

Семинар ОФВЭ ИЯИ РАН
по материалам диссертации
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Координатные детекторы высокого разрешения на основе газовых электронных умножителей

Мальцев Тимофей Владимирович
ИЯФ СО РАН

Специальность 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Шехтман Лев Исаевич

Новосибирск — Москва
12 мая 2026 года

План доклада

- Введение
- Детекторы на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ)
- Коэффициент усиления и эффективность детекторов
- Моделирование диффузии и усиления электронов в детекторе
- Пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ
- Внутренний трекер детектора Супер Чарм-Тау Фабрики
- Заключение

Актуальность темы исследования

В последние десятилетия значительный прогресс в технике регистрации частиц был достигнут благодаря созданию микроструктурных газовых детекторов и, в частности, детекторов на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ)

Характеристики детекторов на основе ГЭУ:

- пространственное разрешение менее 50 мкм
- временное разрешение на уровне 10 нс
- эффективность на уровне 99%
- количество материала менее 0,5% X_0
- загрузочная способность до $10^7 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- радиационной стойкость – интегральный заряд более 20 мКл/мм²

Технологии производства позволяют создавать детекторы различной формы с регистрирующей областью в сотни квадратных метров

Установки ИЯФ, где применяются ГЭУ:

- Детектор КЕДР
- Установка ДЕЙТРОН
- Тестовый пучок ВЭПП-4
- Лазерный поляриметр ВЭПП-4
- Торцевые диски КМД-3 (разработка)
- Супер Чарм-Тау Фабрика (проект)

Детекторы на основе ГЭУ представляют эффективный инструмент физики элементарных частиц, а изучение характеристик детекторов данного типа является актуальной научной задачей

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное изучение основных характеристик детекторов на основе ГЭУ, а также численное моделирование работы внутреннего трекера детектора будущей Супер Чарм Тау Фабрики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи :

1. Провести измерение коэффициента газового усиления, эффективности регистрации и пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ, собранных в ИЯФ СО РАН.
2. Разработать моделирование процесса диффузии электронов в детекторах на основе ГЭУ и рассчитать коэффициент эффективной поперечной диффузии электронов.
3. Построить моделирование процесса измерения пространственного разрешения детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ и установить физические пределы пространственного разрешения детекторов данного типа.
4. Изучить возможность регистрации пи-мезонов внутренним трекером детектора Супер Чарм-Тау Фабрики на основе различных технологий.
5. Исследовать влияние объёмного заряда положительных ионов внутри время-проекционной камеры на искажение траектории электронов ионизации.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Детекторы на основе ГЭУ для установки ДЕЙТРОН и для Тестового пучка, собранные в ИЯФ СО РАН, способны стабильно работать в пропорциональном режиме при коэффициенте газового усиления до 5×10^4 . Эффективность детекторов находится на уровне 99% для коэффициента усиления, превышающего 2×10^4 .
2. Коэффициент эффективной поперечной диффузии электронов при дрейфе в рабочем газе детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ составляет 300 ± 20 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$. Данное значение получено в моделировании для газа Ar(70%)-CO₂(30%) при стандартных условиях, когда в дрейфовом промежутке напряжённость электрического поля равна 2,0 кВ/см, а в остальных промежутках 3,5 кВ/см.
3. Пространственное разрешение детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ для Тестового пучка электронов, собранных в ИЯФ СО РАН, находится на уровне 15 – 30 мкм при регистрации ортогональных треков релятивистских электронов.
4. Минимальный пороговый импульс пи-мезона, допускающий его стабильную регистрацию во внутреннем трекаре детектора Супер Чарм Тау Фабрики на основе время-проекционной камеры, равен 55 МэВ/с. Такая величина порогового импульса получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Внутренняя стенка время-проекционной камеры при этом состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.
5. Газовая смесь Ar(45%)-iC₄H₁₀(15%)-CF₄(40%) обеспечивает минимальные искажения траектории электронов ионизации в рабочем газе внутреннего трекара детектора Супер Чарм-Тау Фабрики. Характерная максимальная величина искажений составляет 2 мм на 30 см дрейфа.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты моделирования сравнивались с физическими оценками, а также с известными экспериментальными результатами для средних характеристик моделируемых процессов. Результаты моделирования одних и тех же процессов проверялись в разных программах, таких как GEANT4 и HEED.

Измерения характеристик детекторов проводились многократно и в разных постановках как в лаборатории, так и в сопутствующем режиме во время экспериментов, при этом результаты согласовывались и оставались стабильными с течением времени.

Основные результаты, составляющие материал настоящей работы, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

1. Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 15 – 19 February 2016.
2. CERN-BINP Workshop for Young Scientists in e+e- Colliders, Geneva, Switzerland, 22 – 25 August 2016.
3. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-2017), Novosibirsk, Russia, 27 February – 3 March 2017.
4. Frontier Detectors for Frontier Physics, Isola d'Elba, Italy, 27 May – 2 June 2018.
5. Joint Workshop on Future Tau-Charm Factory, Orsay, France, 4 – 7 December 2018.
6. Intern. Workshop on e+e- collisions from Phi to Psi (PHIPSI-2019), Novosibirsk, Russia, 25 Feb – 1 March 2019.
7. Micro Pattern Gaseous Detectors Conference (MPGD-2019), La Rochelle, France, 5 – 10 May 2019.
8. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-2020), Novosibirsk, Russia, 24 – 28 February 2020.
9. RD51 collaboration meeting, Santiago de Compostela, Spain, 5 – 9 October 2020.
10. International Conference on Position Sensitive Detectors (PSD12), Birmingham, UK, 12 – 17 September 2021.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 6 публикациях, 6 из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Kudryavtsev V. N. Spatial resolution of the detectors based on Gas Electron Multipliers / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, nr. 05. – P. C05018. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05018>. – Дата публикации: 11.05.2020.
2. Kudryavtsev, V. N. Spatial resolution of triple-GEM detectors / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2019. – Vol. 936. – P. 482-484. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.140>. – Дата публикации: 21.08.2019.
3. Kudryavtsev, V. N. Limits of a spatial resolution of the cascaded GEM based detectors / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12, nr. 06. – P. C06015. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/C06051>. – Дата публикации: 19.06.2017.
4. Kudryavtsev, V. N. Study of spatial resolution of coordinate detectors based on Gas Electron Multipliers / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2017. – Vol. 845. – P. 289-292. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.66>. – Дата публикации: 15.06.2016.
5. Time Projection Chamber as Inner Tracker for Super Charm Tau factory at BINP / V. K. Vadakeppattu, A. V. Sokolov, L. I. Shekhtman, T. V. Maltsev. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, nr. 07 – P. C07021. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/C07021>. – Дата публикации: 14.07.2020.
6. Development of compact TPC for future Super Charm-Tau Factory detector / A. Sokolov, T. Maltsev, L. Shekhtman, V. K. Vadakeppattu. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2022. – Vol. 1040. – P. 167225. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167225>. – Дата публикации: 20.07.2022.

Личный вклад автора диссертации

Изложенные в работе результаты получены автором лично либо при его определяющем вкладе. Автором проведено численное моделирование процесса регистрации электронов детектором на основе трёхкаскадных ГЭУ и получены значения пространственного разрешения. Автор принимал участие в наборе экспериментальных данных на Тестовом пучке электронов ускорительного комплекса ВЭПП-4 и выполнял статистическую обработку полученных данных для измерения эффективности регистрации, коэффициента газового усиления и пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ. Автор построил моделирование работы внутреннего трекера детектора Супер Чарм-Тау Фабрики и рассчитал минимальный импульс, допускающий реконструкцию траектории пи-мезонов. Автор исследовал искажение траектории электронов ионизации за счёт объёмного заряда положительных ионов внутри время-проекционной камеры и вычислил параметры, обеспечивающие минимальные искажения.

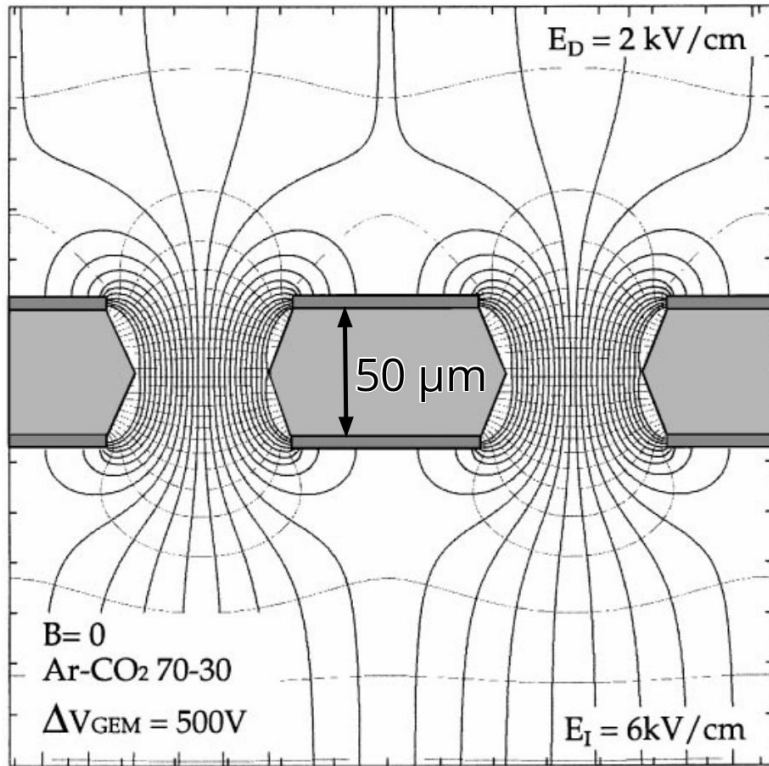
Вклад автора в опубликованные статьи по теме диссертации является определяющим.

Авторский вклад диссертанта в статьи 1 – 4 заключается в построении моделирования регистрации частиц детектором на основе ГЭУ и расчёте пространственного разрешения детекторов данного типа; в обработке экспериментальных данных и определении коэффициента усиления, эффективности регистрации и пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ.

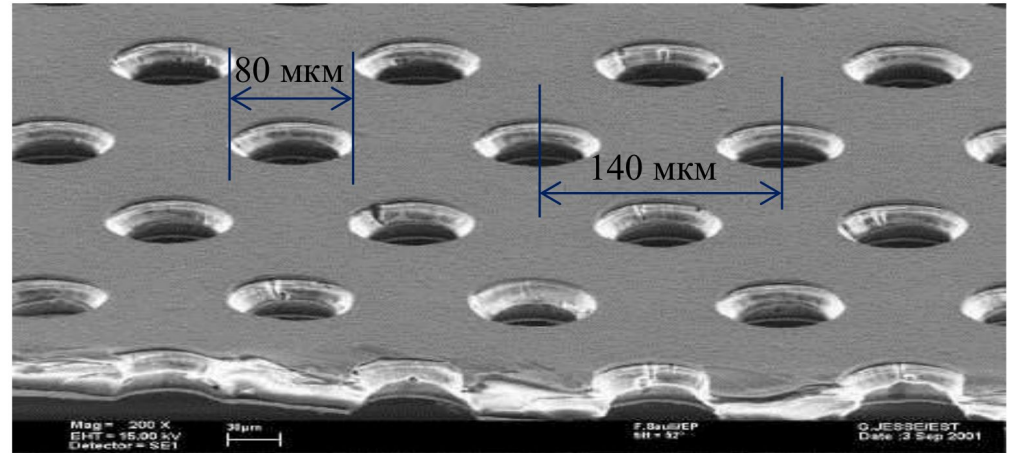
Авторский вклад диссертанта в статьи 5 – 6 заключается в моделировании искажения силовых линий электрического поля внутри время-проекционной камеры за счёт объёмного заряда положительных ионов.

Детекторы на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ)

Газовый электронный умножитель (ГЭУ)



S. Bachmann et al., Charge amplification and transfer processes in the gas electron multiplier, NIM A 1999, Vol. 438, P. 376–408.



Sauli, F. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications, NIM A 2016, Vol. 805. P. 2–24.

Диэлектрическая каптоновая плёнка толщиной $50 \mu\text{m}$, покрытая с двух сторон медью толщиной $5 \mu\text{m}$

Схема детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ



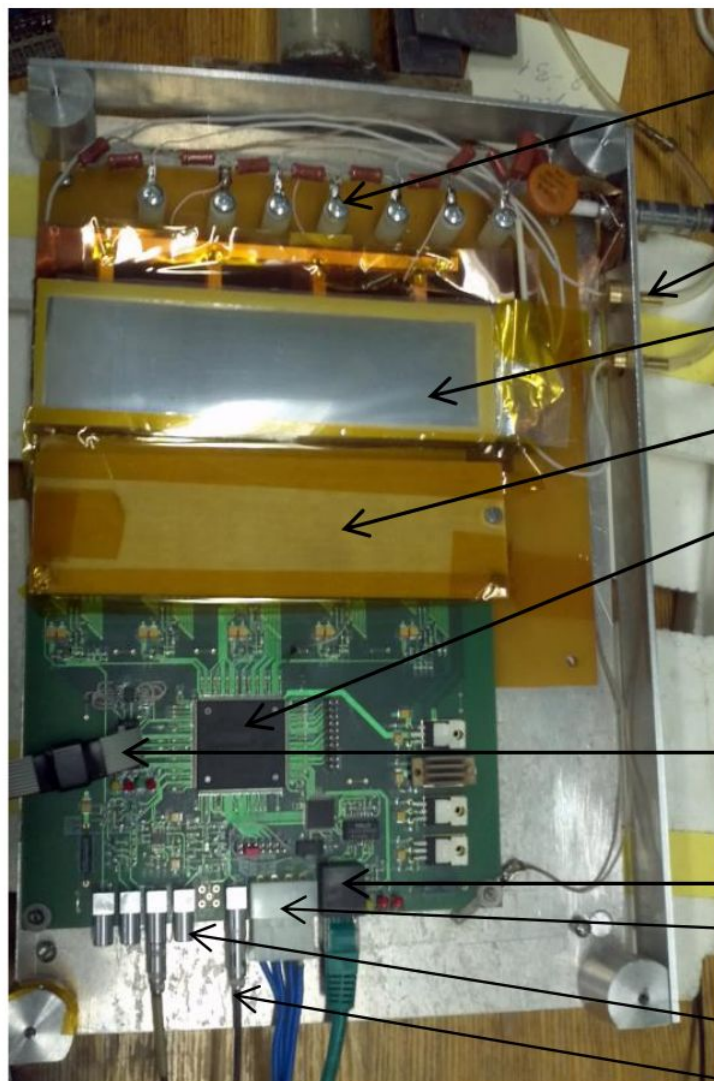
Детектор для установки ДЕЙТРОН (DEUTERON)

Название	Толщина [мм]	Поле [кВ/см]
Дрейфовый	3,0	3,0
Первый транспортный	1,5	3,0
Второй транспортный	1,5	3,0
Индукционный	2,0	5,0

Детектор для Тестового пучка (Test Beam Facility – TBF)

Название	Толщина [мм]	Поле [кВ/см]
Дрейфовый	4,5	1,5
Первый транспортный	1,0	3,5
Второй транспортный	1,0	3,5
Индукционный	2,0	3,5

Детектор на основе ГЭУ для установки ДЕЙТРОН



Высоковольтные делители напряжения
(3000 – 4000 В)

Газовая система Ar(75%) – CO₂(25%)

Активная область 160 мм × 40 мм

Бескорпусные чипы APC128 (закрыты)

FPGA Altera Cyclone III

Интерфейс загрузки программы для FPGA

Порт Ethernet 100 Мбит

Электропитание, ±5 В

Вход фазы (L0)

Вход триггера (L1)

Считывающая структура детекторов

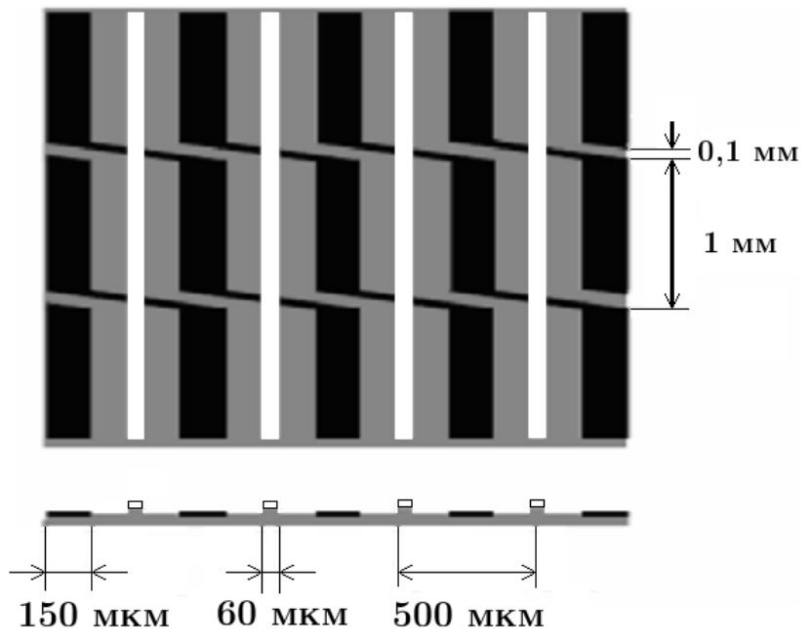
Детектор для установки ДЕИТРОН

Размер регистрирующей области
160 мм × 40 мм

Считывающая структура содержит
320 прямых и 320 наклонных полосок

Шаг прямых полосок 500 мкм

Верхний слой обозначен белым
цветом, нижний слой – чёрным



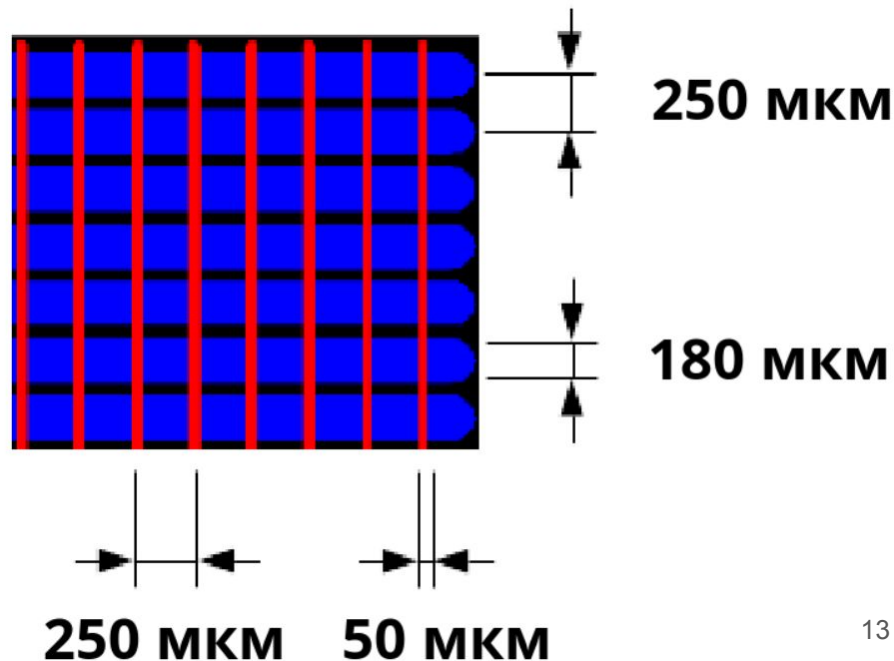
Детектор для Тестового пучка

Размер регистрирующей области
128 мм × 64 мм

Считывающая структура содержит
512 X-полосок и 256 Y-полосок

Шаг полосок 250 мкм

Верхний слой – красные полоски,
нижний слой – синие полоски



Коэффициент усиления и эффективность детекторов

Два детектора на основе ГЭУ для установки ДЕЙТРОН в полной комплектации на Тестовом пучке электронов ВЭПП-4



Коэффициент газового усиления

Коэффициент газового усиления – это отношение количества электронов на выходе усиливающего каскада к количеству электронов на его входе. Коэффициент газового усиления ($Gain$) рассчитывался на основе среднего по событиям сигнала Q [единицы АЦП].

$$Gain = \frac{K_{calib} \cdot Q}{N_{thermal}}$$

Детектор	d [мм]	$N_{thermal}, e $
DEUTERON	3,0	28
TBF	4,5	42

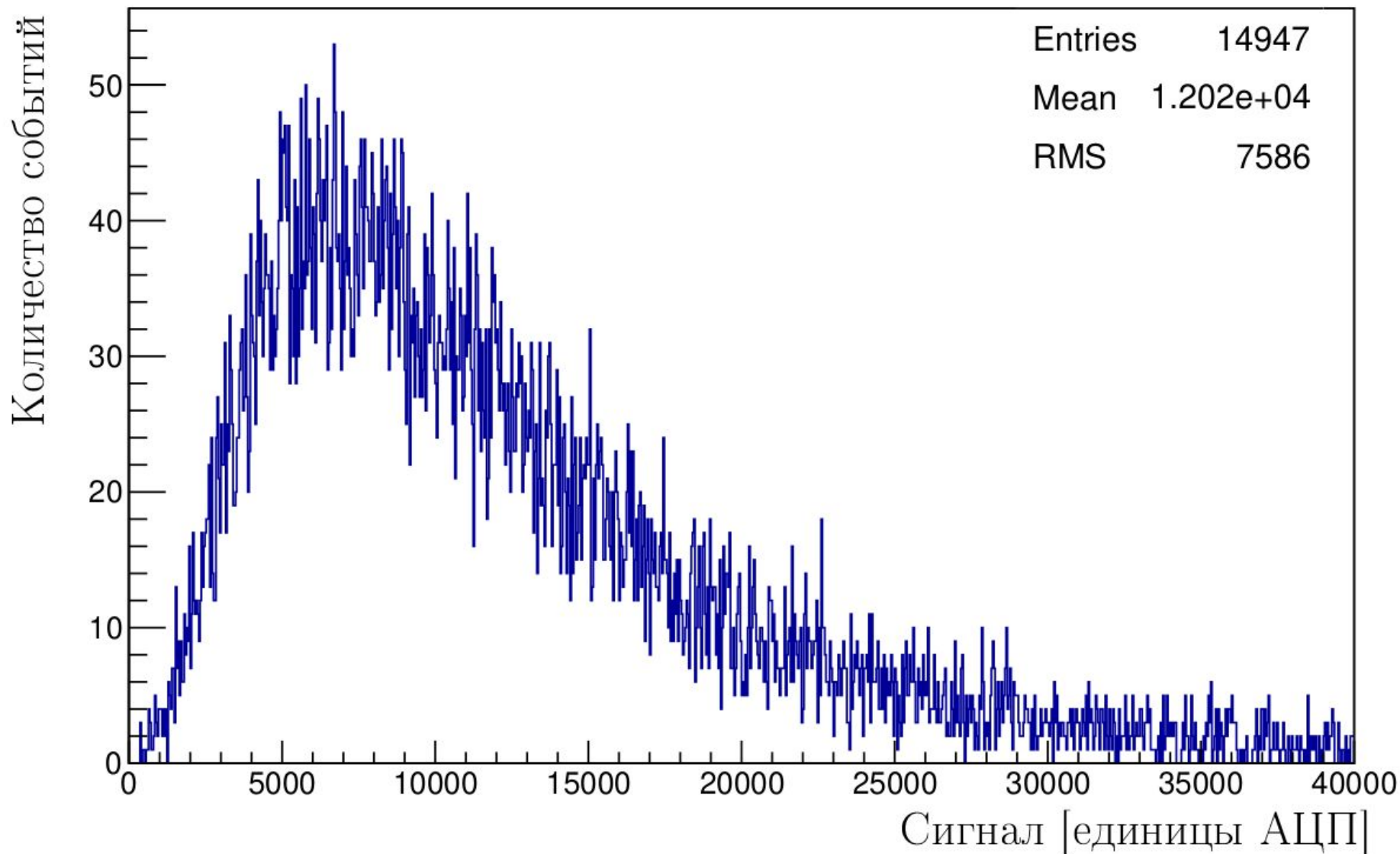
Детектор	$K_{calib}, \frac{ e }{\text{ед. АЦП}}$
DEUTERON	114
TBF	162

Расчётное количество электронов ионизации в дрейфовом промежутке детекторов разных типов, d – толщина дрейфового промежутка.

