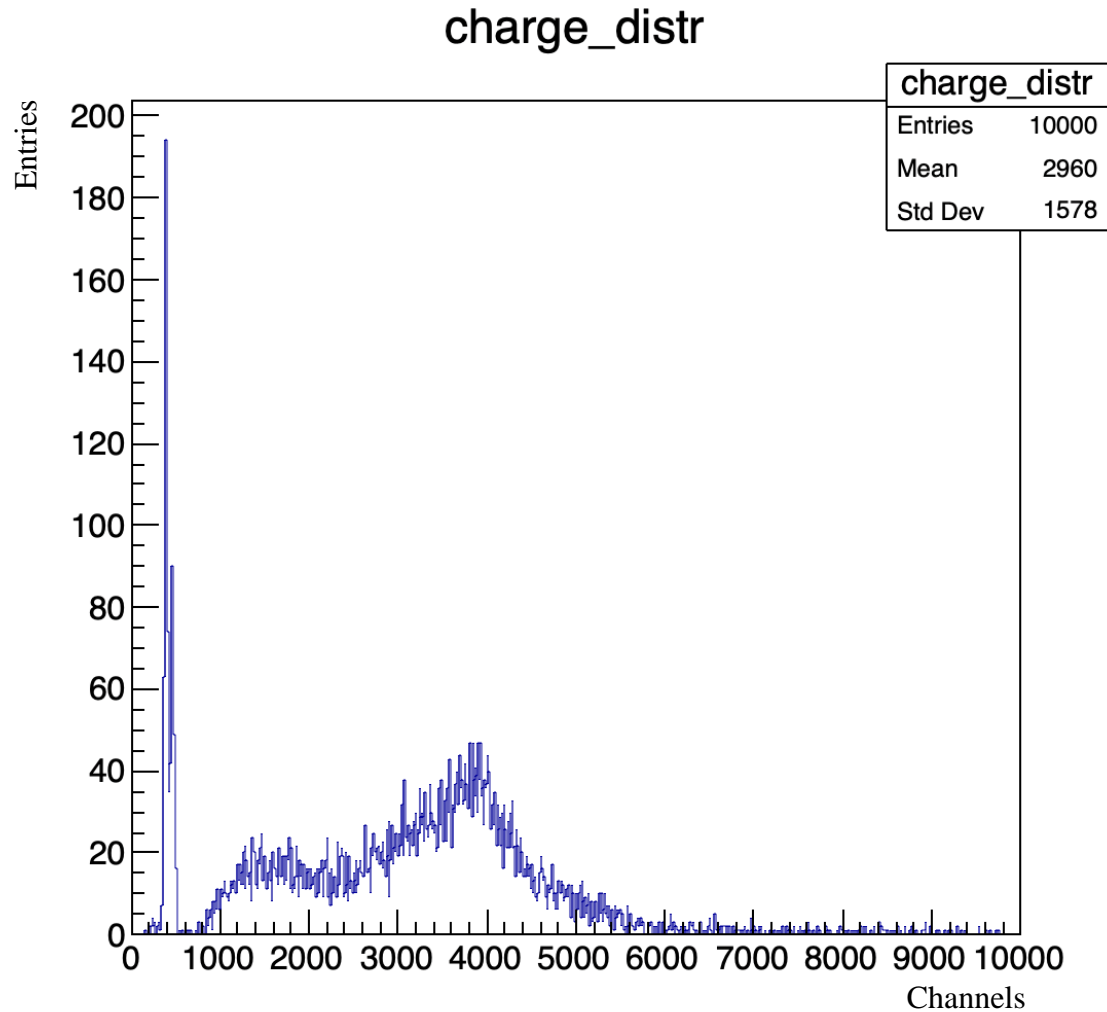
# Заключение

- Проведена оценка разброса коэффициентов усиления SiPM матрицы Onsemi ARRAYJ-30035-16P. Максимальный разброс относительно среднего для первой матрицы составил  $0,98 \pm 0,07$ , для второй –  $0,55 \pm 0,05$ .
- Разработан алгоритм для определения коэффициентов усиления и напряжений пробоя SiPM. Разброс напряжений пробоя SiPM матрицы Hamamatsu S13361-3050AE-08 составил 7,7 В.
- Проведена оценка относительного энергетического разрешения. Для матрицы Onsemi ARRAYJ-30035-16P и сцинтиллятора GAGG 12x12x12 мм оно составило  $\delta \sim 9\%$  (662 кэВ) и  $\delta \sim 11\%$  (511 кэВ).
- Разработан алгоритм для восстановления координаты XY – взаимодействия. Корректность работы алгоритма показана на примере многопиксельного кристалла LYSO и монолитного кристалла GAGG. Координатное разрешение составило 0,5 мм.
- Проведена оценка временного разрешения детектора на основе двух матриц SiPM Onsemi ARRAYJ-30035-16P и сцинтилляционных кристаллов GAGG 12x12x12 мм двумя различными способами: по времени первых сработавших SiPM матрицы и по среднему времени срабатывания всех SiPM. Временное разрешение (FWHM) составило 4 нс и 8 нс соответственно.
- Произведена оценка загрузки детектора на основе кристалла GAGG 15x12x10 мм. При загрузке в 0,1 МГц вероятность наложений импульсов составит 4%.

Спасибо за внимание!