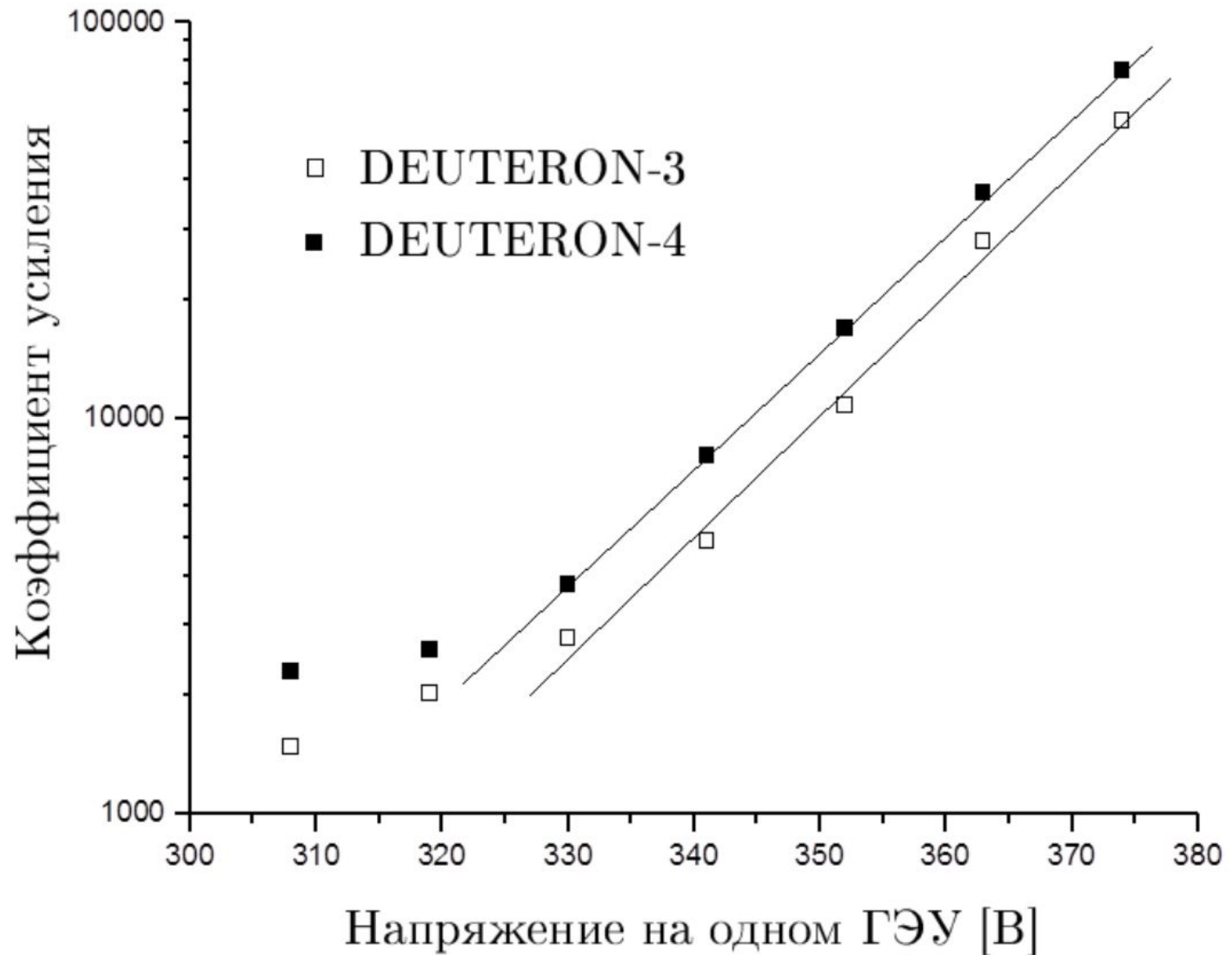
Калибровочная константа для перевода единиц АЦП в количество электронов

Пример распределения событий по сигналу с детектора

Детектор TBF1



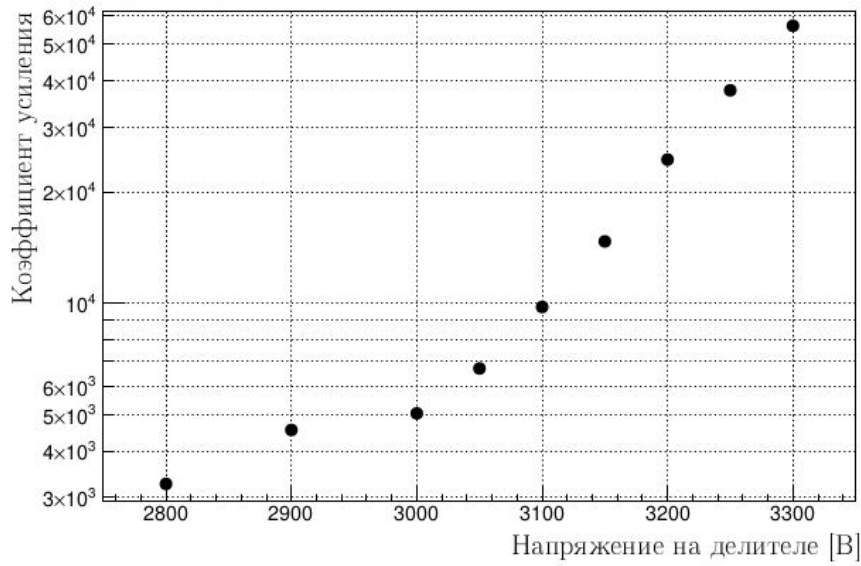
Коэффициент усиления детекторов для установки ДЕЙТРОН



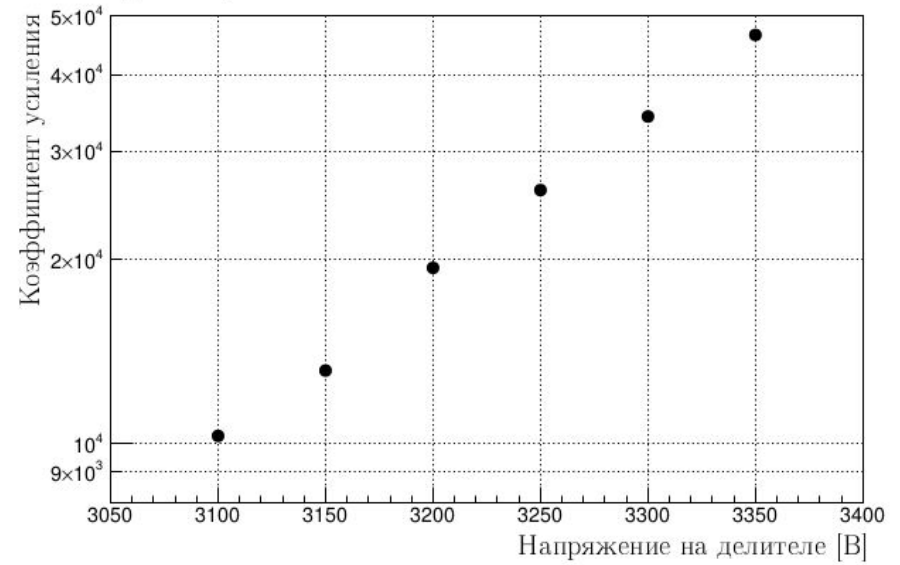
Коэффициент усиления детекторов для Тестового пучка

Напряжение на одном ГЭУ = Напряжение на делителе / 9

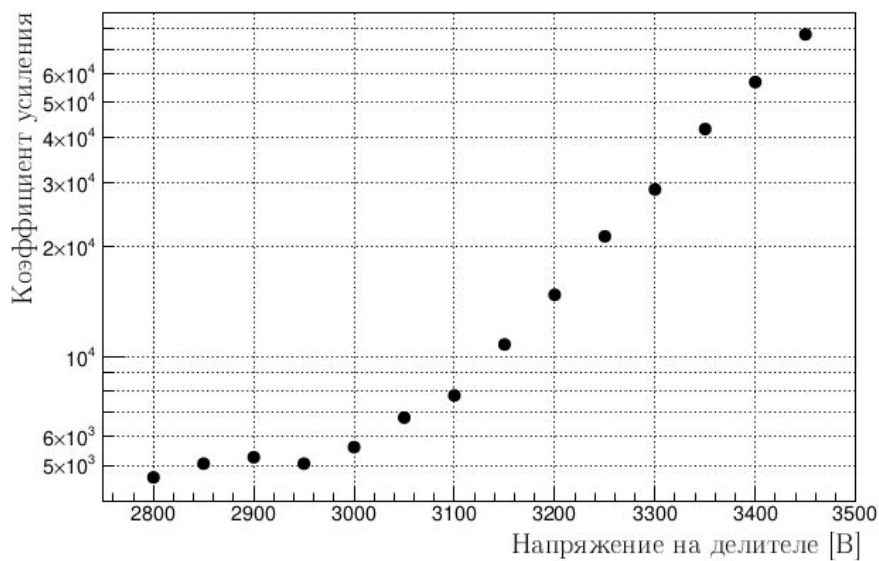
Детектор TBF0



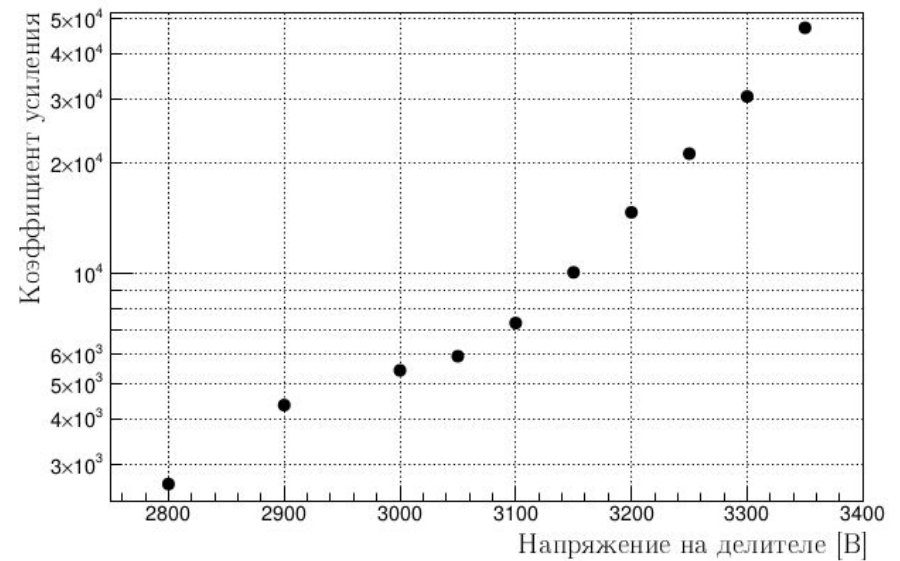
Детектор TBF1



Детектор TBF2

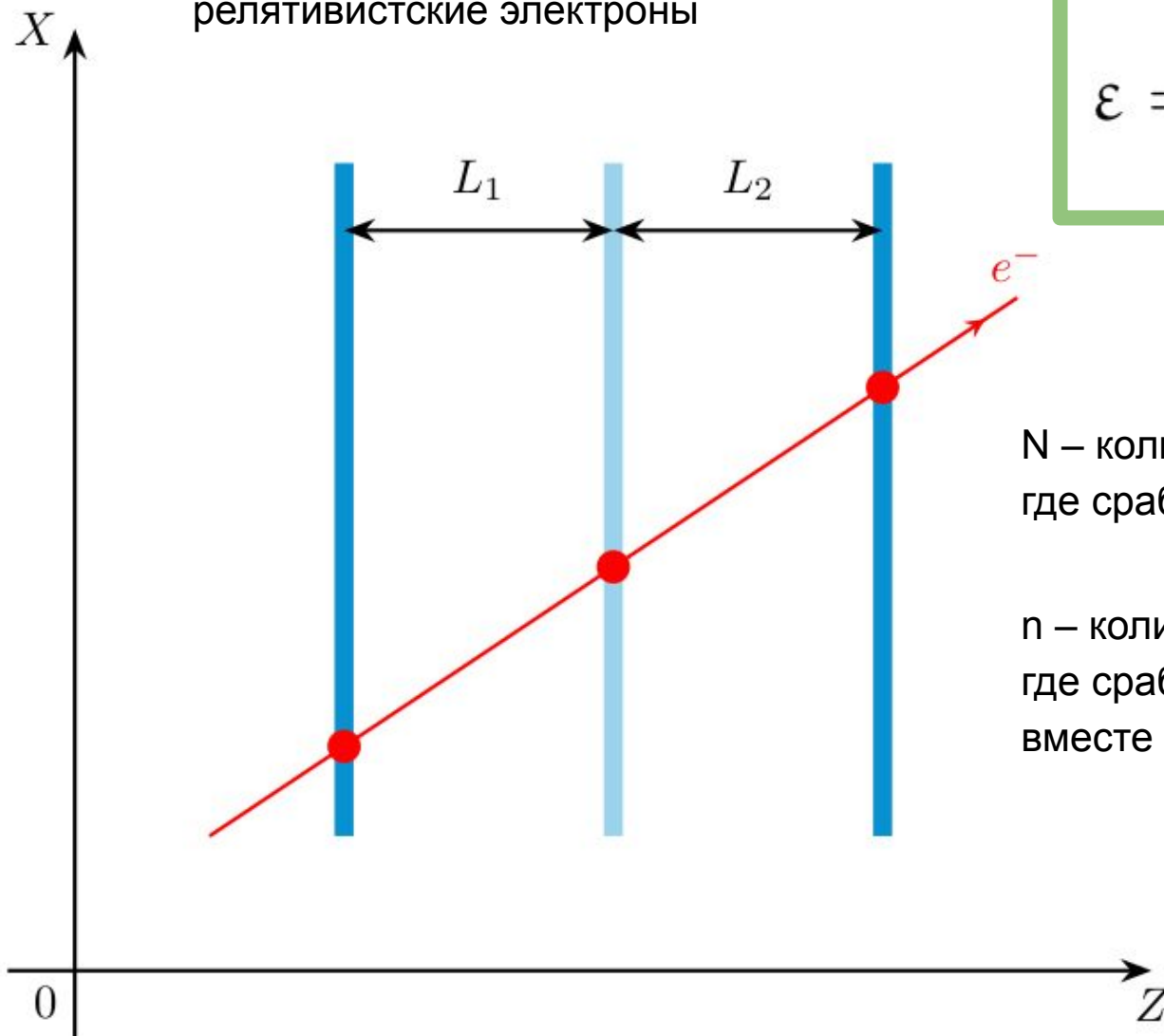


Детектор TBF3



Эффективность регистрации частиц

В данной работе регистрировались релятивистские электроны

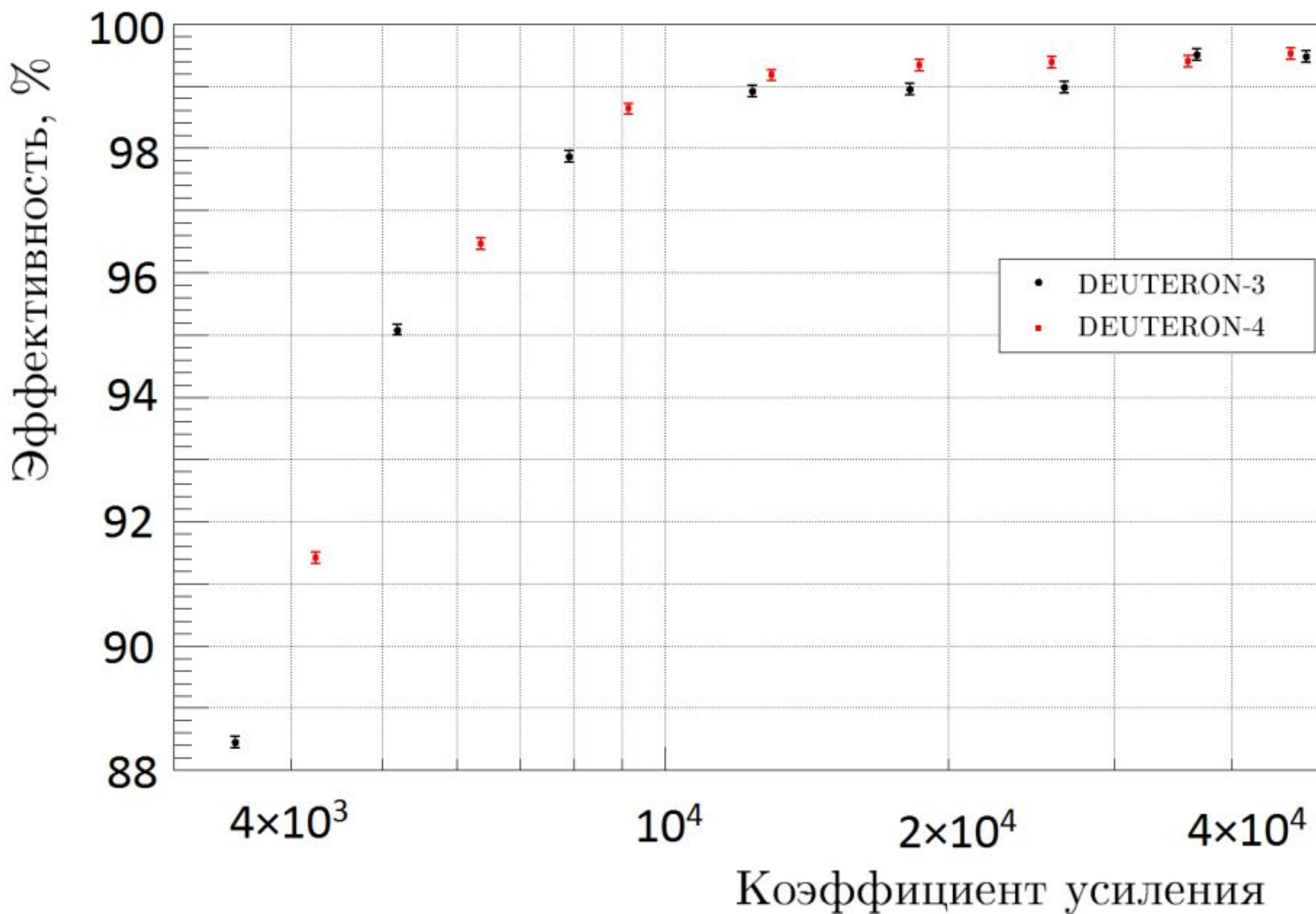


$$\varepsilon = \frac{n}{N} \pm \frac{\sqrt{N - n}}{N}$$

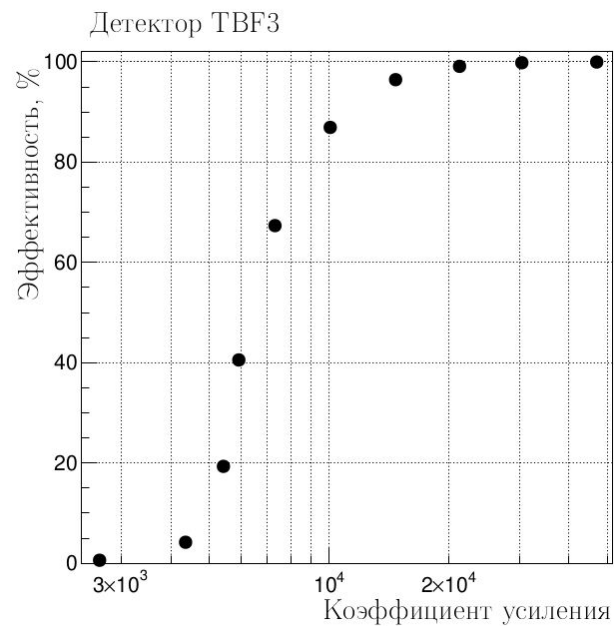
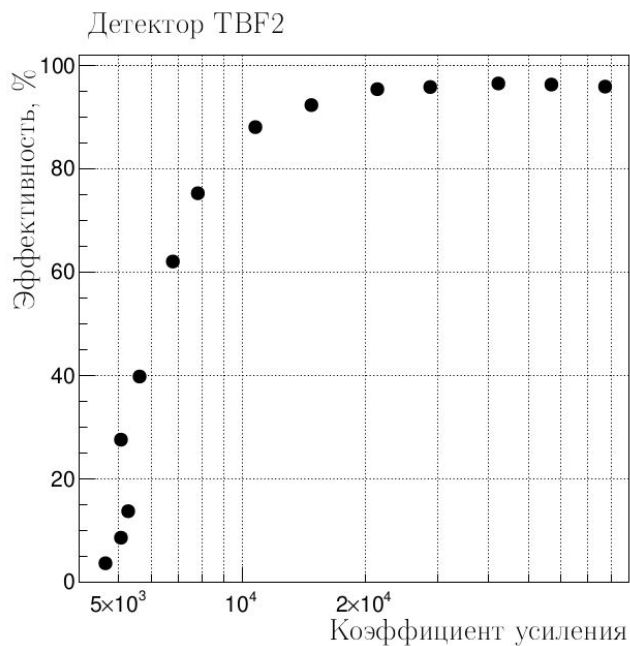
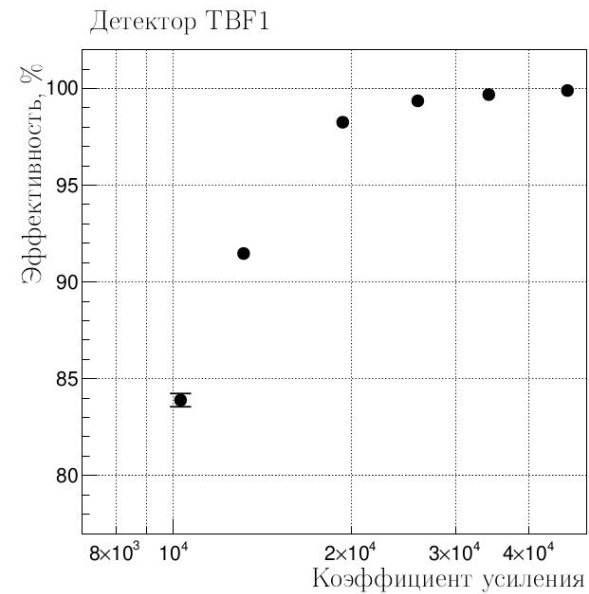
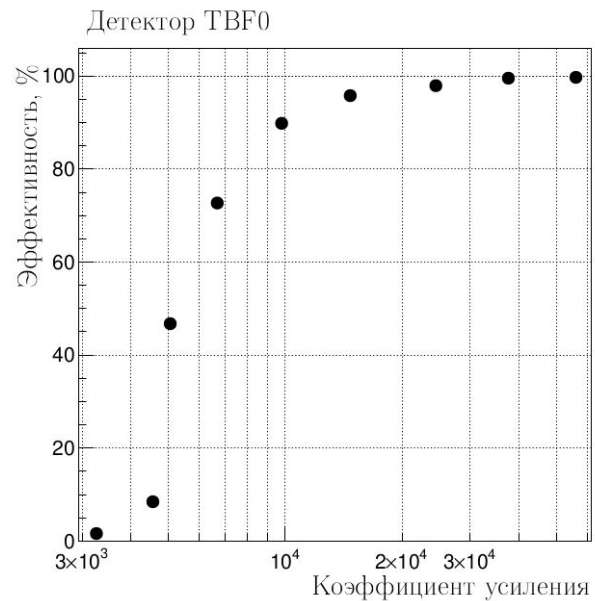
N – количество событий, где сработали трековые детекторы

n – количество событий, где сработали трековые детекторы вместе с изучаемым детектором

Эффективность детекторов для установки ДЕЙТРОН

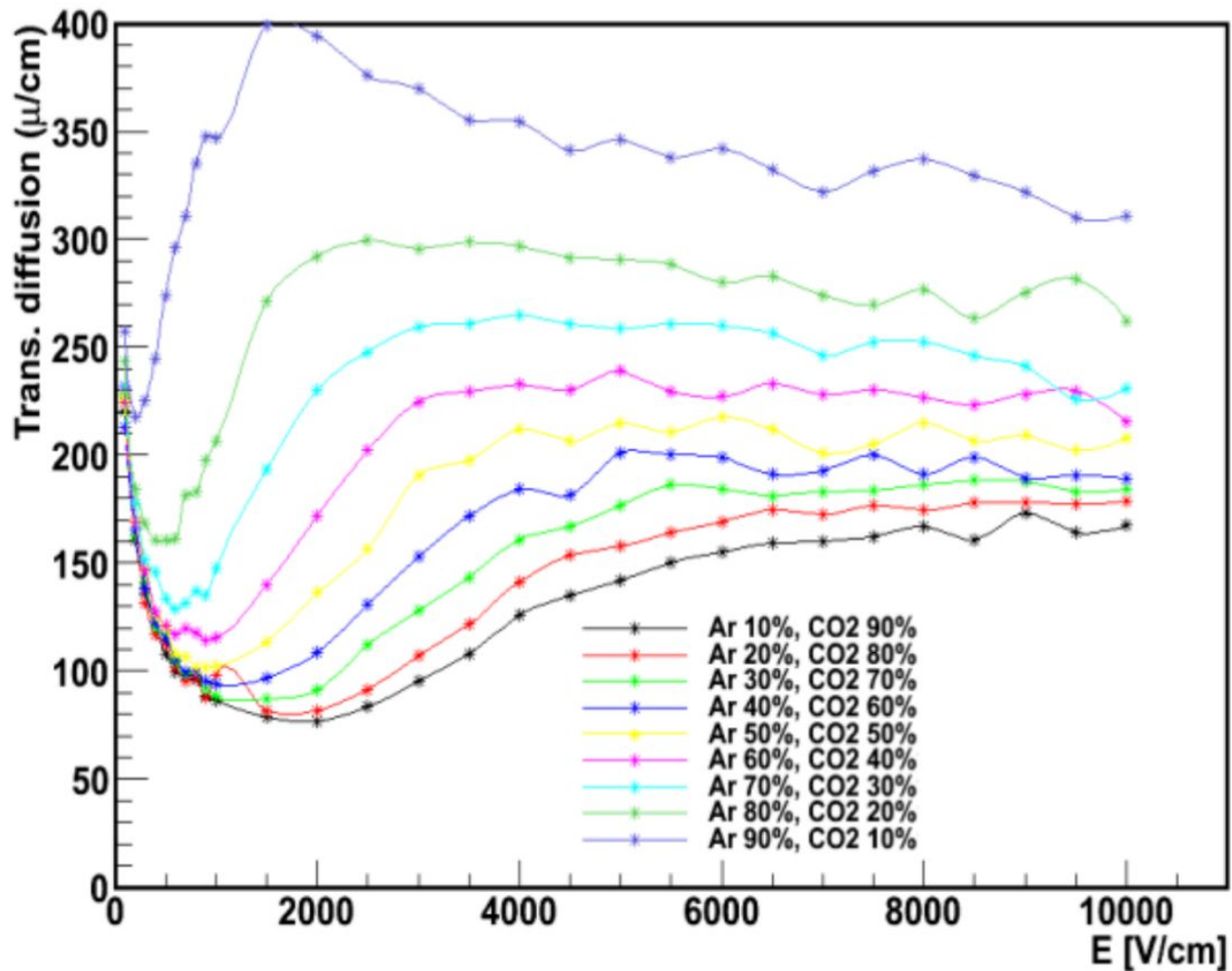


Эффективность детекторов для Тестового пучка



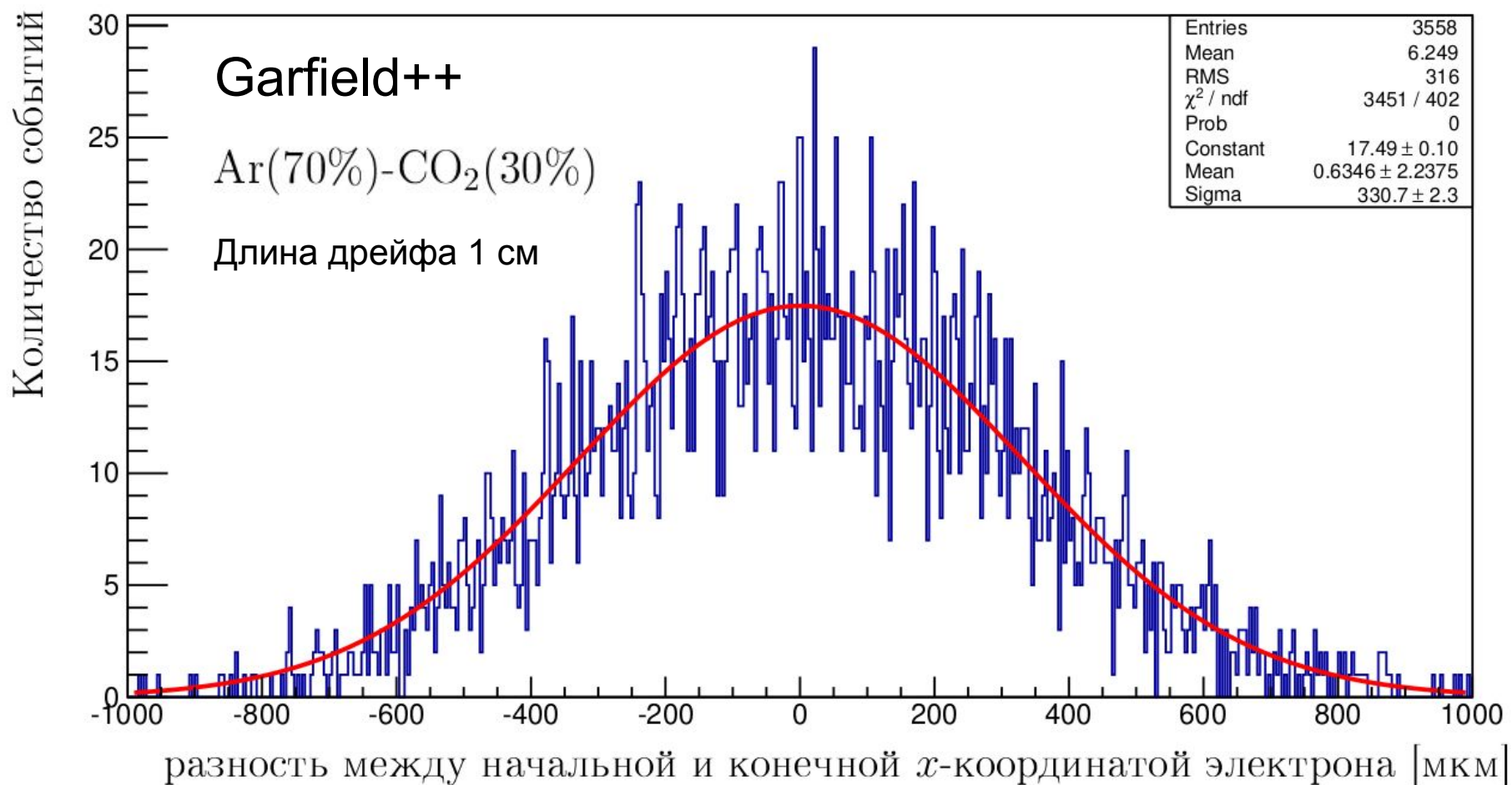
Моделирование диффузии и усиления электронов в детекторе

Зависимость коэффициента поперечной диффузии от электрического поля для разных концентраций в газовых смесях Ar-CO₂



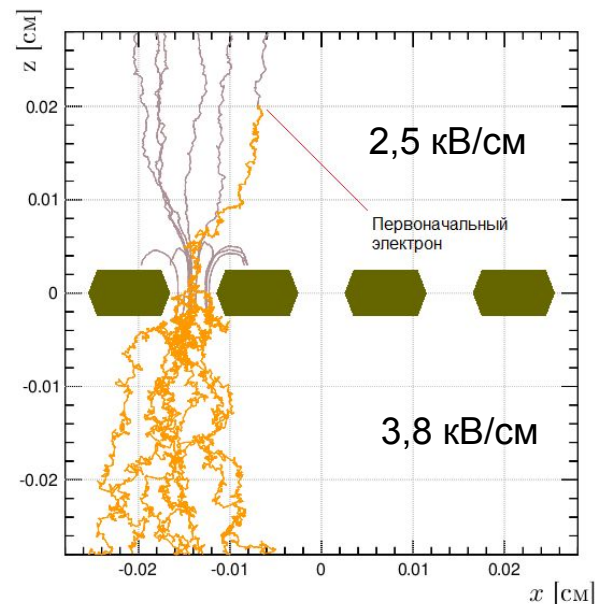
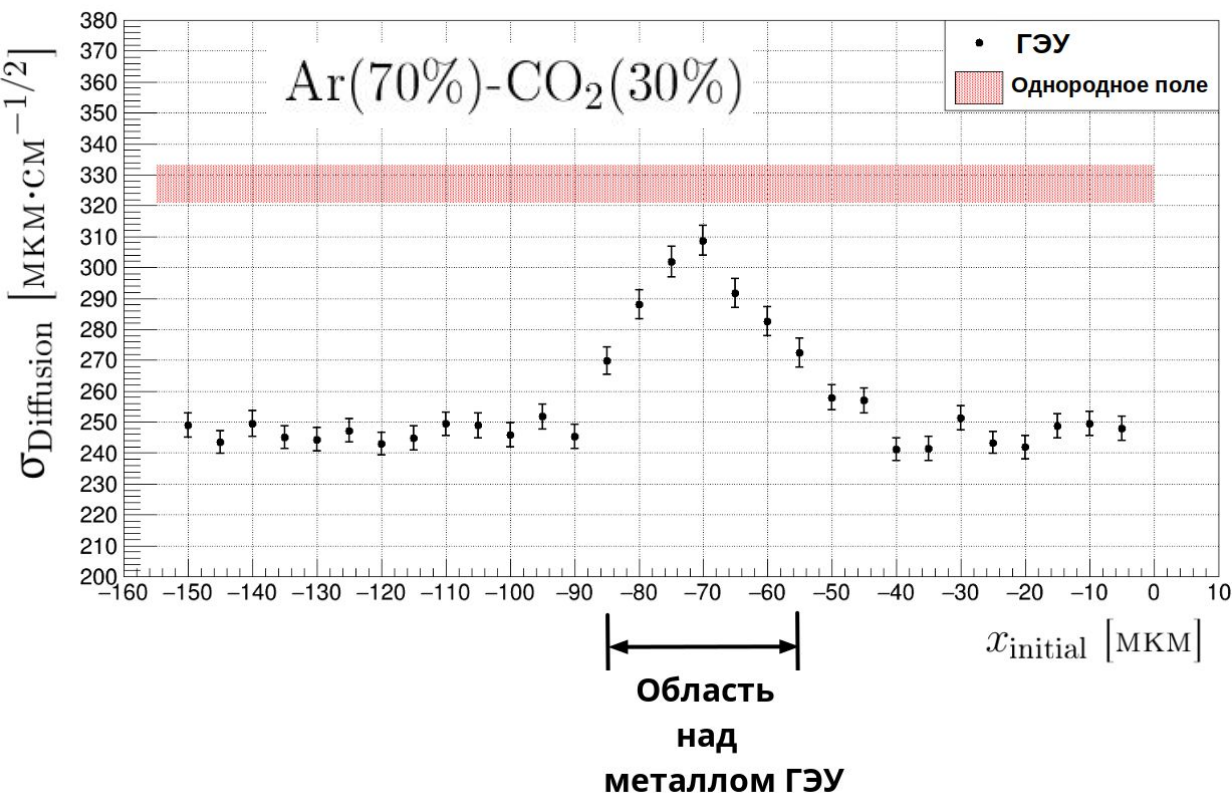
Y. Assran, A. Sharma, Transport properties of operational gas mixtures used at LHC, arXiv:1110.6761 — 2011.

Моделирование диффузии электрона в однородном поле 5 кВ/см



Коэффициент поперечной диффузии находится на уровне 320 – 330 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$

Моделирование диффузии и усиления электронов в программах ANSYS, Garfield++



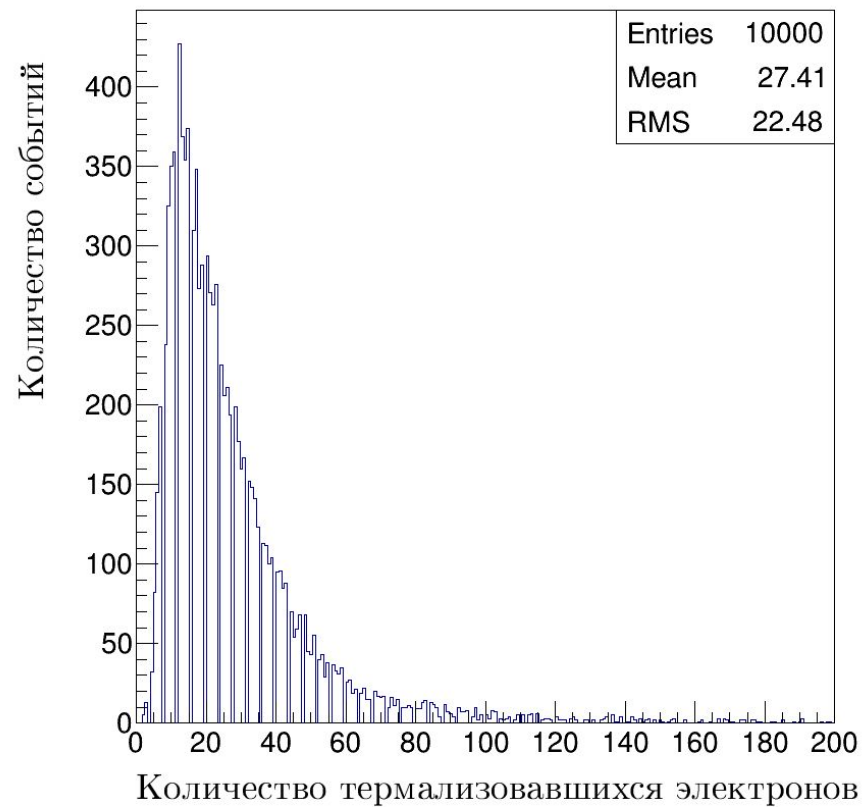
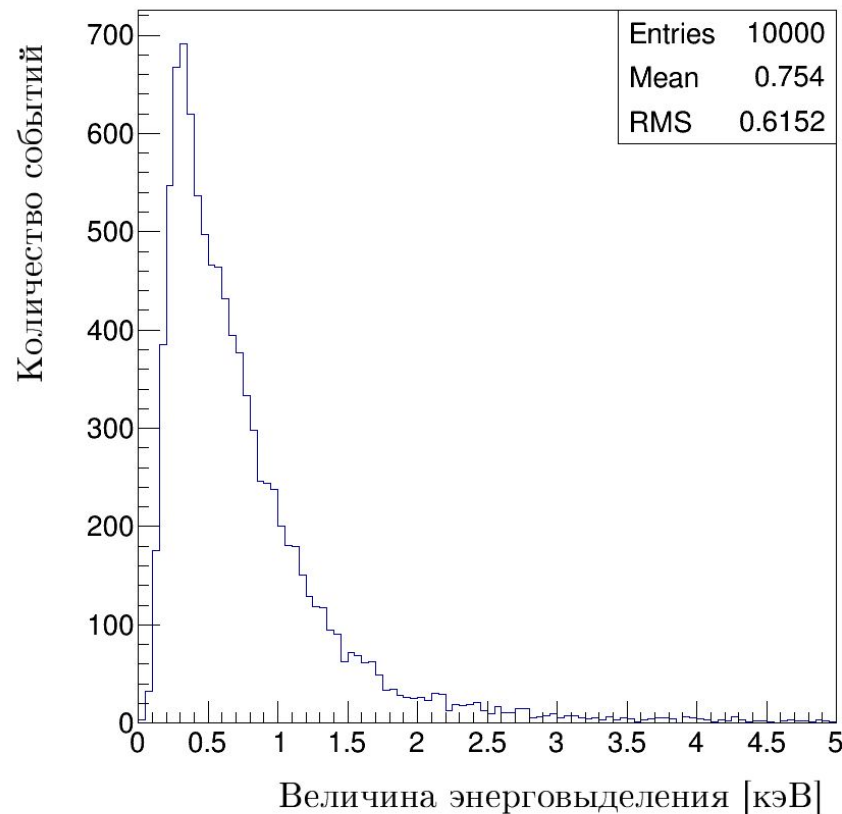
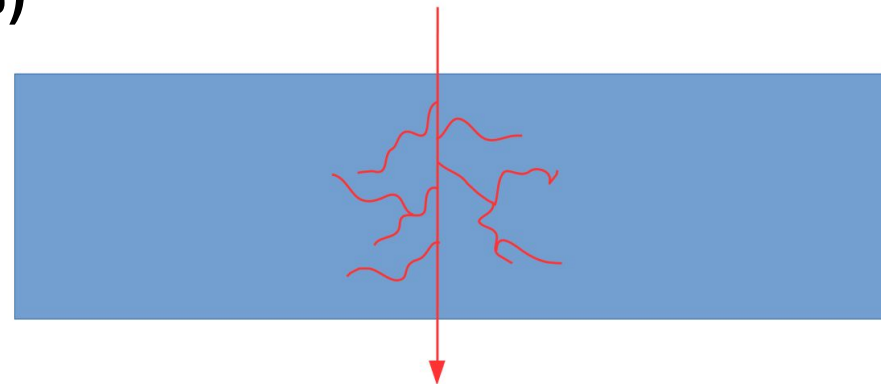
Развитие
электронной лавины
в отверстиях ГЭУ

Коэффициент эффективной поперечной диффузии для одного каскада ГЭУ находится в диапазоне 240 – 310 мкм/√см

Моделирование прохождения электронов с энергией 1 ГэВ через 3 мм газа Ar(70%)-CO₂(30%)

Программа HEED
(High Energy Electro-Dynamics)

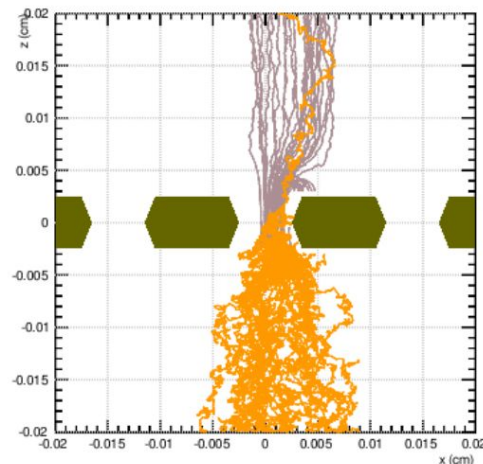
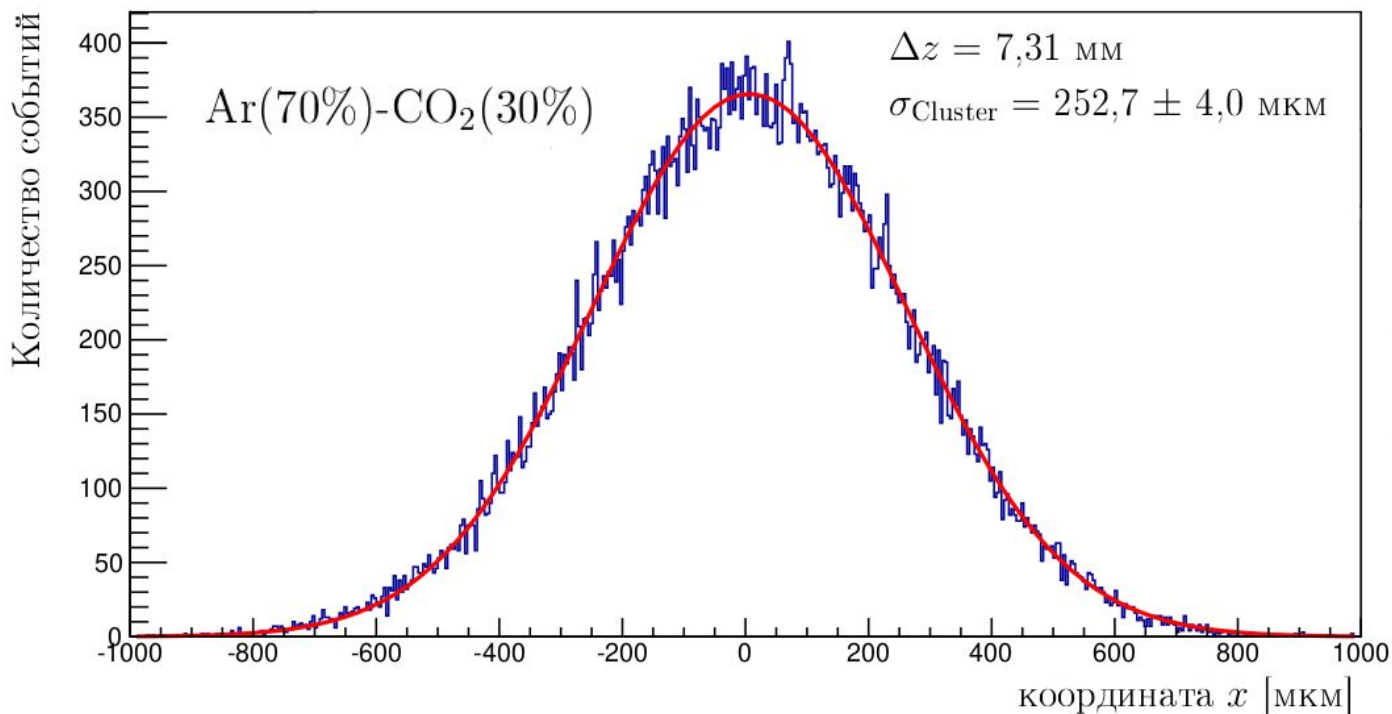
Распределения событий
по выделенной энергии в газовом промежутке
и по количеству термализовавшихся электронов



Транспорт электронов ионизации из моделирования HEED через тройной каскад ГЭУ, описанный в Garfield++ и ANSYS

Название промежутка	Толщина, мм	Электрическое поле, кВ/см
Дрейфовый	3	2,0
Первый транспортный	2	3,5
Второй транспортный	2	3,5
Индукционный	2	3,5

$$\sigma_{\text{Diffusion-3GEMs}} = 300 \pm 20 \frac{\text{МКМ}}{\sqrt{\text{СМ}}}$$



Результаты моделирования: распределение электронов на аноде по поперечной координате, возникшее при прохождении 50 термализовавшихся электронов через три каскада ГЭУ

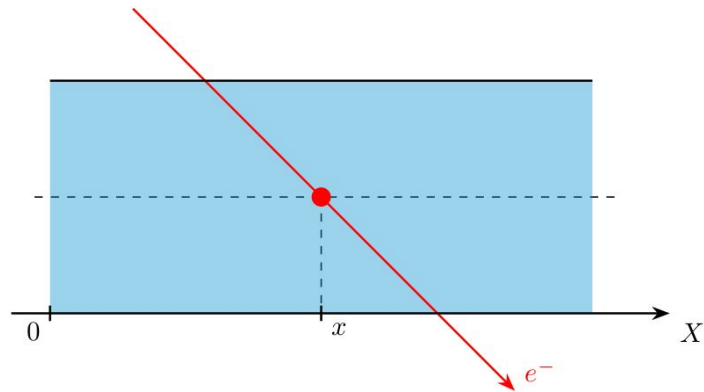
Пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ

Определение и метод измерения координаты трека

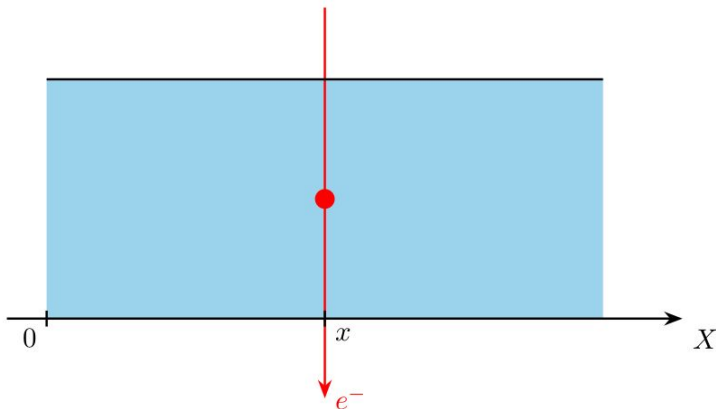
Трек – это траектория частицы в пространстве

Хит – это точка пересечения трека с плоскостью, параллельной считывающей структуре и делящей дрейфовый промежуток на две равные части