# Backup

# Спектр Am-241 и фон распределения



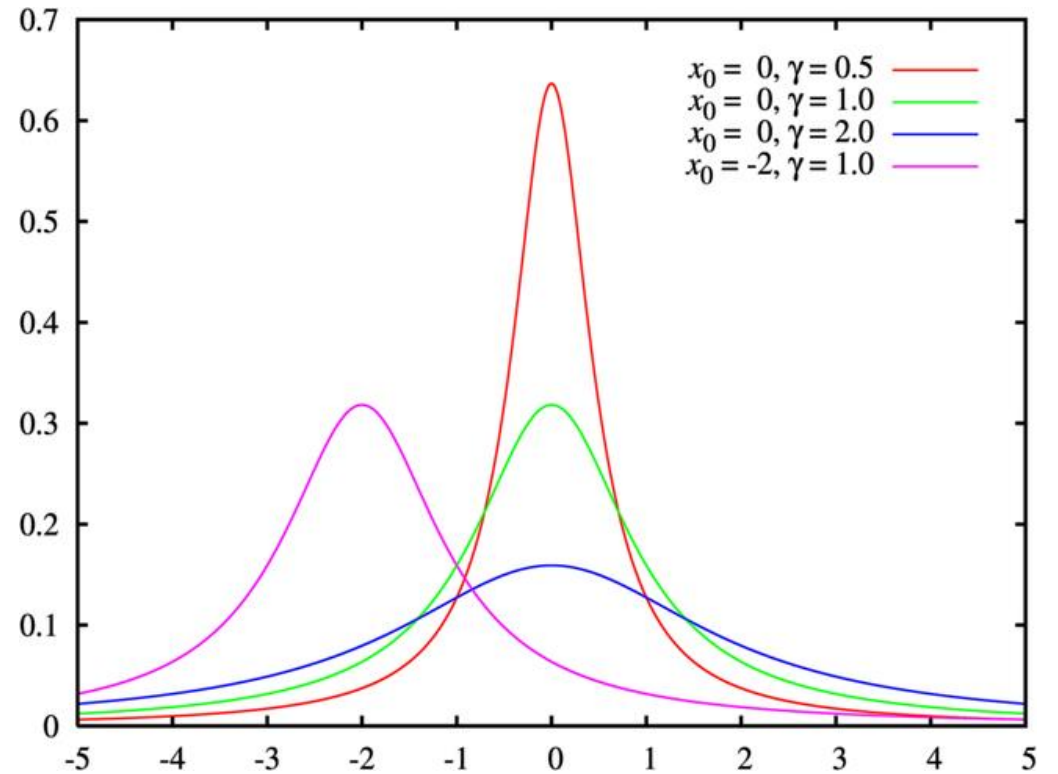


# Распределение Коши

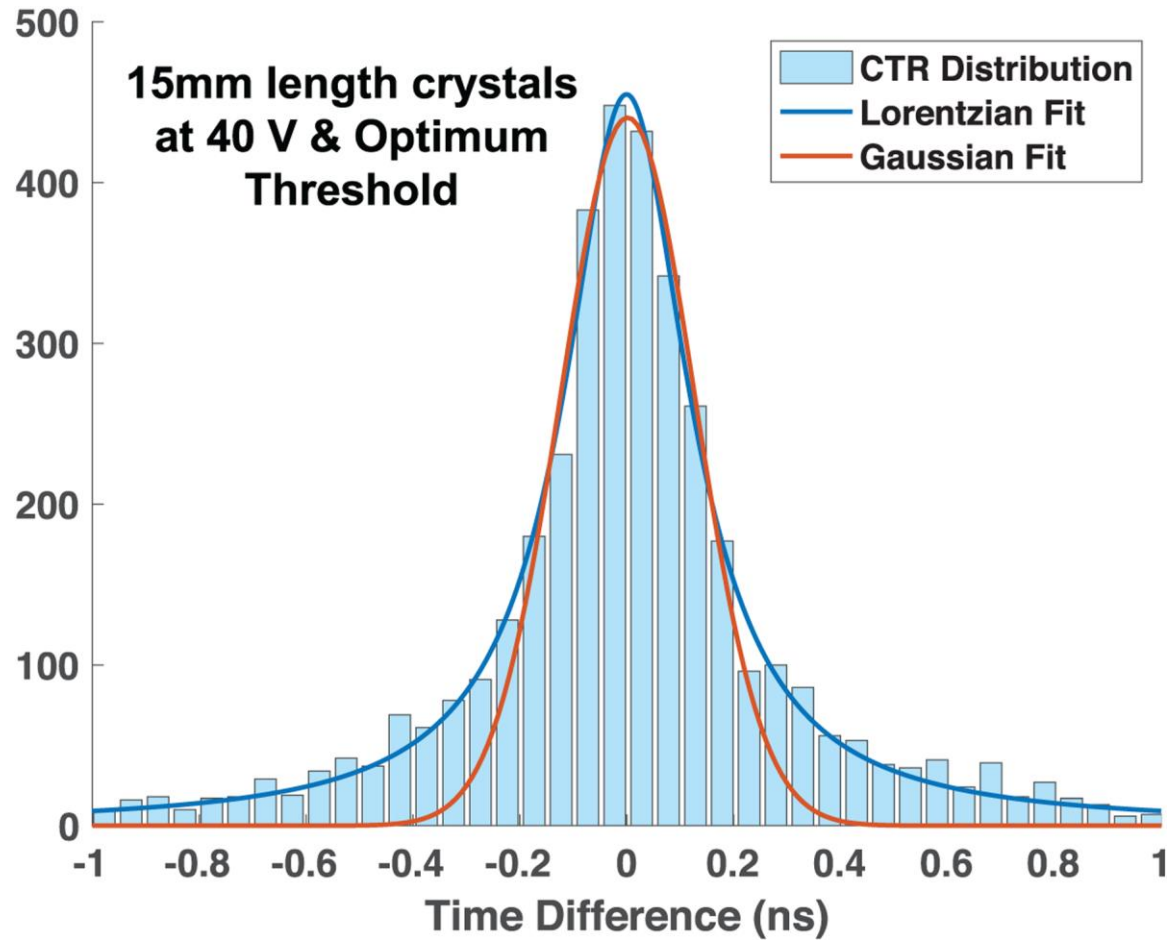
$$f_X(x) = \frac{1}{\pi\gamma \left[1 + \left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)^2\right]} = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{\gamma}{(x-x_0)^2 + \gamma^2} \right],$$

где

- $x_0 \in \mathbb{R}$  — параметр сдвига;
- $\gamma > 0$  — параметр масштаба.



# Распределение Коши во временных измерениях



Cates JW, Levin CS. Electronics method to advance the coincidence time resolution with bismuth germanate. *Phys Med Biol*. 2019 Sep 5;64(17):175016. doi: 10.1088/1361-6560/ab31e3.