В данном контексте координата трека – это то же самое, что координата хита



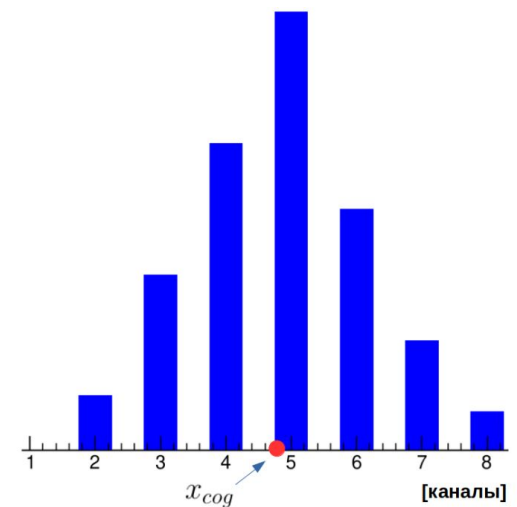
Наклонный
трек частицы



Ортогональный
трек частицы

Метод центра тяжести

$$x_{cog} = \frac{\sum_{i \in W} x_i \cdot Q_i}{\sum_{i \in W} Q_i}$$



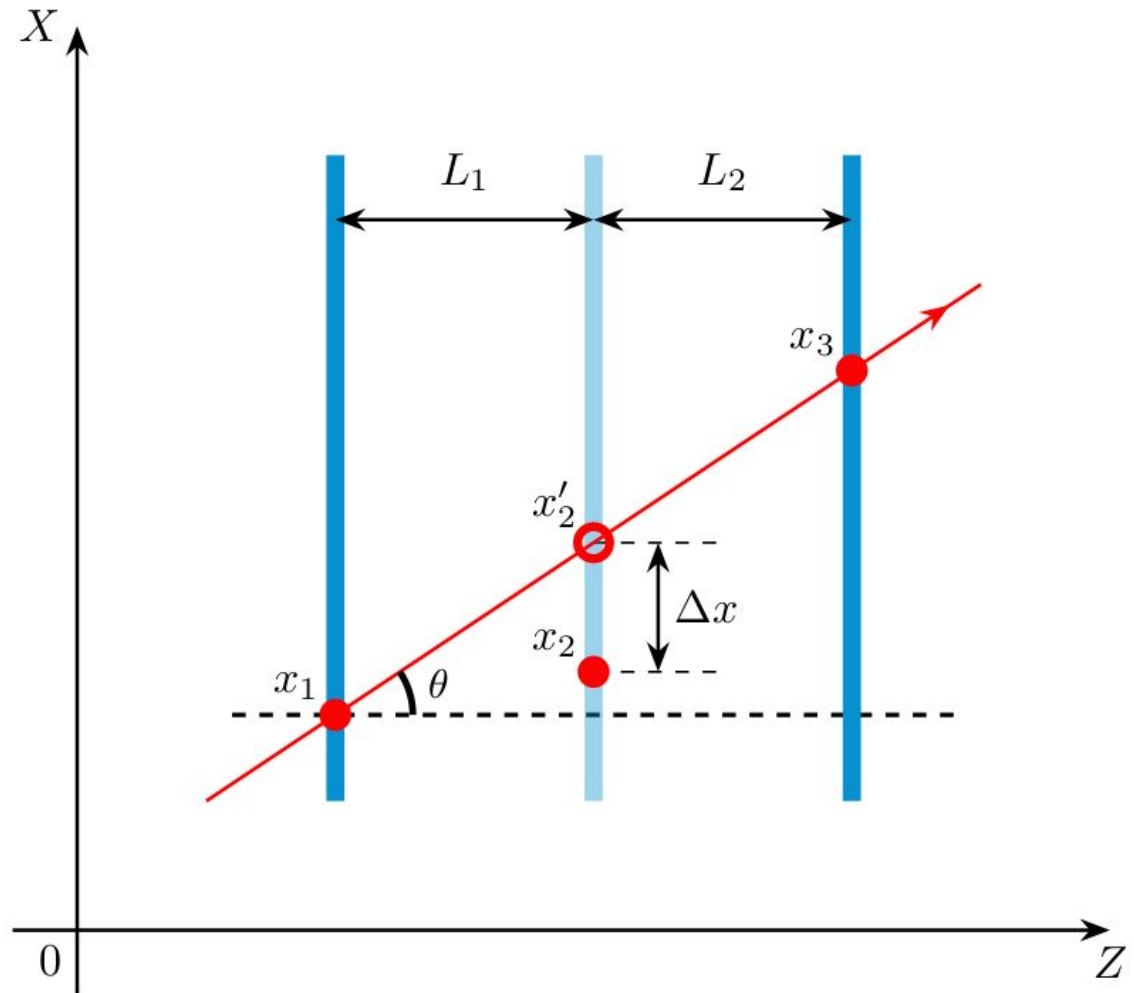
Определение и метод измерения пространственного разрешения

$$\Delta x = x'_2 - x_2$$

$$\lambda = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$

$$x'_2 = x_1 + \lambda \cdot (x_3 - x_1)$$

$$\sigma_{\Delta x} = \sigma_{xresid}$$



Вычитание вкладов физических эффектов для определения собственного разрешения детектора

Вклад многократного рассеяния в изучаемом детекторе

$$\sigma_{\theta MS} = \frac{13,6 \text{ МэВ}}{\beta_{cp} [\text{МэВ}]} \cdot \sqrt{\frac{X}{X_0}} \cdot \left[1 + 0,038 \cdot \ln \left(\frac{X}{X_0} \right) \right]$$

$$\sigma_{xMS} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \cdot \sigma_{\theta MS}$$

$$\lambda = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$

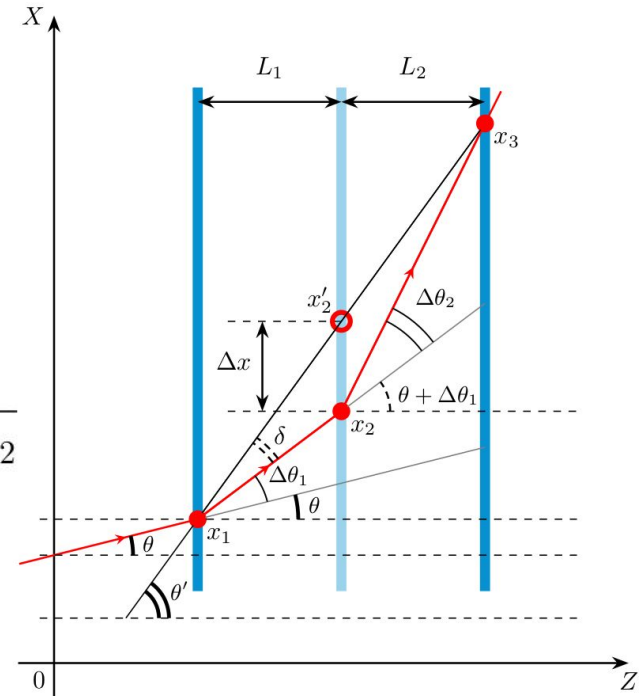
Вклад ограниченного пространственного разрешения трековых детекторов

$$\sigma_{xTrack}^2 = (1 - \lambda)^2 \cdot \sigma_{d1}^2 + \lambda^2 \cdot \sigma_{d3}^2$$

Данные физические эффекты искажают расчётную координату трека

Частный случай:
разрешение детекторов
и расстояние между
детекторами одинаковы

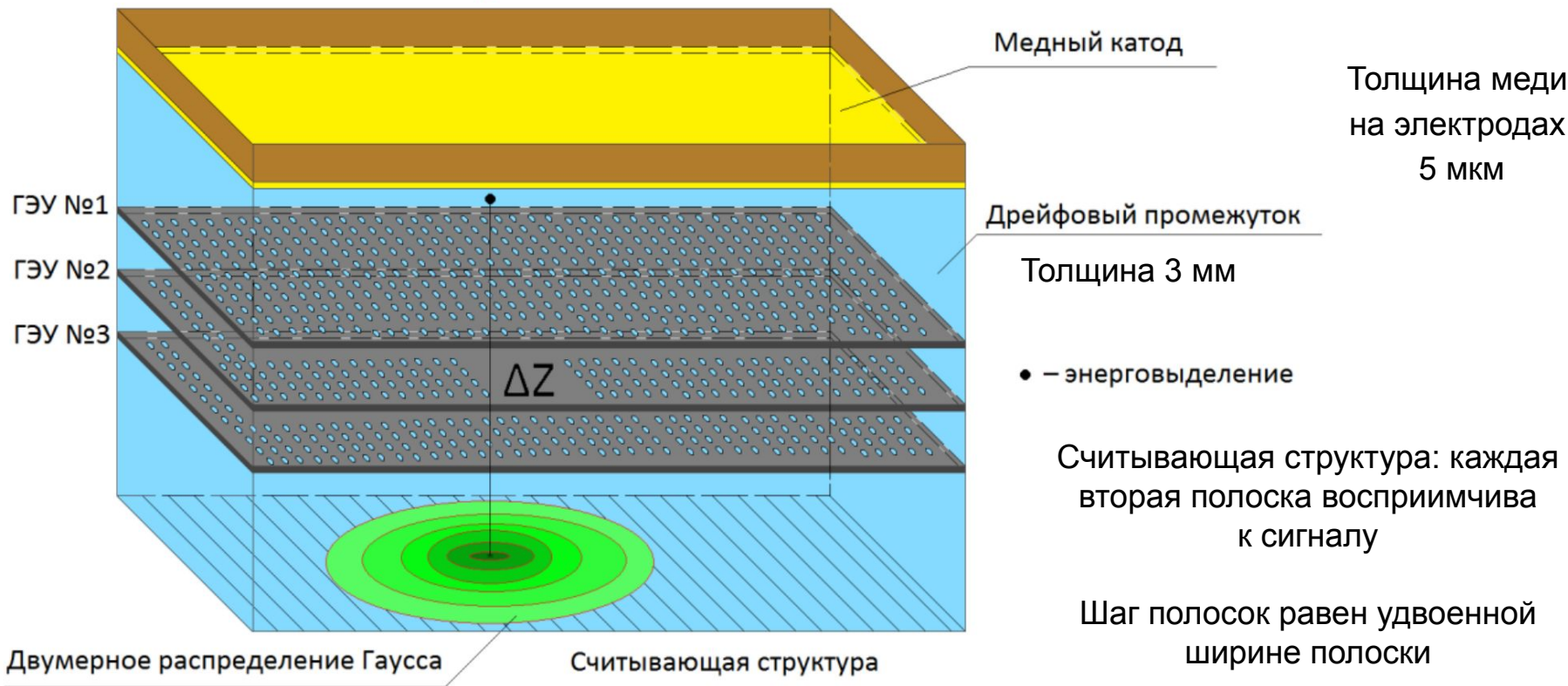
$$\sigma_{detector} = \frac{\sqrt{\sigma_{xresid}^2 - \sigma_{xMS}^2}}{\sqrt{3/2}}$$



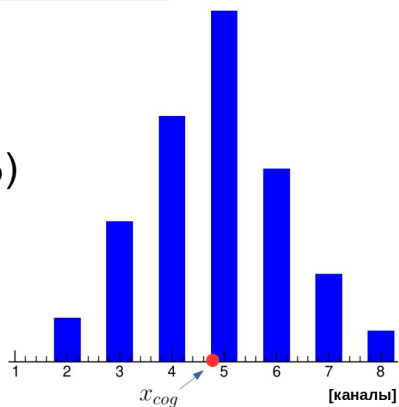
Детектор на основе трёхкаскадных ГЭУ

Электроны
1 ГэВ

Моделирование пространственного разрешения



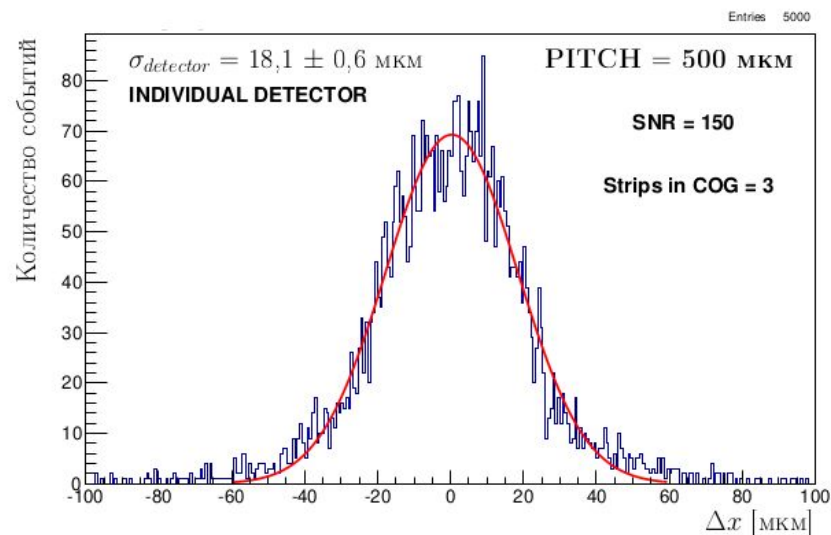
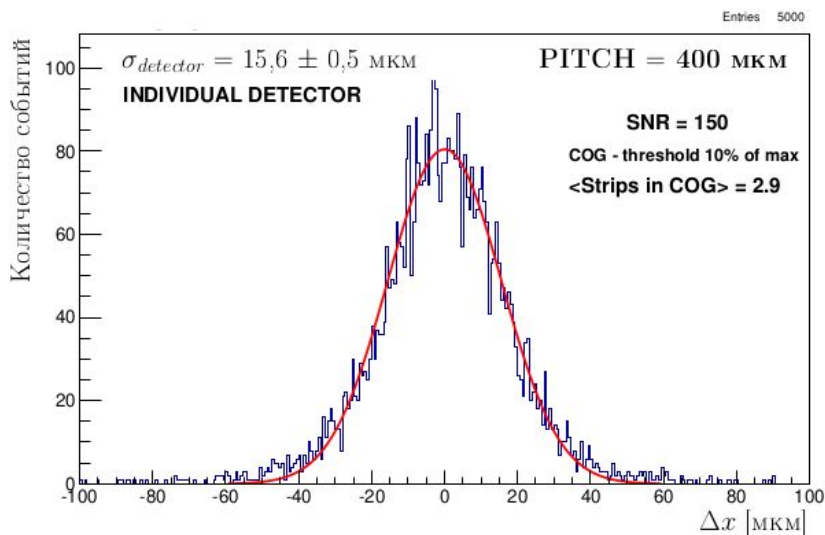
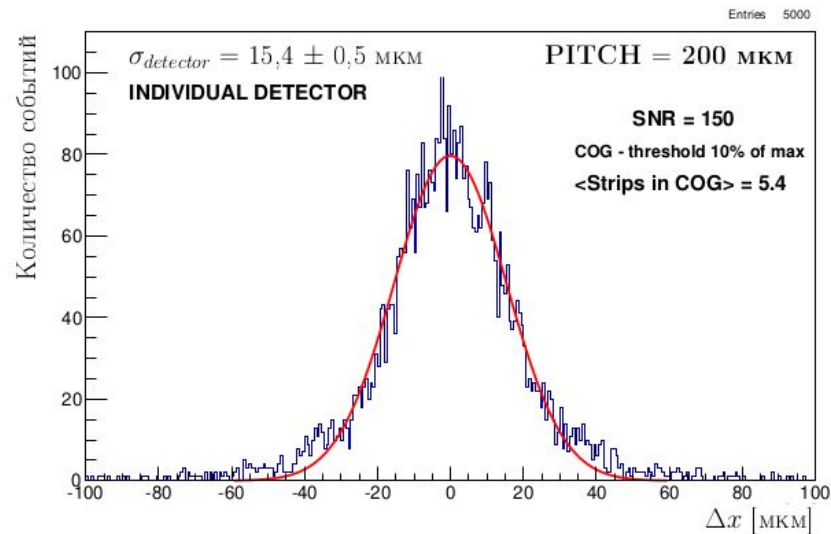
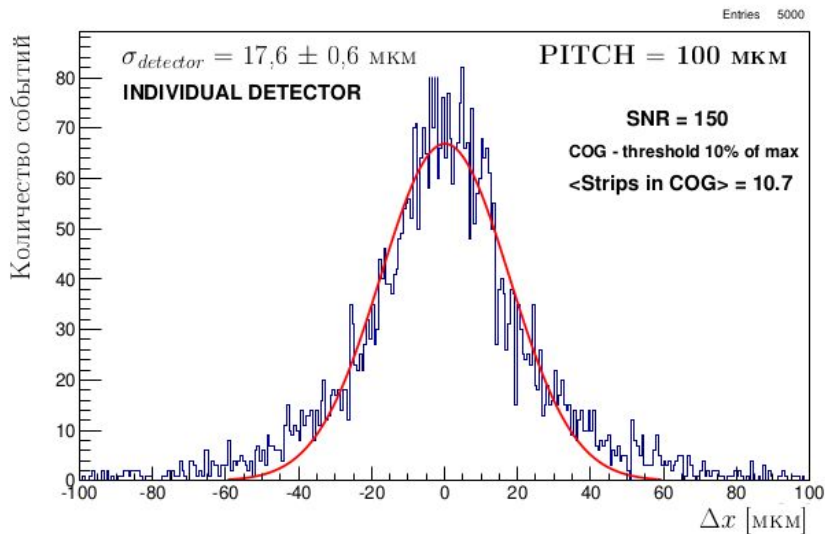
Рабочий газ
Ar(75%)-CO₂(25%)



Моделируемые явления :

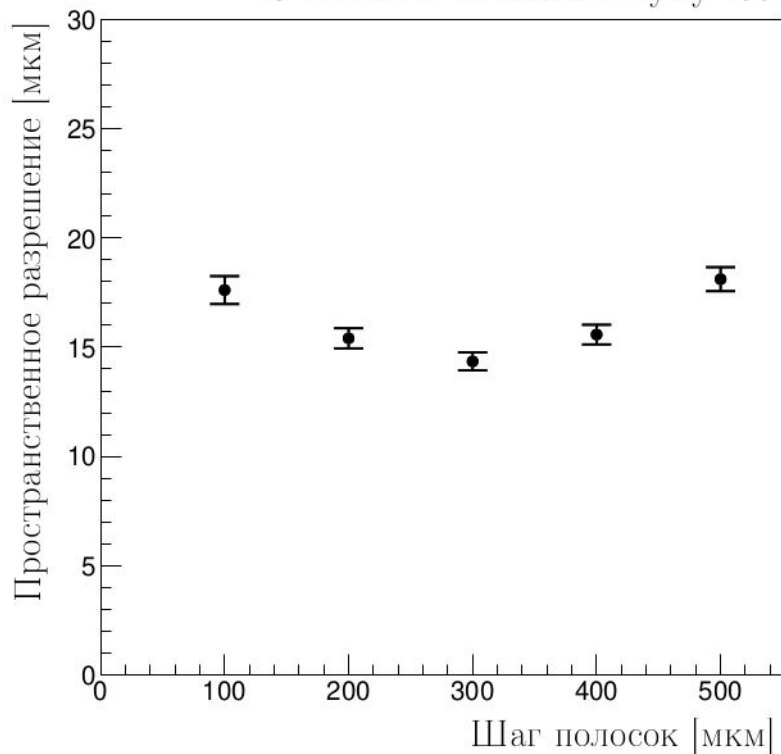
- распределение пучка электронов
- взаимодействие электронов с веществом (GEANT4)
- диффузия электронов в газе ($\sigma_{\text{Diffusion}} = 300 \text{ мкм} / \sqrt{\text{см}}$)
- флуктуации газового усиления (ПШПВ 30%)
- распределение сигнала по полоскам
- шумы электроники
- алгоритм центра тяжести

Результаты моделирования пространственного разрешения детектора в программе GEANT4

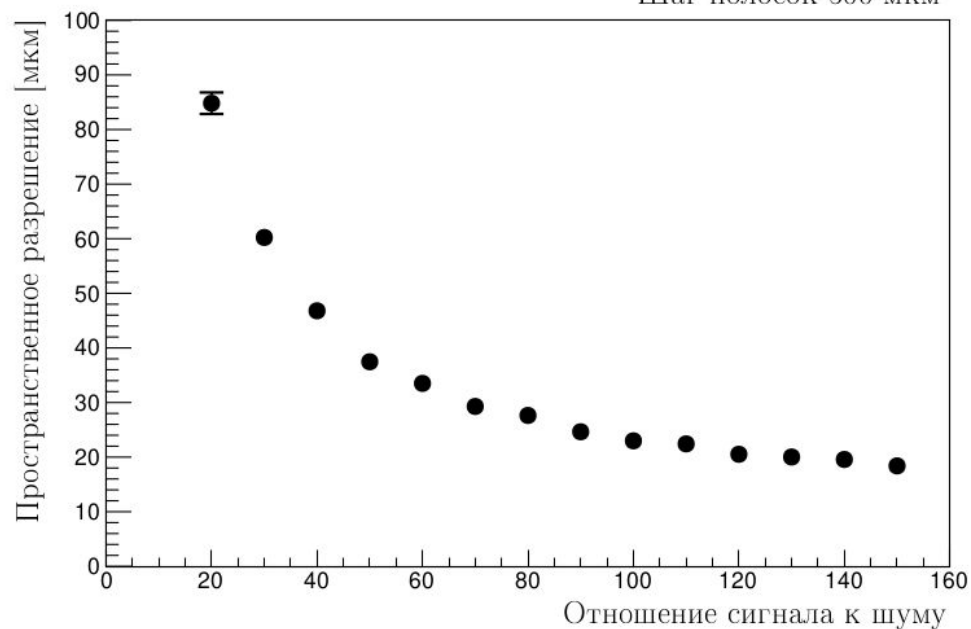


Результаты моделирования пространственного разрешения детектора в программе GEANT4

Отношение сигнала к шуму 150



Шаг полосок 500 мкм



Пространственное разрешение детектора при SNR=150 находится на уровне 15 – 20 мкм

Параметрическое моделирование

Модель явления на основе распределений Гаусса и Ландау.

Параметры модели подбирались из сравнения с наблюдаемыми экспериментальными данными.

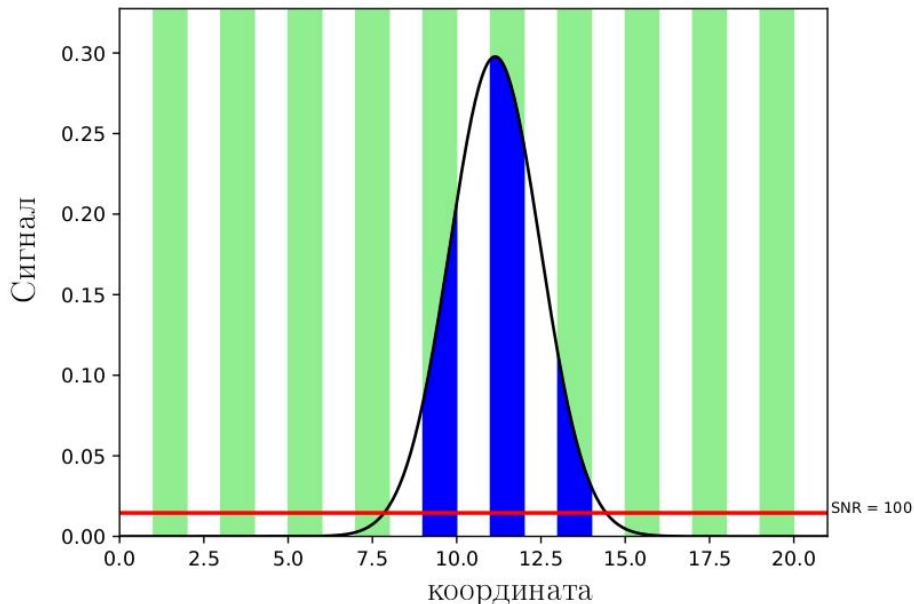
$$WPR = \frac{\text{cluster width}}{\text{strip pitch}}$$

Цели параметрического моделирования:

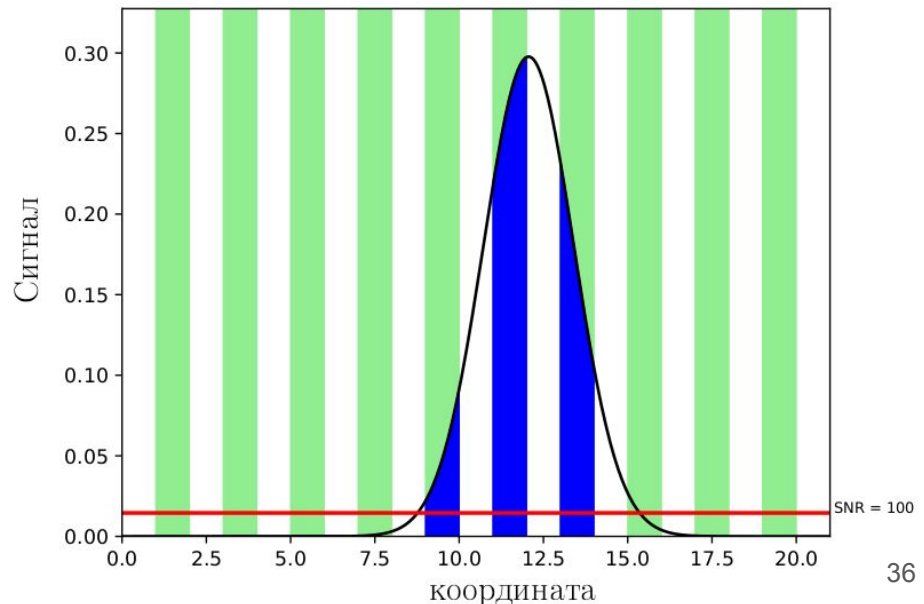
- дополнительная проверка моделирования в GEANT4;
- изучение эффекта дифференциальной нелинейности.

$$SNR = \frac{SIG_{max}}{\sigma_{Noise}}$$

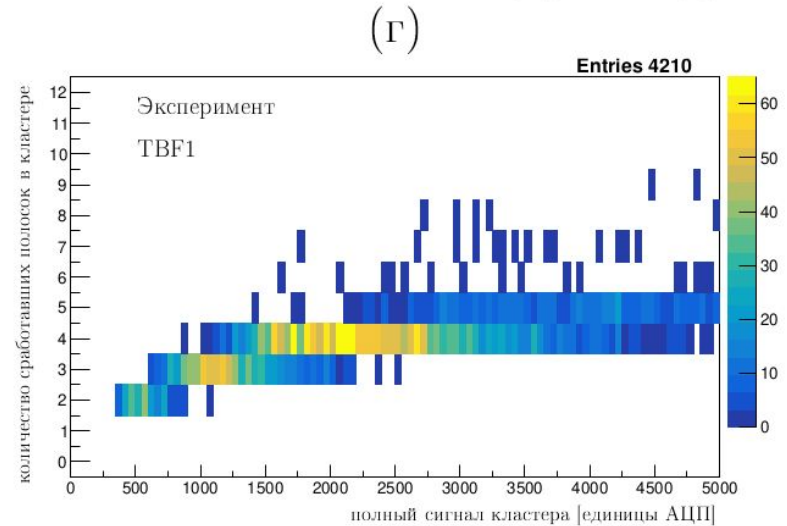
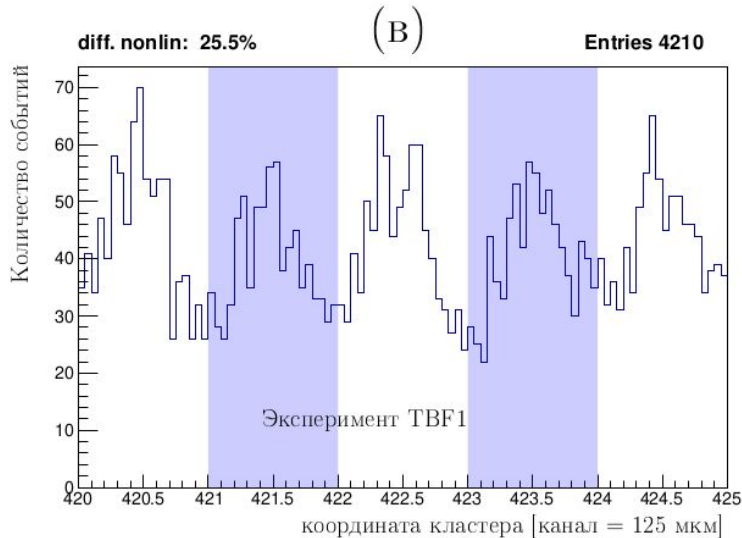
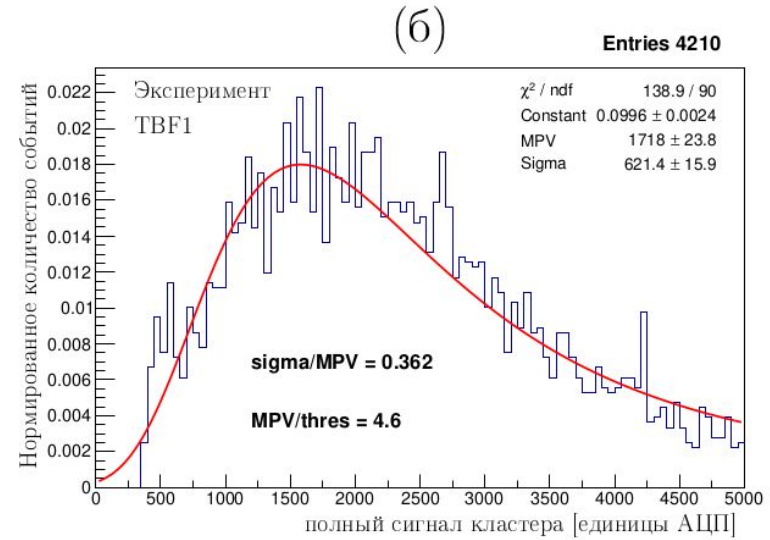
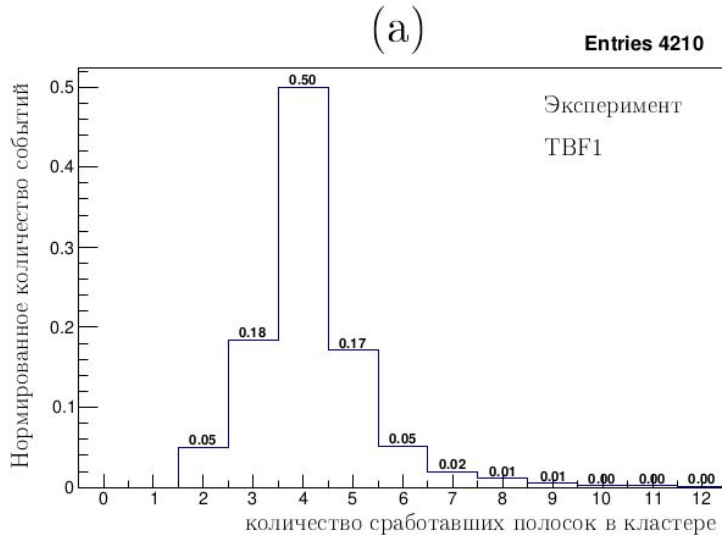
$$WPR = 0.67 \quad \begin{array}{l} x_{true} = 11.14 \\ x_{cog} = 11.19 \end{array} \quad x_{true} - x_{cog} = -0.05$$



$$WPR = 0.67 \quad \begin{array}{l} x_{true} = 12.06 \\ x_{cog} = 11.98 \end{array} \quad x_{true} - x_{cog} = 0.08$$



Параметрическое моделирование (экспериментальные данные)



Экспериментальные данные с детектора TBF1: (а) спектр сработавших полосок; (б) спектр сигнала; (в) распределение событий по восстановленной координате; (г) корреляция между количеством сработавших полосок и полным сигналом кластера

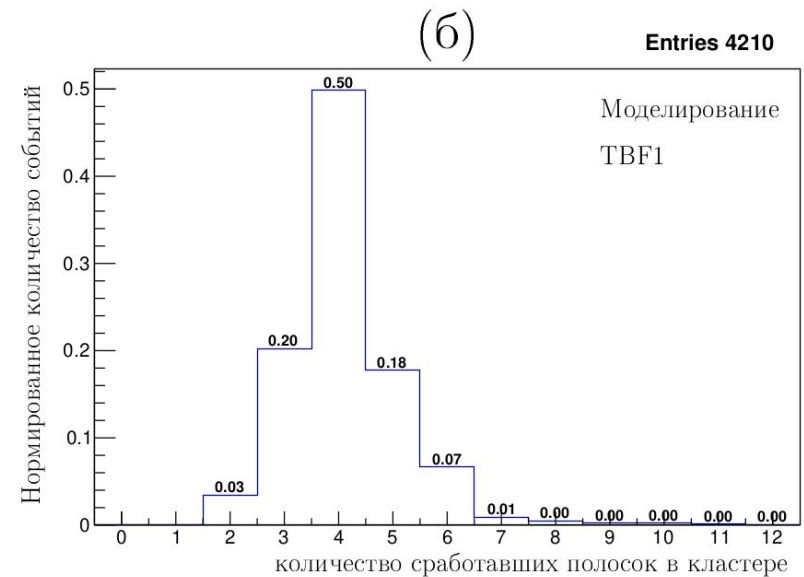
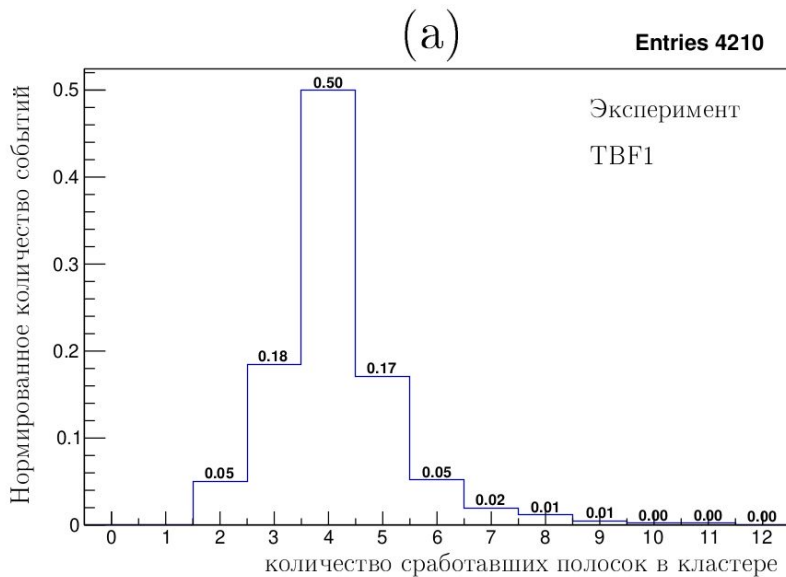
Параметрическое моделирование (эксп. и модел.)

На вход моделирования для каждого события были поданы следующие параметры:

- истинная координата кластера (x_{true});
- отношение ширины кластера к шагу полосок (WPR);
- отношение сигнала к шуму (SNR).

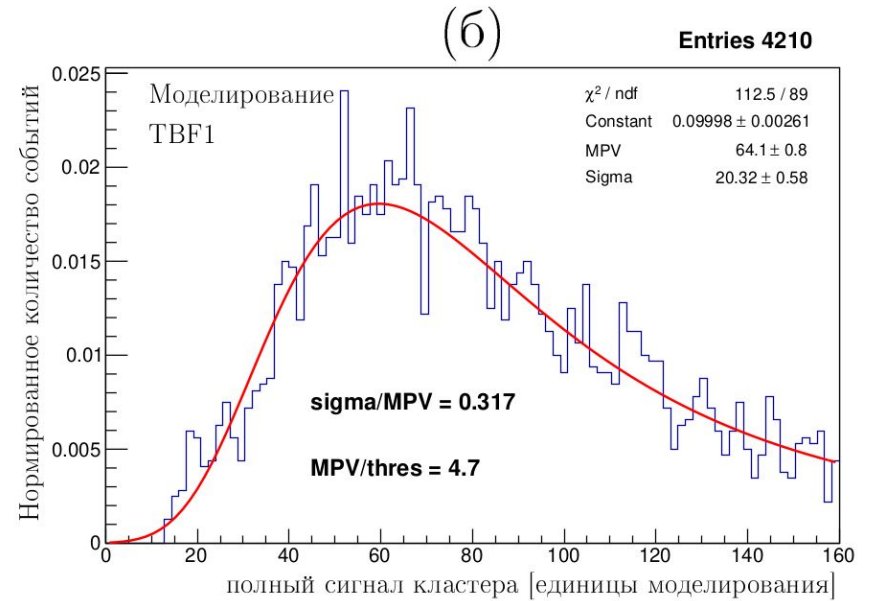
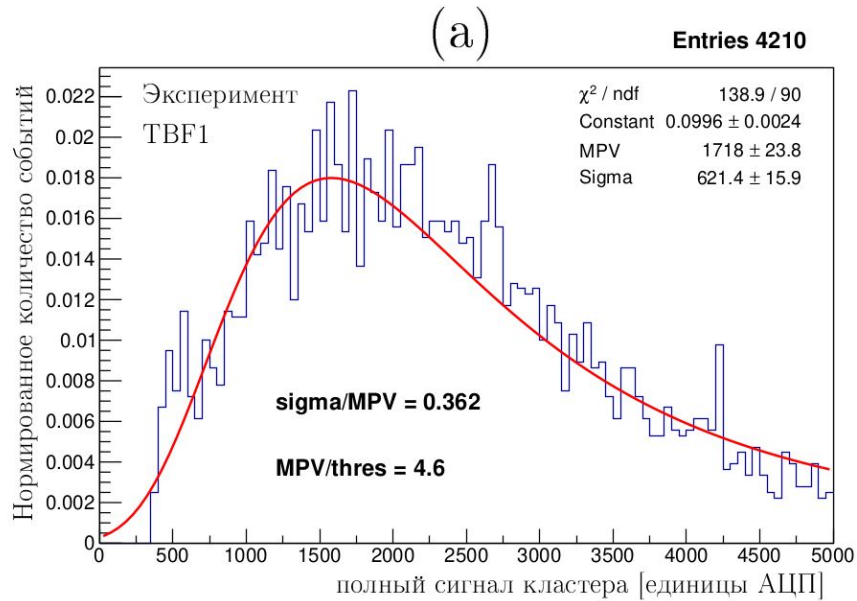
На выходе моделирования извлекались наблюдаемые величины:

- количество сработавших полосок в кластере (n_{strips});
- полный сигнал кластера ($totsig$);
- восстановленная координата кластера (x_{cog}).

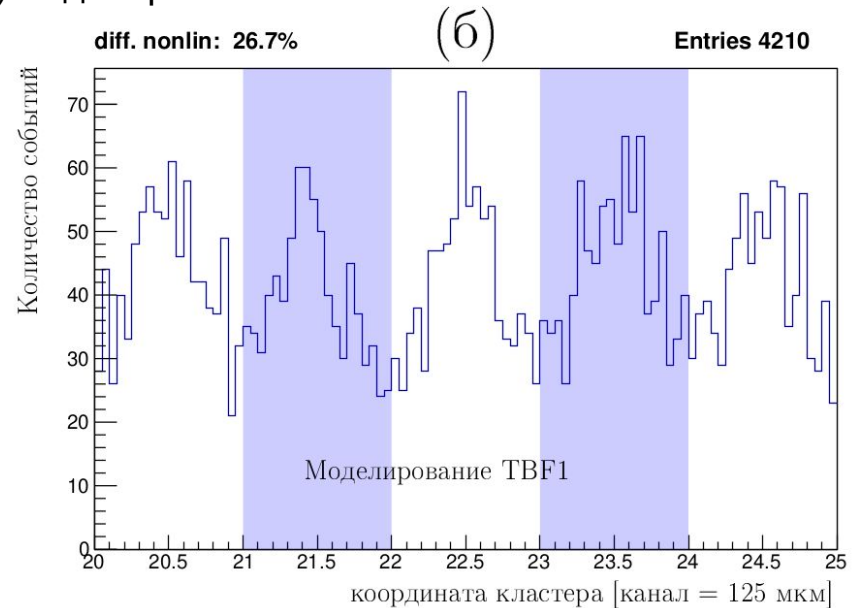
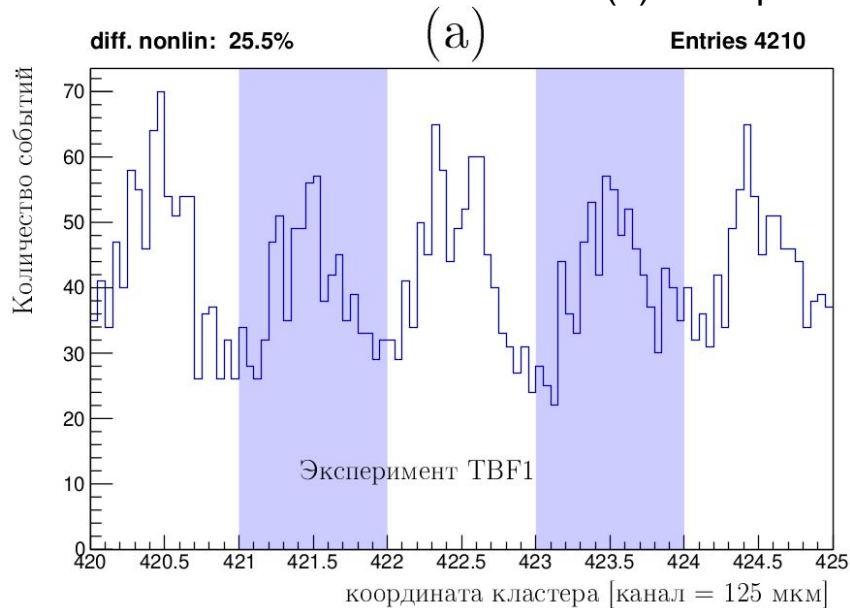


Спектр сработавших полосок для детектора TBF1:
(а) в эксперименте; (б) в моделировании

Параметрическое моделирование (эксп. и модел.)



(а) эксперимент; (б) моделирование



Параметрическое моделирование (корректировка дифф. нелинейности)

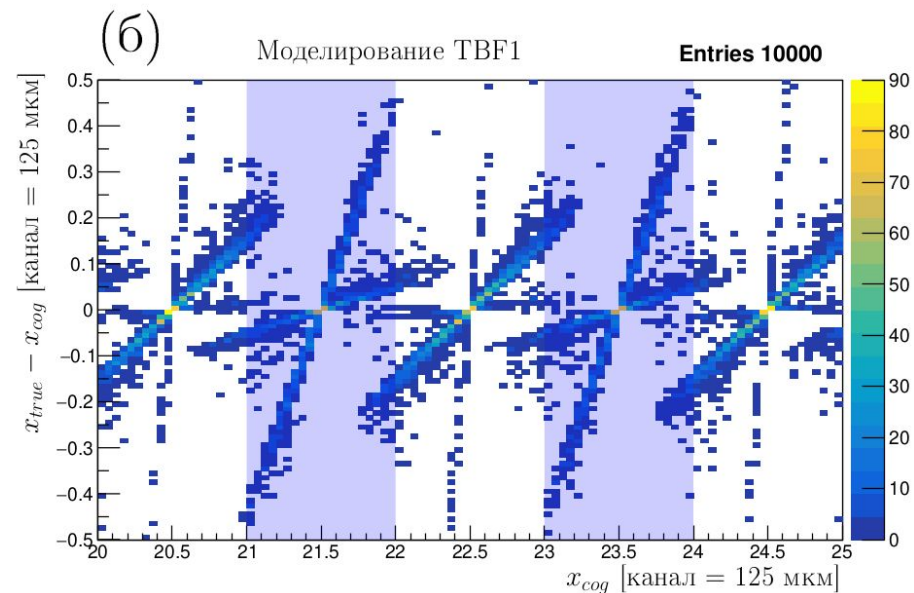
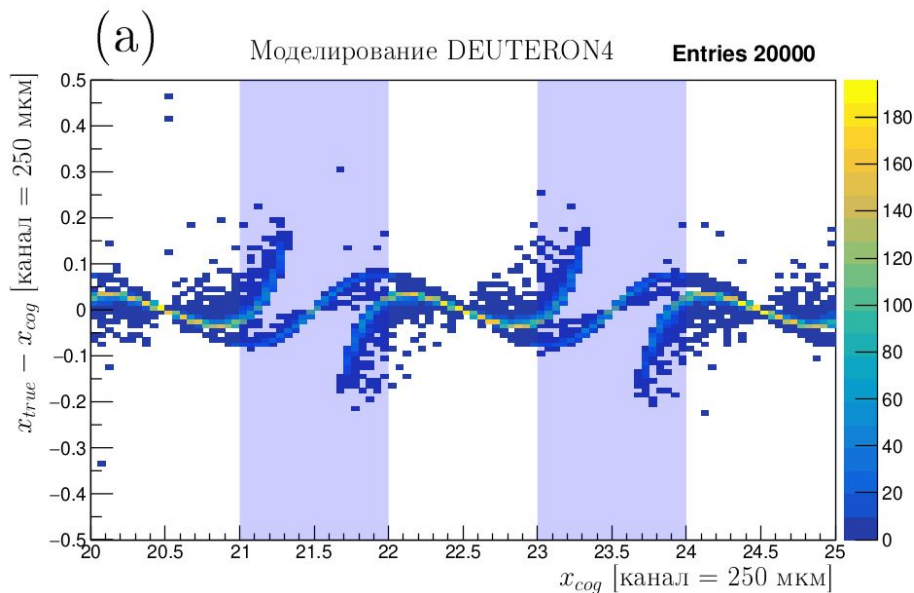
$$x_{resid} = x_{true} - x_{cog}$$

$$x_{cog} + \delta x \approx x_{true}$$

$$x_{cog} + x_{resid} = x_{cog} + (x_{true} - x_{cog}) = x_{true}$$

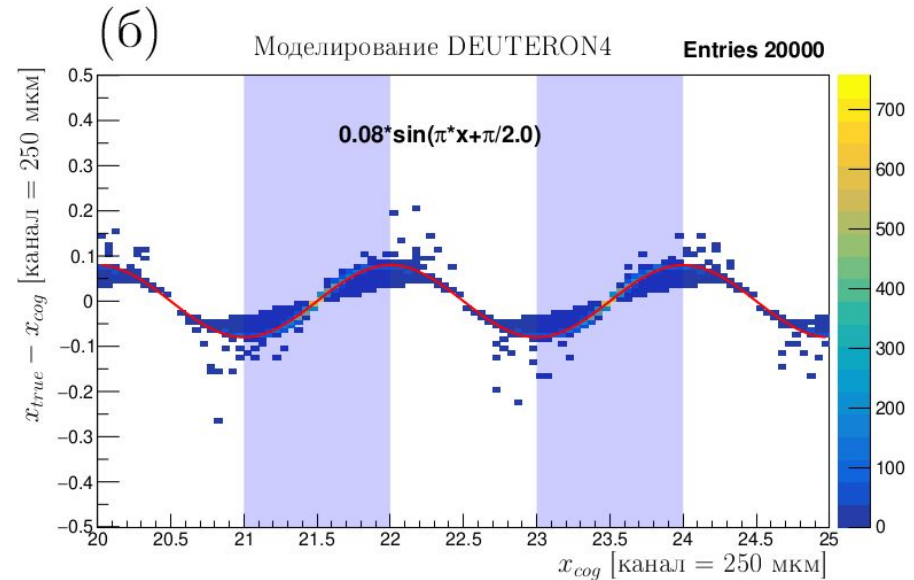
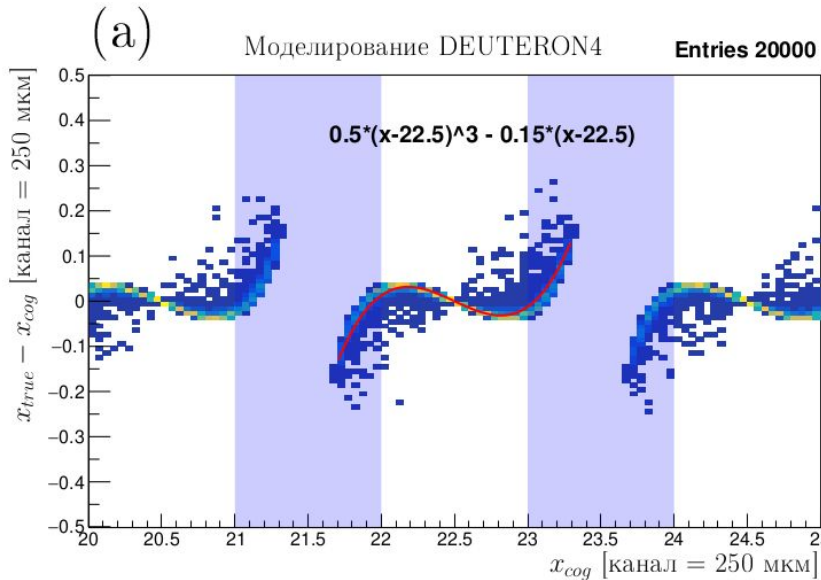
$$x_{cog}^{corrected} = x_{cog} + \delta x$$

$$\delta x = \delta x(x_{cog}, nstrips)$$



Результаты моделирования без добавления шумов, но с порогом регистрации.
Корреляция между восстановленной координатой кластера и координатной разностью
для детекторов двух типов: (а) DEUTERON4; (б) TBF1

Параметрическое моделирование (корректировка дифф. нелинейности)

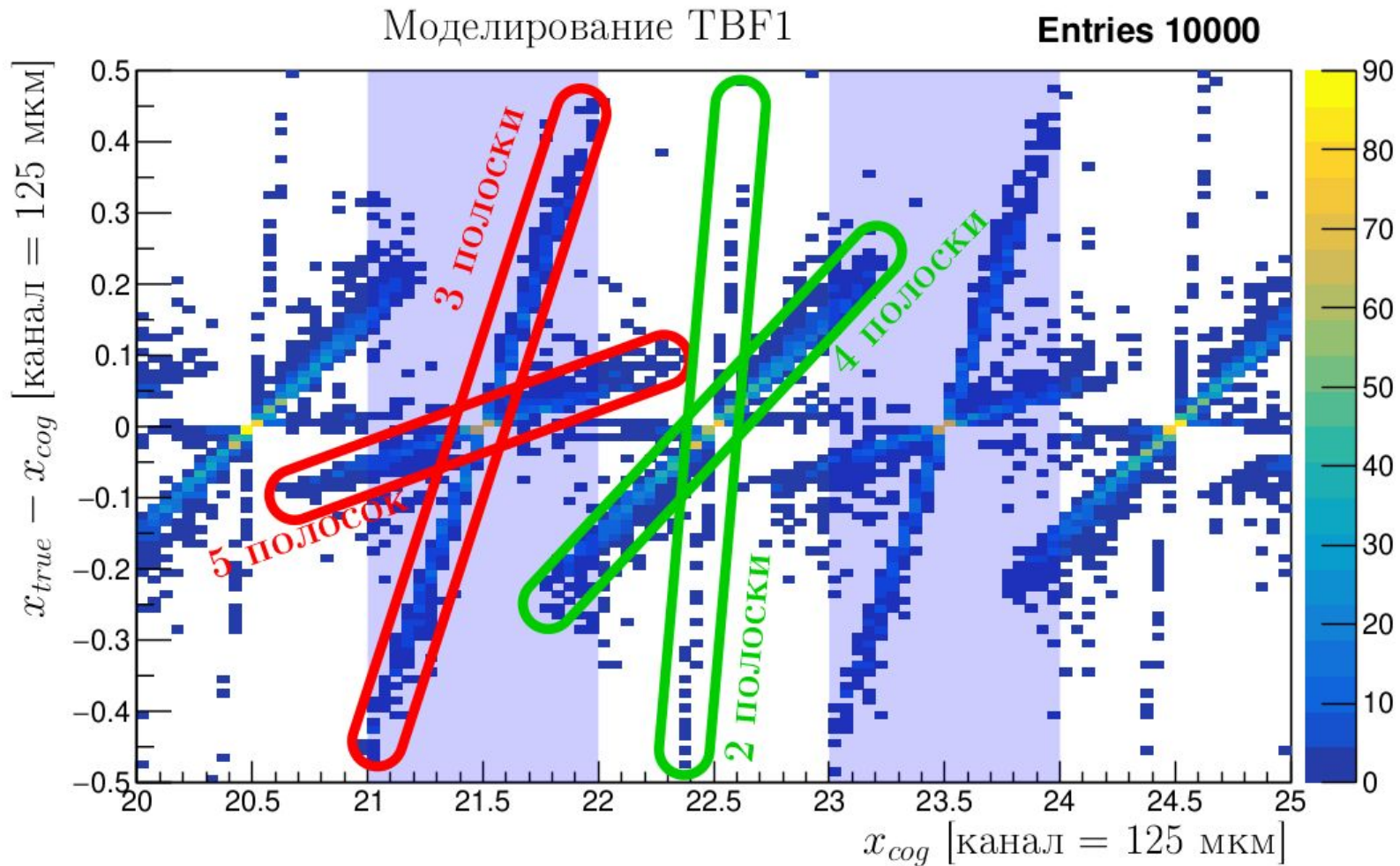


Результаты моделирования.

Корреляция между восстановленной координатой кластера и координатной разностью для детектора DEUTERON4 в случае, когда в кластере срабатывает:

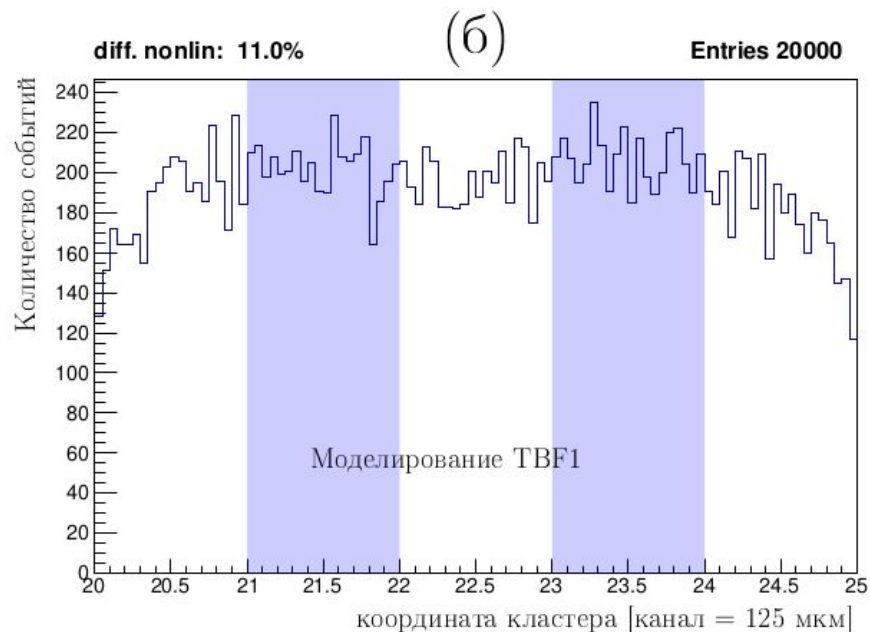
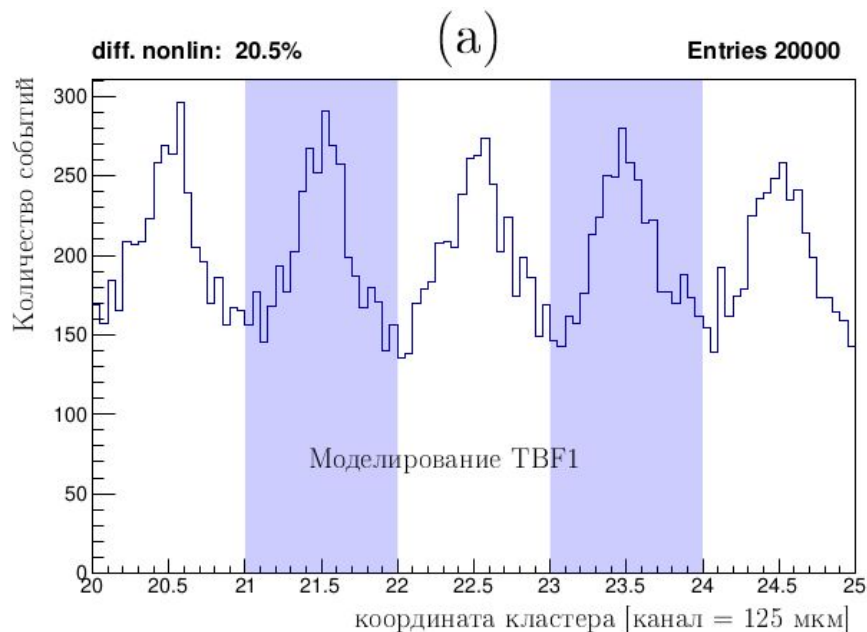
(а) две полоски; (б) три полоски

Параметрическое моделирование (корректировка дифф. нелинейности)

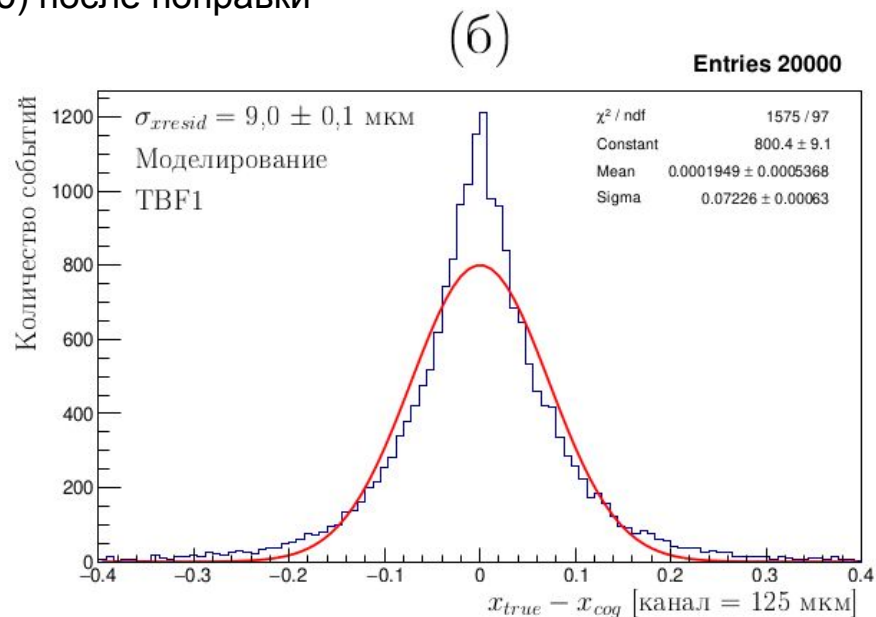
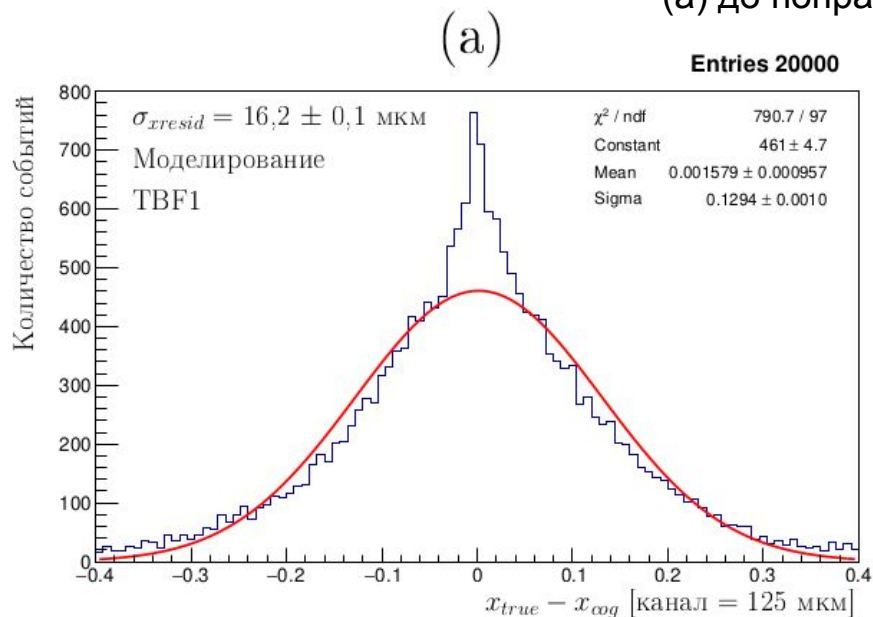


Корреляция между восстановленной координатой кластеров и координатной разностью в моделировании для детектора TBF1

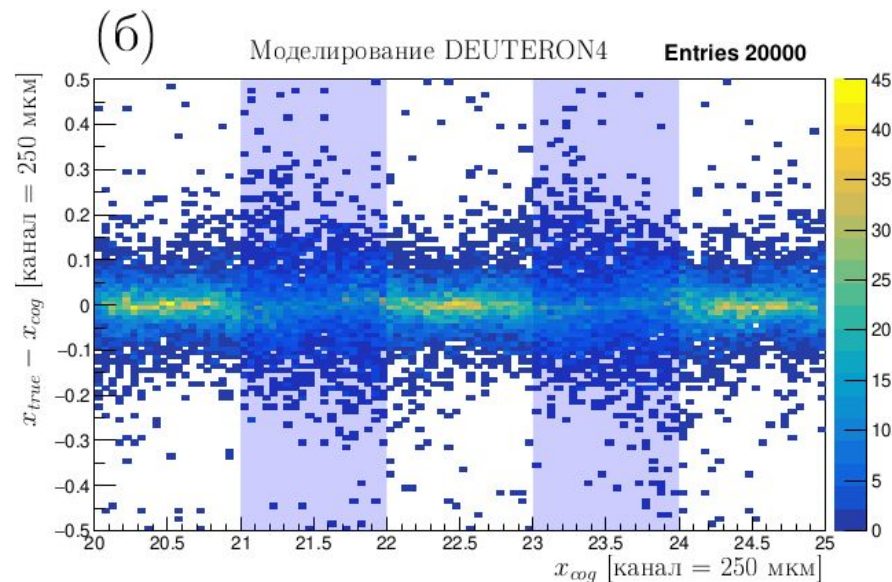
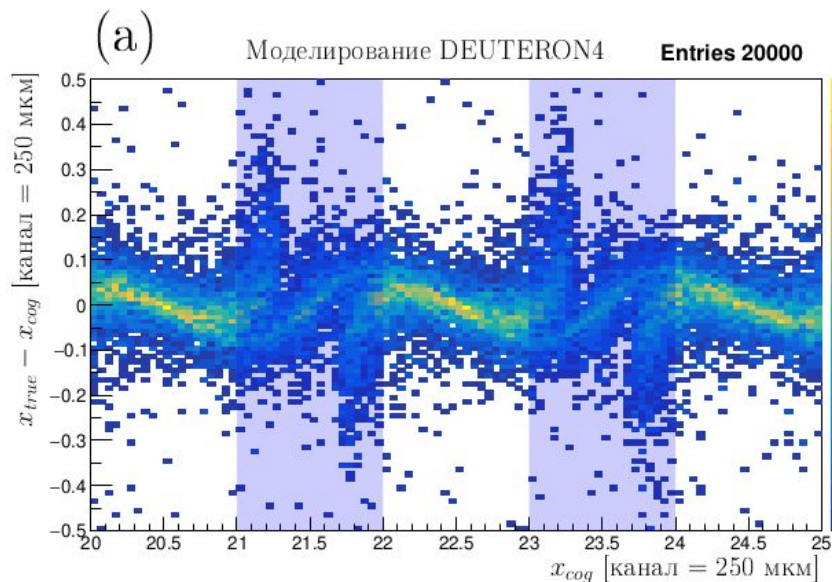
Корректировка дифф. нелинейности в моделировании



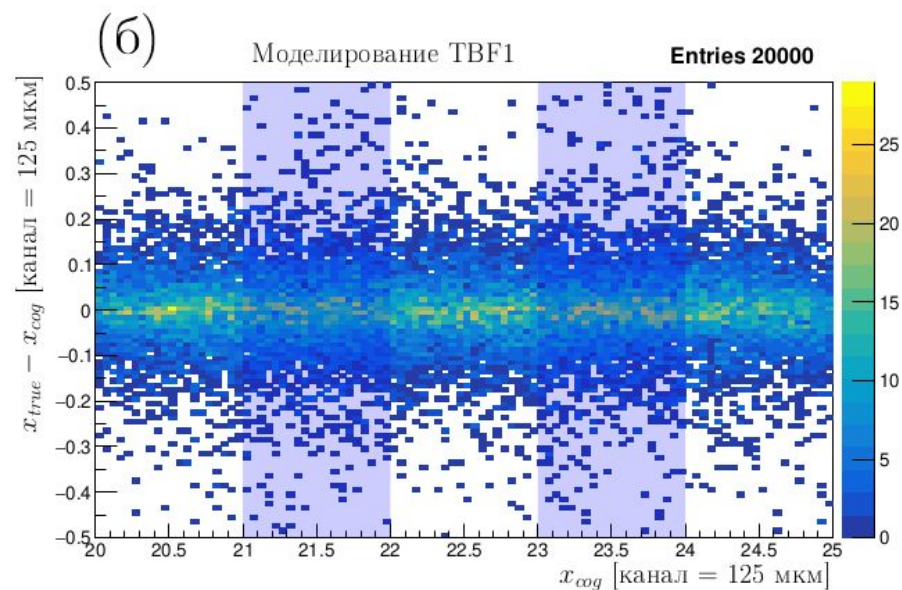
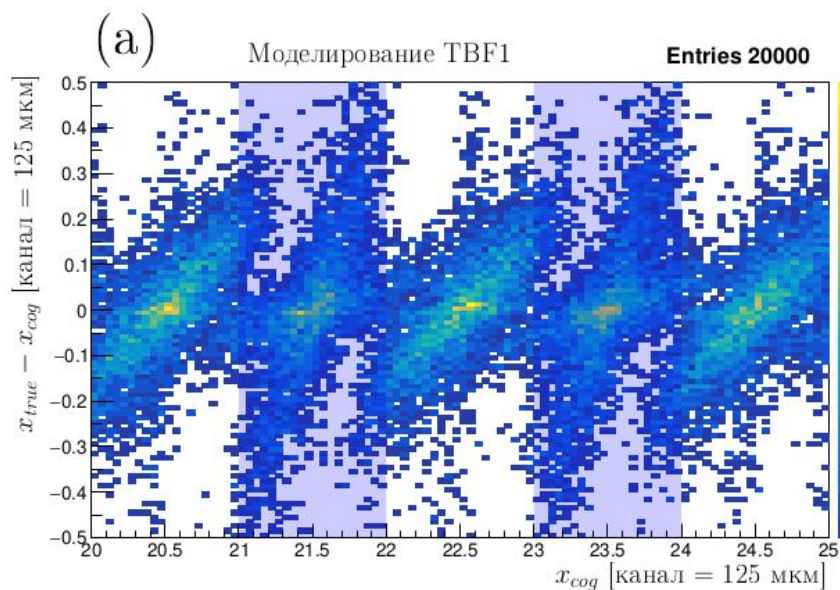
(а) до поправки; (б) после поправки



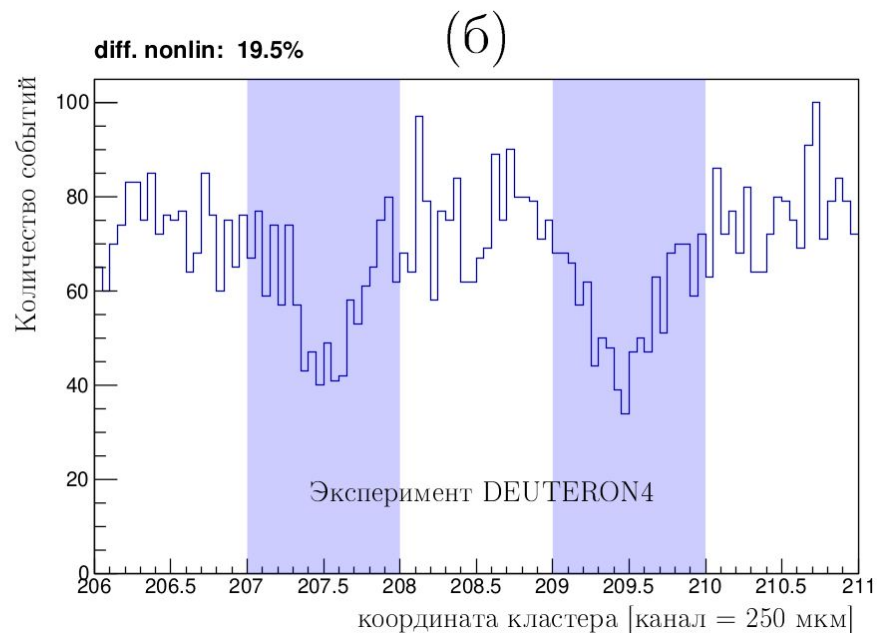
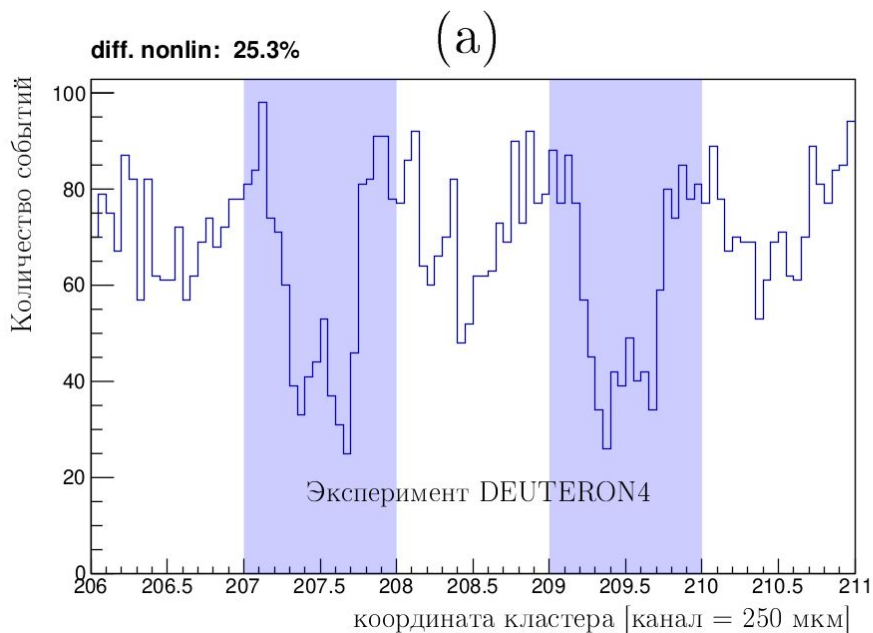
Корректировка дифф. нелинейности в моделировании



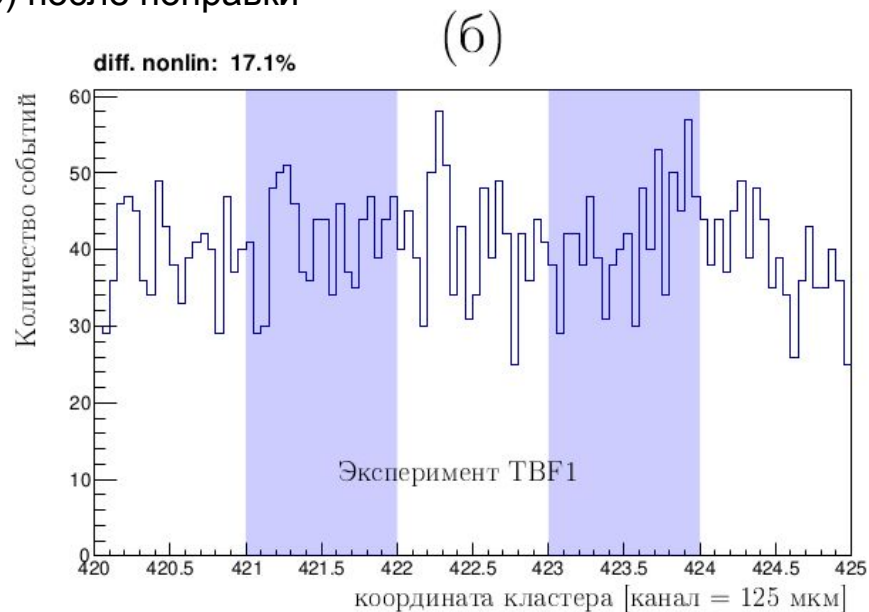
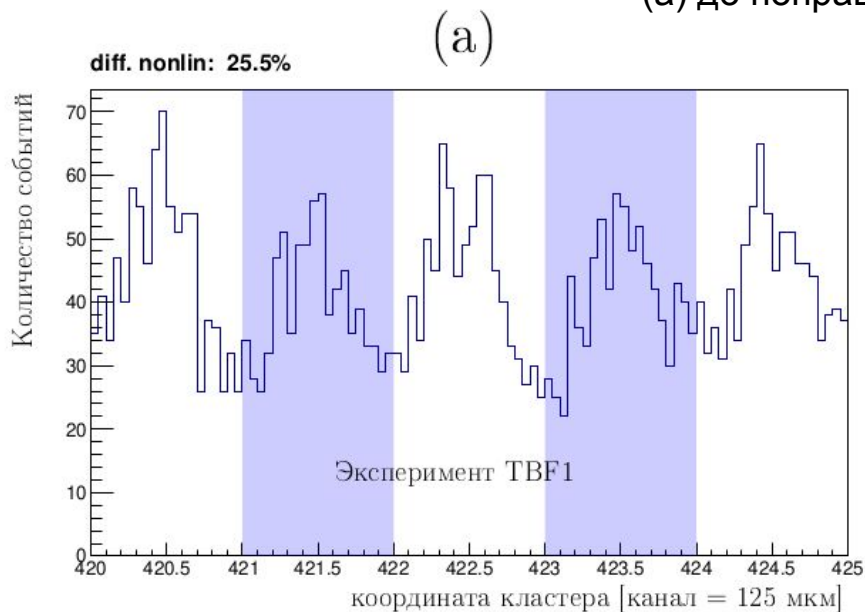
(а) до поправки; (б) после поправки



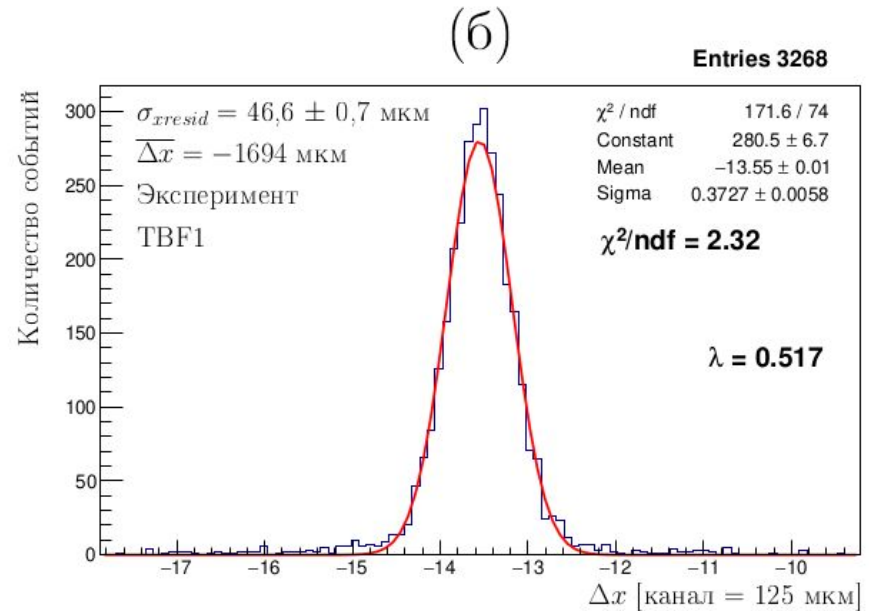
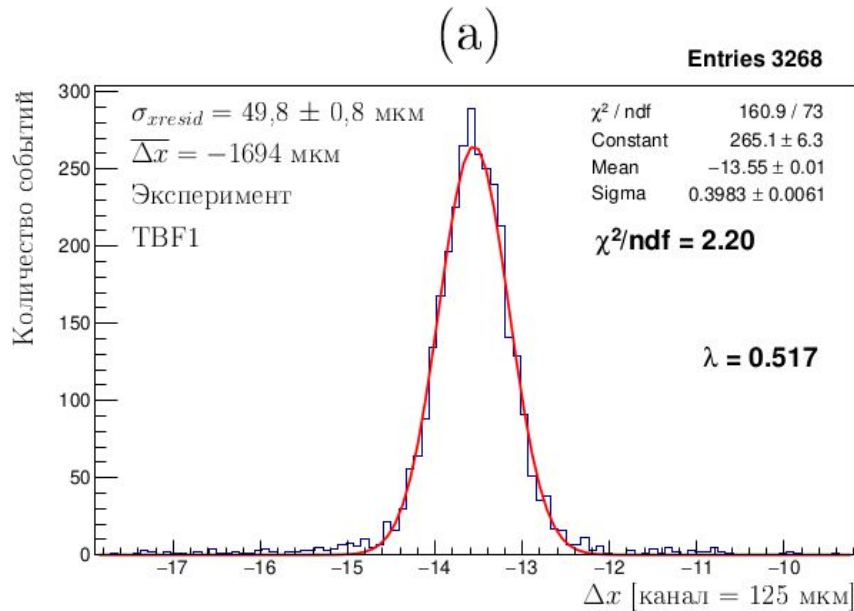
Корректировка дифф. нелинейности в эксперименте



(а) до поправки; (б) после поправки



Корректировка дифф. нелинейности в эксперименте



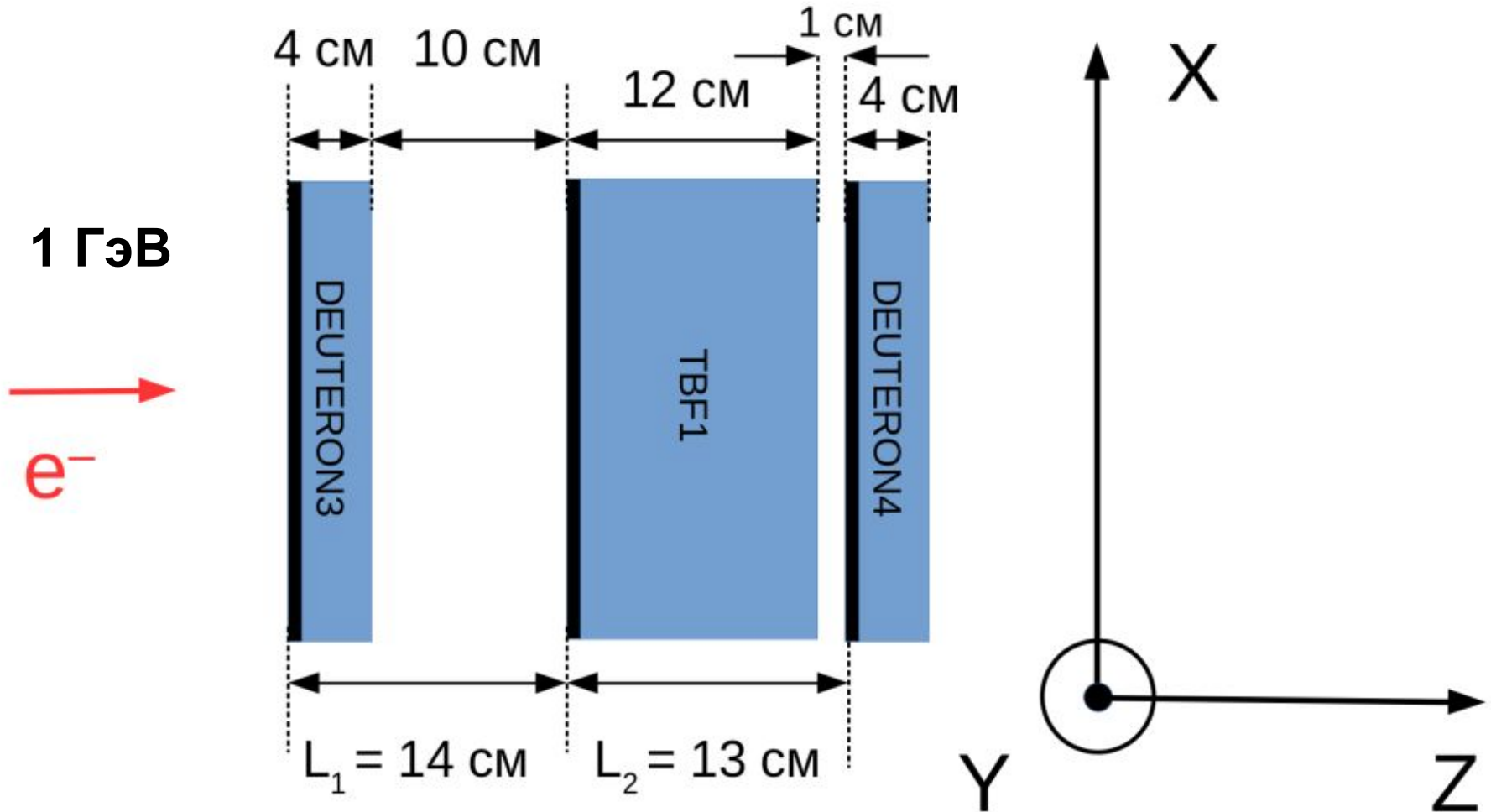
Внесение поправки дифференциальной нелинейности метода центра тяжести в экспериментальные данные для детектора TBF1.

Распределение событий по координатной разности:

(а) до поправки; (б) после поправки

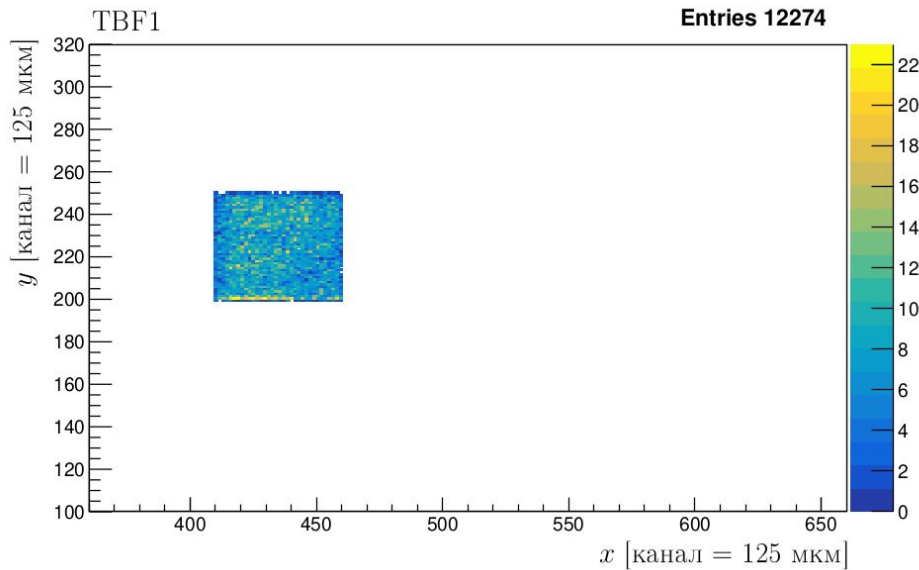
Уменьшение стандартного отклонения распределения событий по координатной разности на 3,2 мкм, что согласуется с ожидаемой оценкой

Схема эксперимента

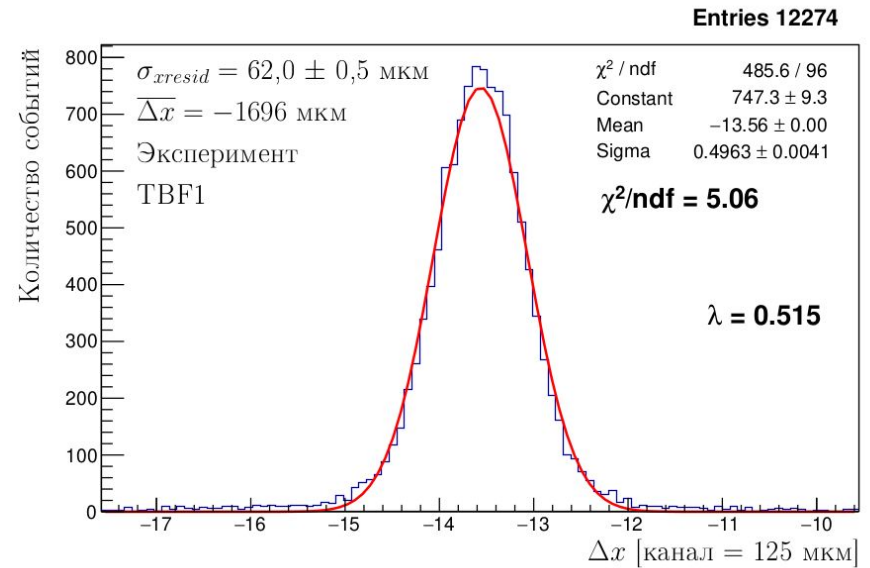


$$\lambda = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{14}{14 + 13} = \frac{14}{27} \approx 0,5185$$

Экспериментальные данные

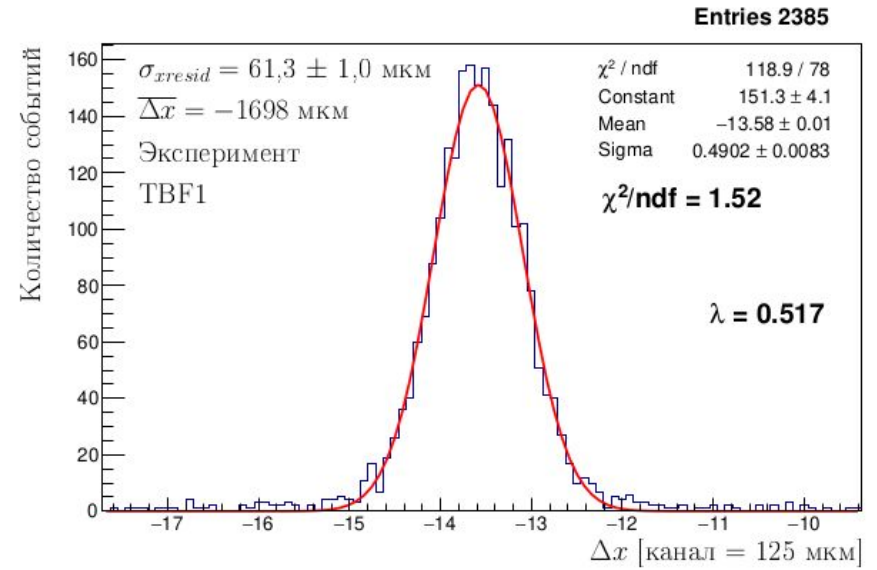
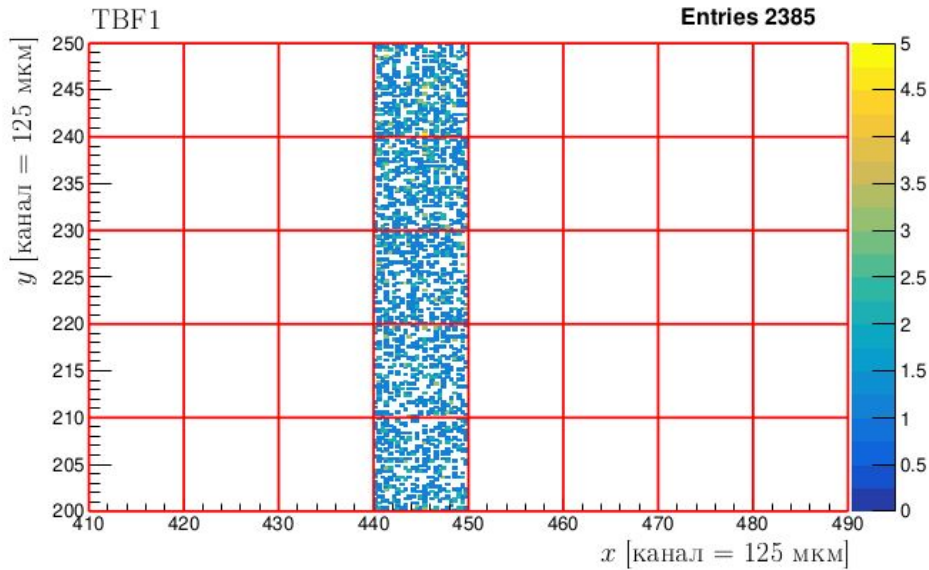
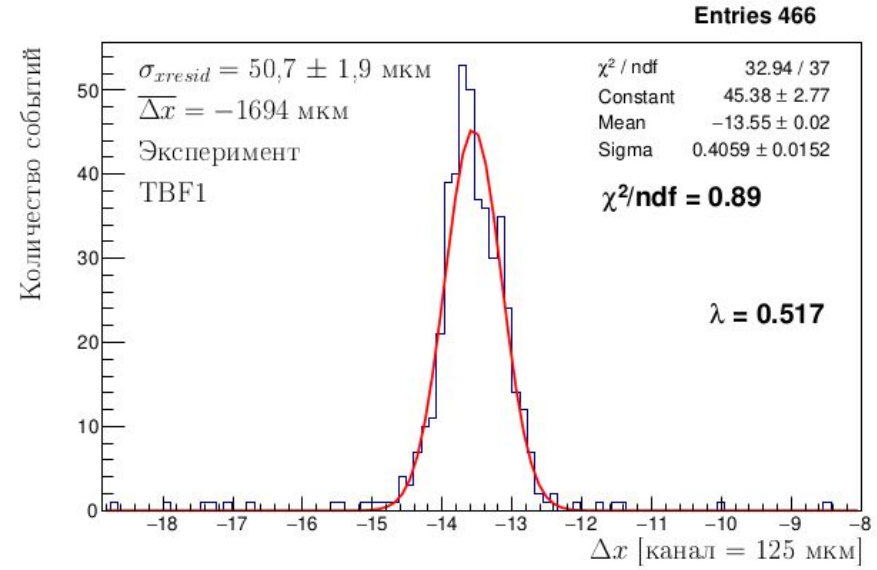
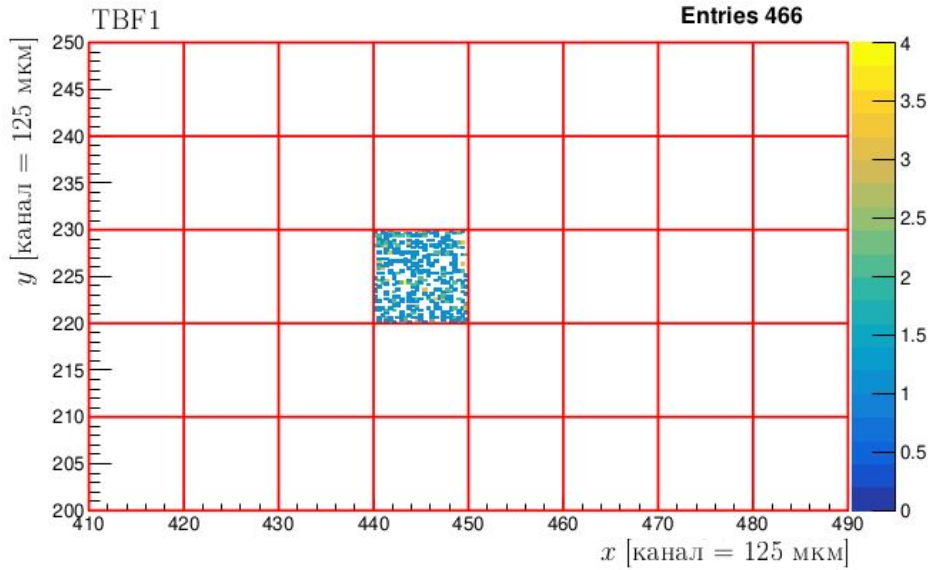


Карта хитов в детекторе
TBF1 для Тестового пучка

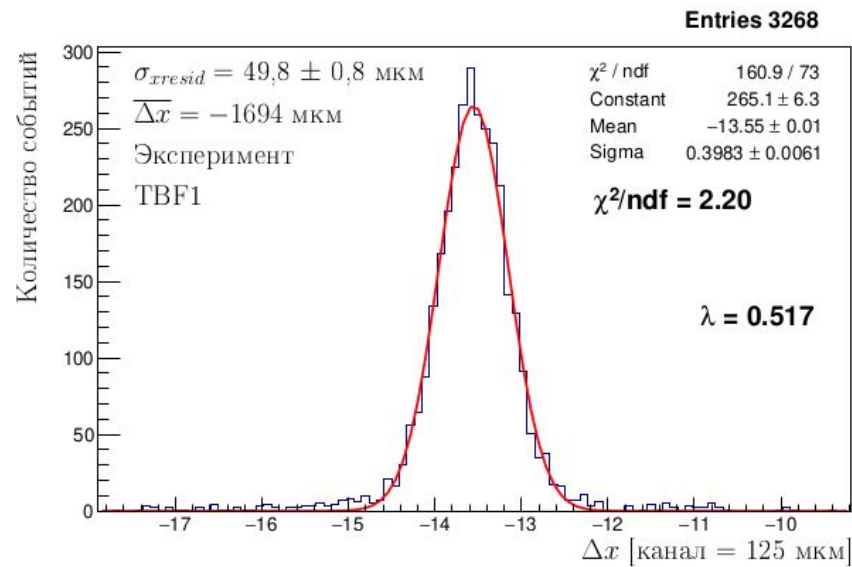
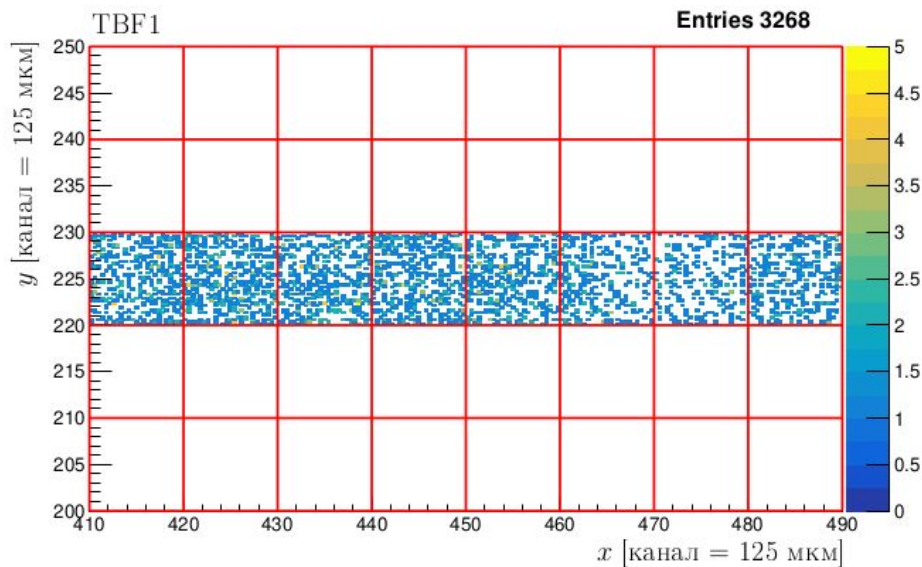
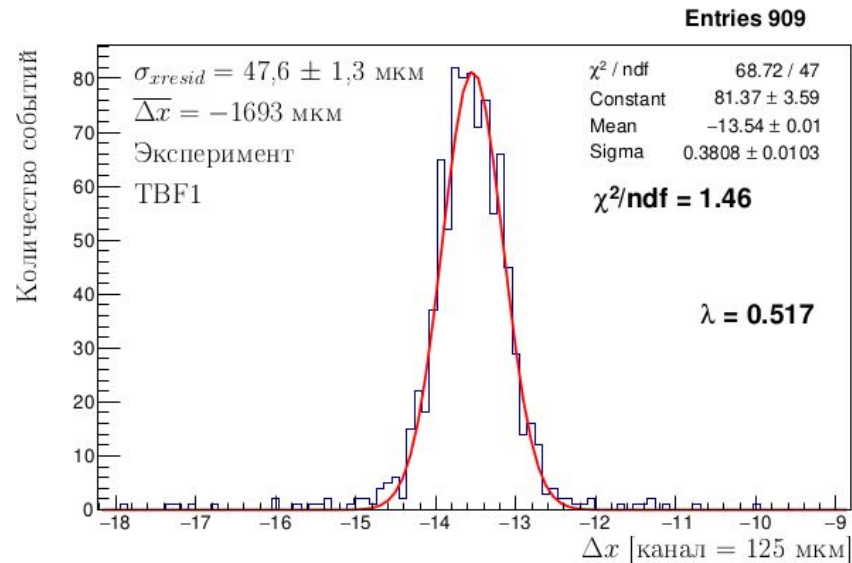
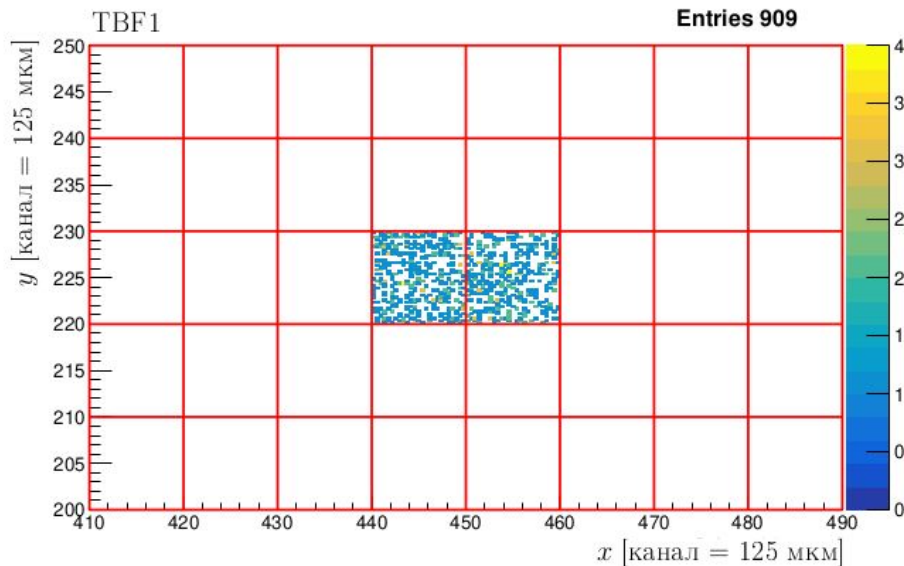


Распределение событий
по координатной разности

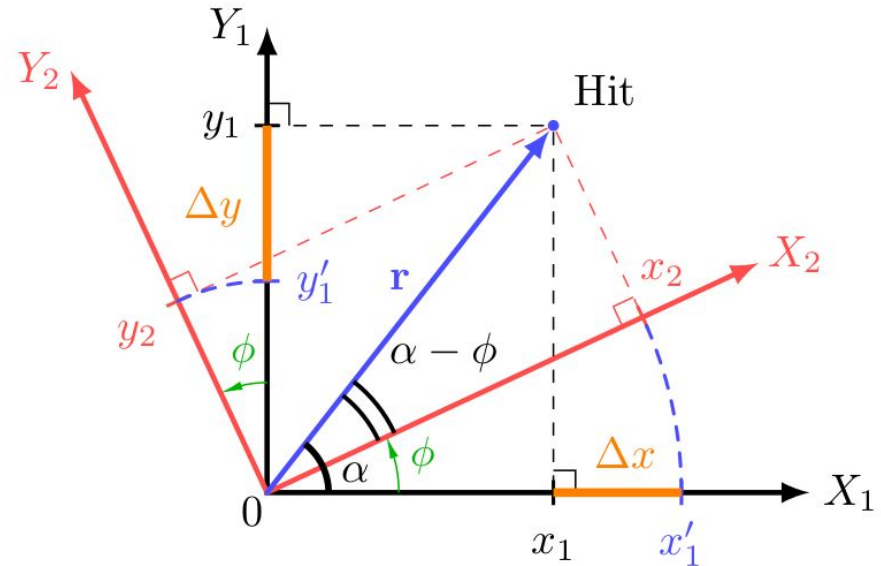
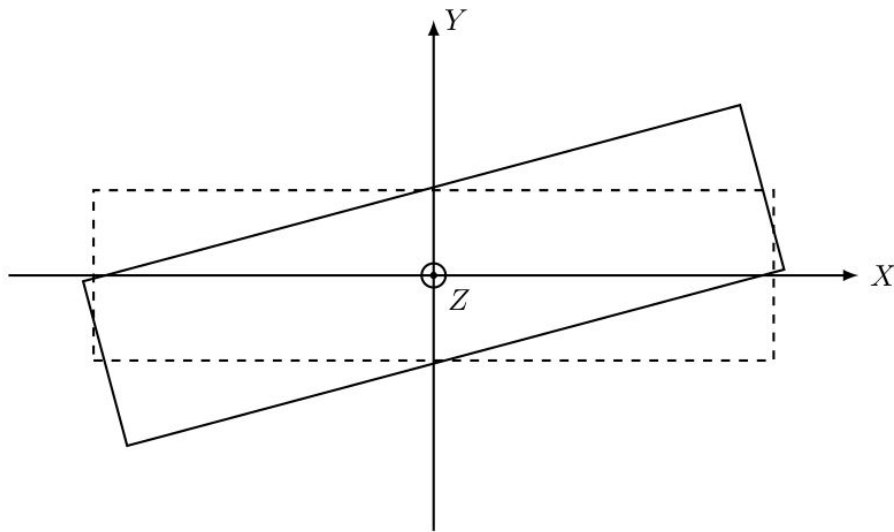
Эксперимент: расширение области по вертикали



Эксперимент: расширение области по горизонтали



Поворот детектора в плоскости XY приводит к завышению измеренного пространственного разрешения



$$\Delta x \approx \varphi \cdot y_2$$

Оценка эффективного угла поворота детектора

$$\varphi \approx \frac{\delta(\overline{\Delta x})}{\Delta y_{\text{regions}}} \approx \frac{1}{60} \approx 1^\circ$$

$$\Delta y \approx -\varphi \cdot x_2$$

Для подавления эффекта поворотов необходимо отбирать треки, проходящие через маленькие области детектора

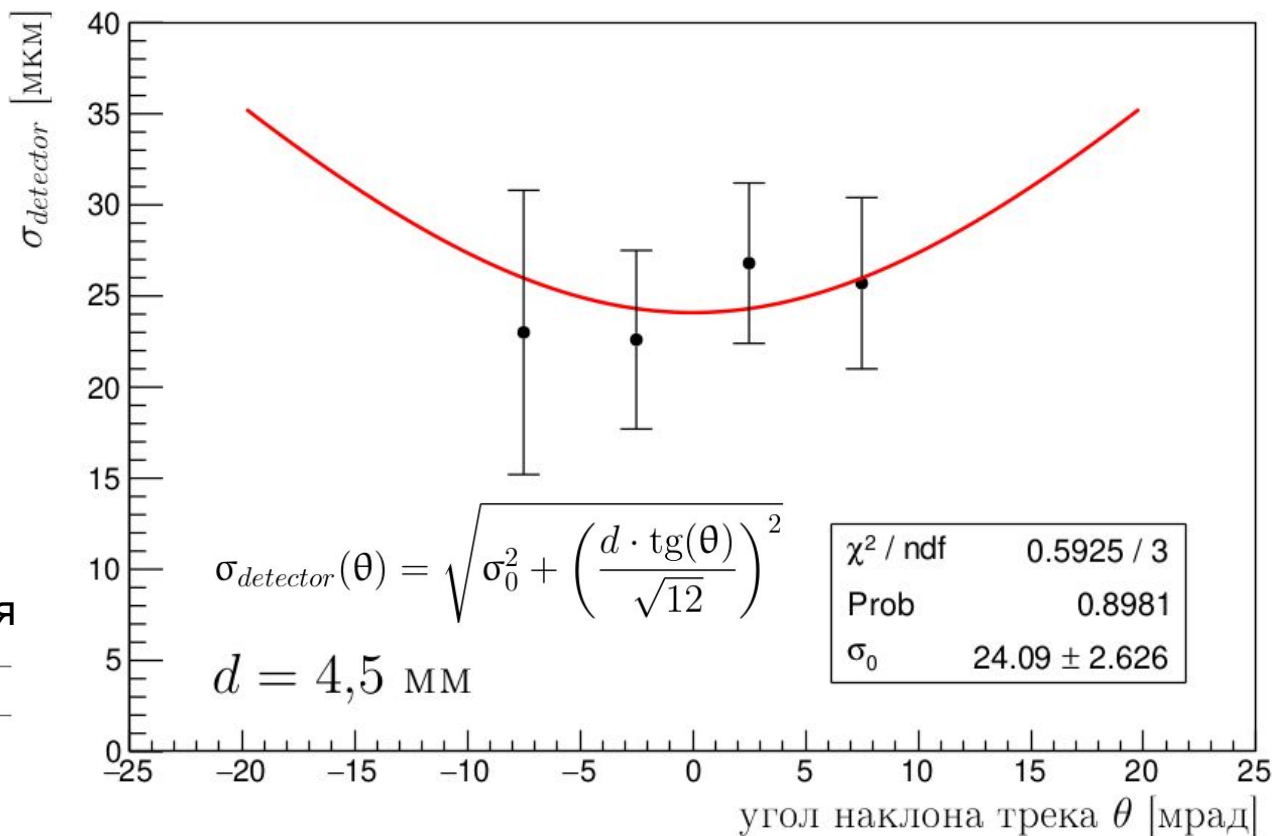
Экспериментальное значение собственного пространственного разрешения детектора

Диапазон параметров для расчёта систематической погрешности

Параметр	Минимум	Максимум
X/X_0	0,25%	0,30%
β_{cp}	980 МэВ	1020 МэВ
L	268 мм	272 мм
$\sigma_{\theta MS}$	0,515 мрад	0,592 мрад
σ_{xMS}	34,5 мкм	40,3 мкм

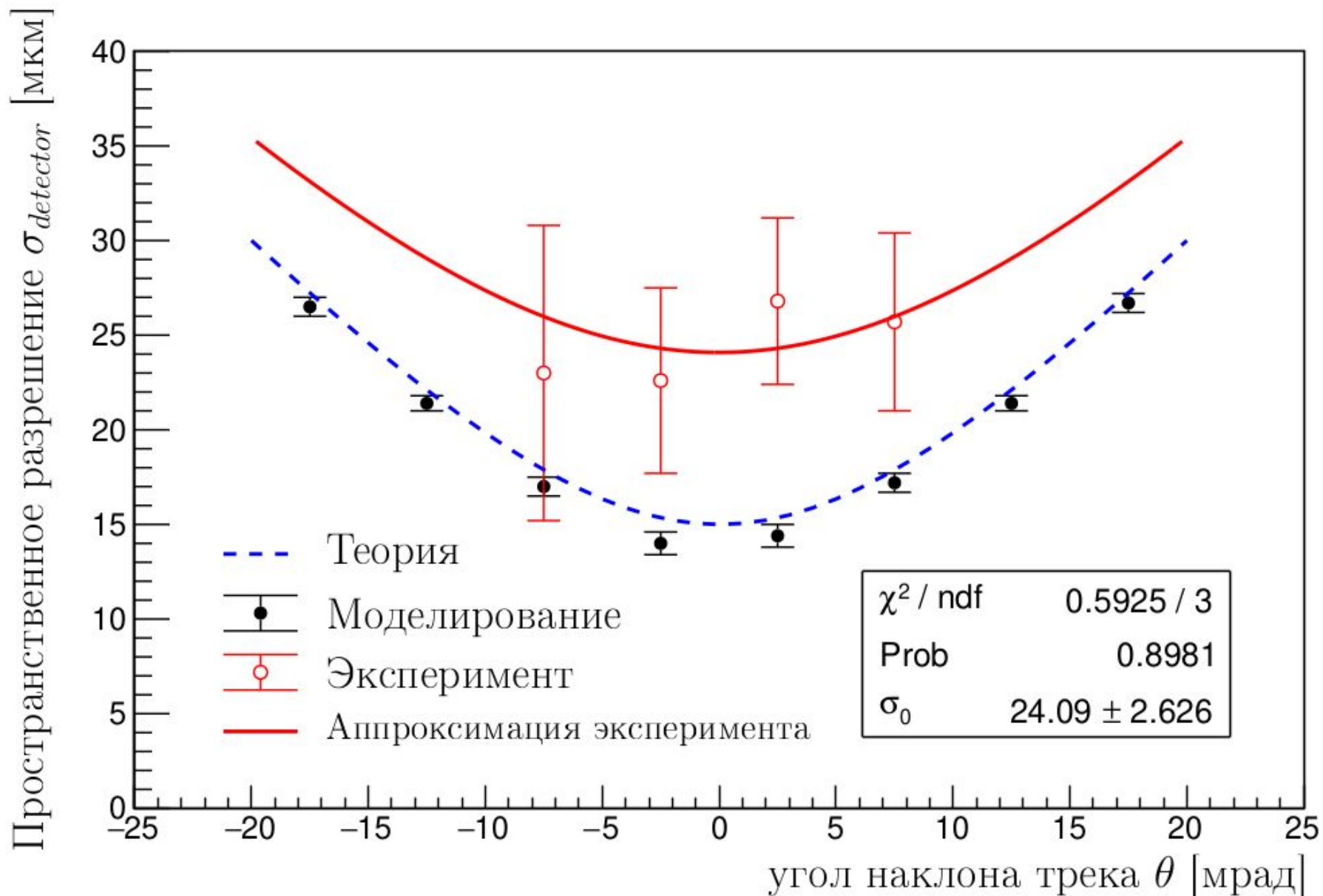
Экспериментальные значения

θ [мрад]	σ_{xresid} [мкм]	$\sigma_{detector}$ [мкм]
$-7,5 \pm 2,5$	$47,8 \pm 3,4$	$23,0 \pm 7,8$
$-2,5 \pm 2,5$	$47,0 \pm 1,2$	$22,6 \pm 4,9$
$+2,5 \pm 2,5$	$50,1 \pm 1,4$	$26,8 \pm 4,4$
$+7,5 \pm 2,5$	$49,3 \pm 1,5$	$25,7 \pm 4,7$



$$\sigma_{detector}^{exp} = 24,1 \pm 2,6(\text{стат.}) \pm 5,5(\text{сист.}) \text{ мкм}$$

Результат изучения пространственного разрешения детектора



Моделирование работы
внутреннего трекера детектора
Супер Чарм-Тау Фабрики

Детектор Супер Чарм-Тау Фабрики

Внутренний трекер:
полый цилиндр длиной 60 см,
разделённый поперёк
на две равные части;
внешний диаметр 40 см.

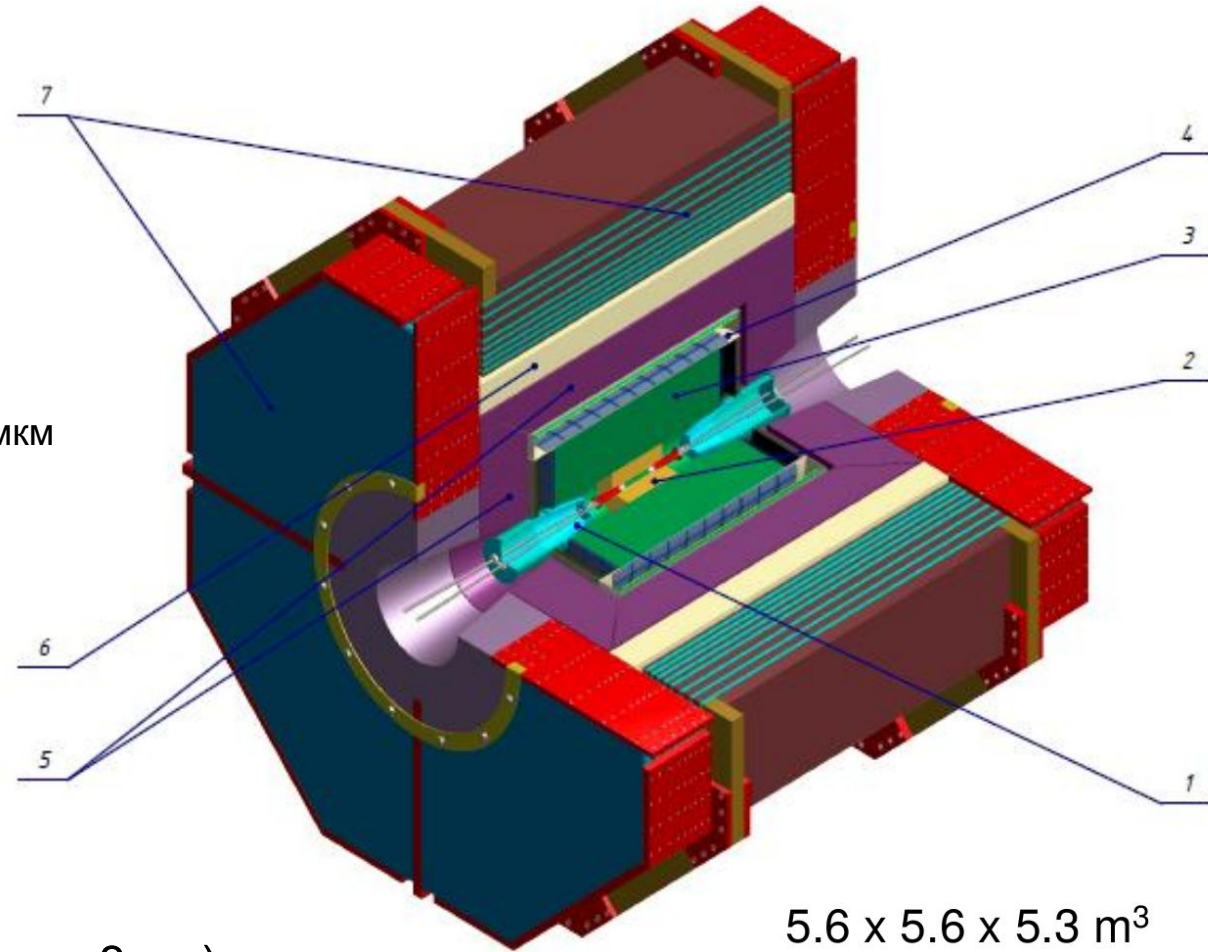
Фоновый поток частиц $10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Пространственное разрешение 100 мкм

Регистрация пи-мезонов
с импульсом меньше 100 МэВ/с

Дополнение дрейфовой камеры
в измерении импульса

Восстановление вершин
короткоживущих частиц (K_S , Λ)



5.6 x 5.6 x 5.3 m³

1 – вакуумная камера (диаметр 3 см)
(1,5 мм Ве + 0,5 мм парафина + 1,5 мм Ве)

2 – внутренний трекер

3 – дрейфовая камера

4 – система идентификации частиц

5 – калориметр

6 – сверхпроводящая катушка

7 – мюонная система

Варианты внутреннего трекера в моделировании:

1. Четыре кремниевых слоя.

Каждый слой состоит из кремния (320 мкм) и углерода (400 мкм).
Внутренний объём заполнен воздухом при стандартных условиях.

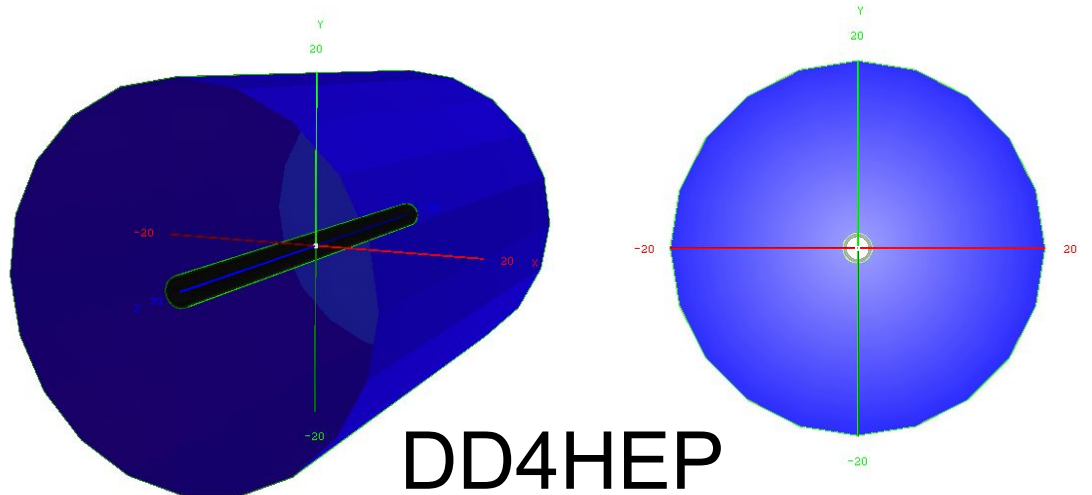
2. Четыре слоя цилиндрических ГЭУ-детекторов.

Каждый слой состоит из тройного каскада ГЭУ-детекторов с газом Ar-CO_2 (25%).
Дрейфовый промежуток – 3 мм; толщина остальных промежутков – 1,5 мм.
Вне ГЭУ-детекторов находится воздух.

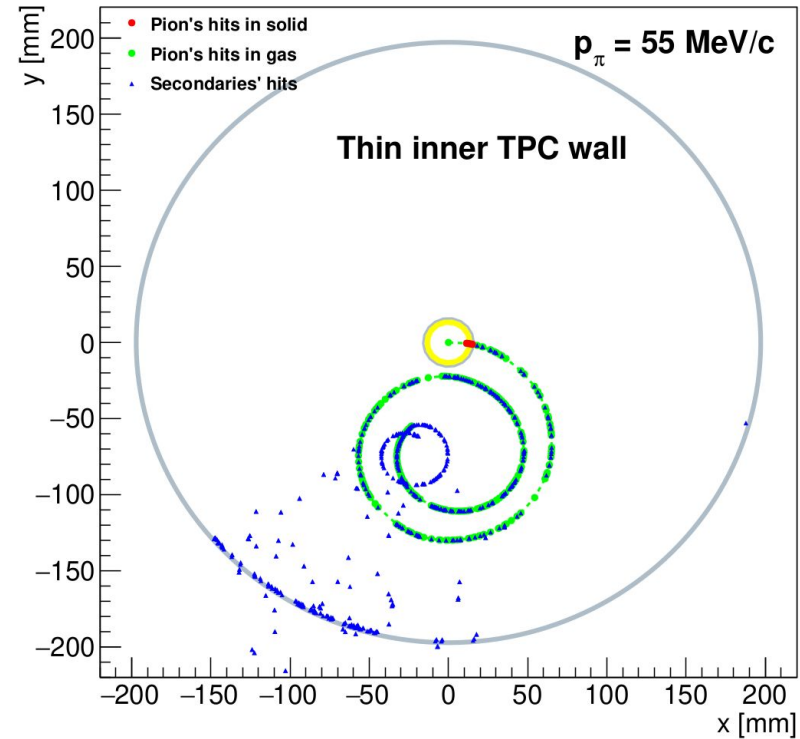
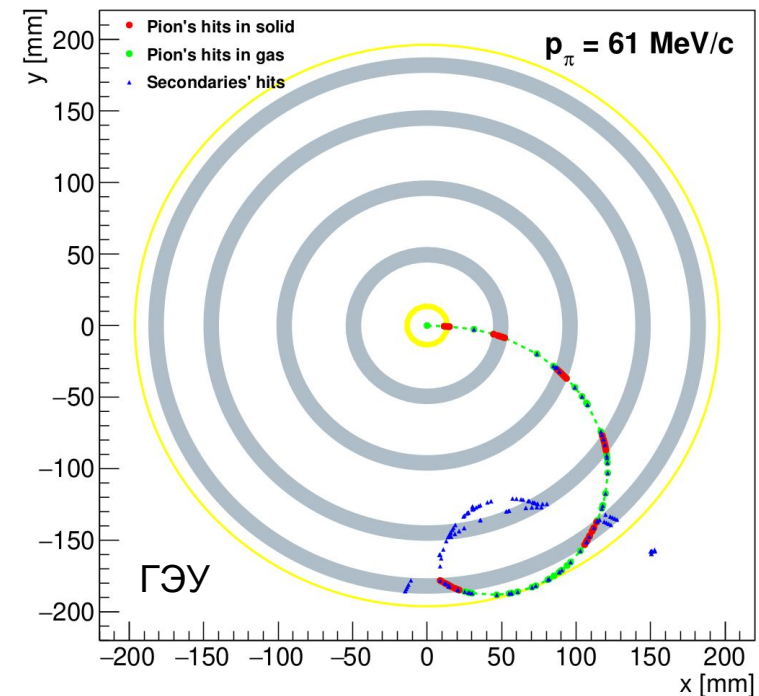
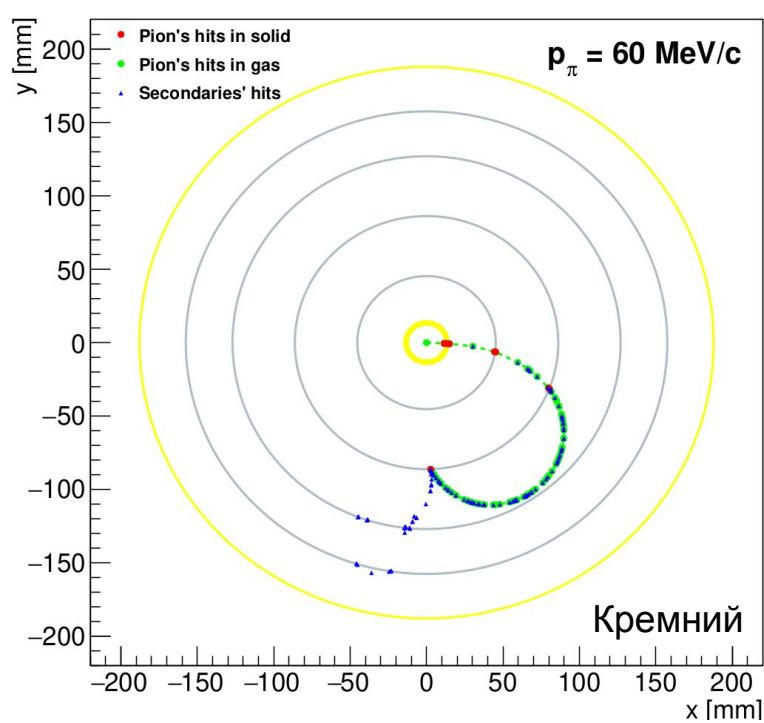
3. На основе время-проекционной камеры (Time Projection Chamber (TPC)).

Внутренний объём заполнен газом Ar-CO_2 (20%).

Внутренняя тонкая стенка: 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона, 5 мкм меди.



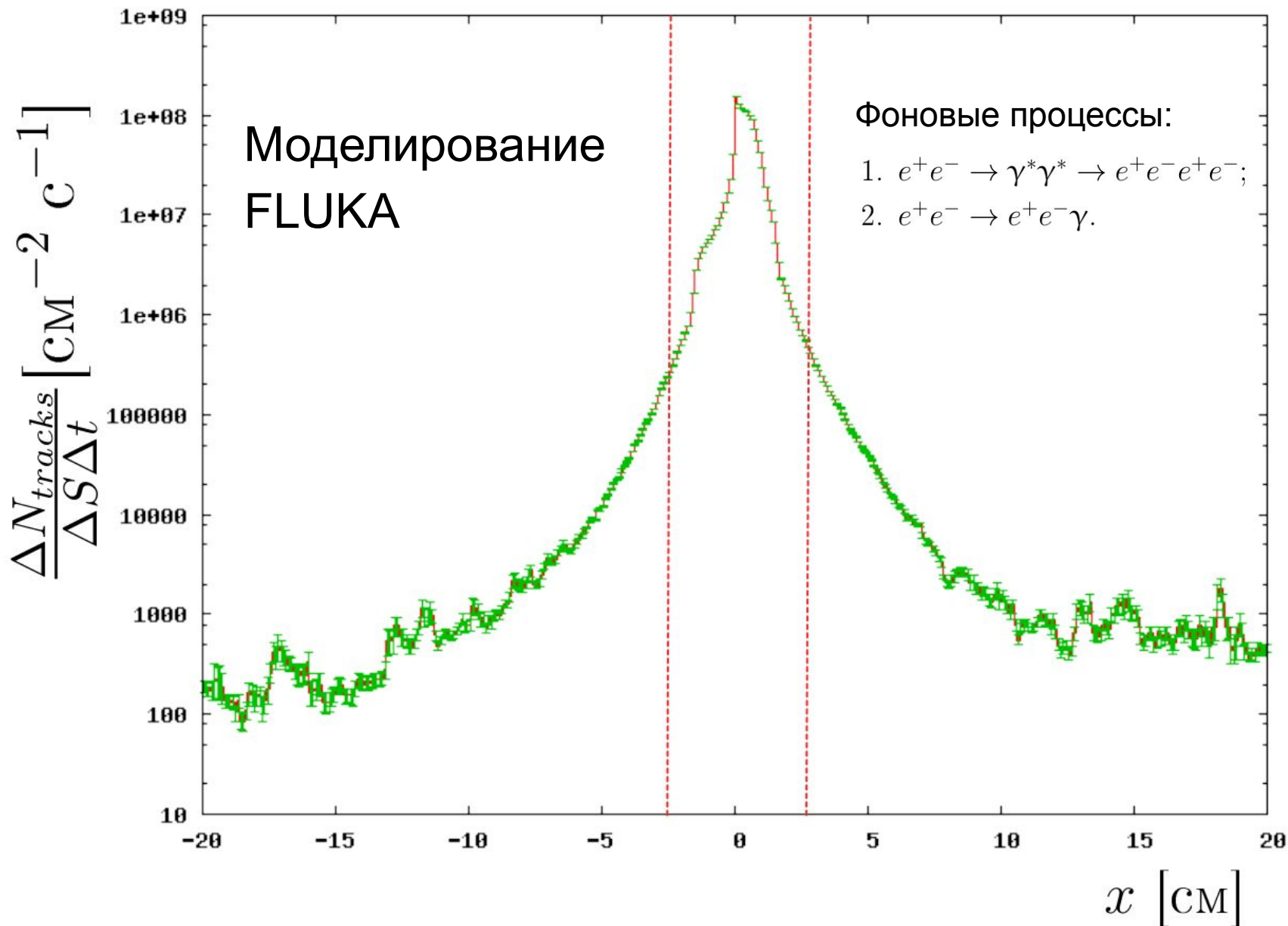
Моделирование прохождения пи-мезона через различные варианты внутреннего трекера



Магнитное поле 1,5 Тл

Изучение влияния объёмного заряда на электрическое поле в ТРС

Распределение плотности потока фоновых частиц в зависимости от координаты вдоль направления, перпендикулярного оси пучков



Внутренний трекер на основе ТРС

Время между столкновениями пучков 6 нс

Непрерывное считывание данных

Четырёхкаскадные ГЭУ на торцах

Возникает объёмный заряд ионов

Объёмный заряд искажает электрическое поле

Плотность потока фоновых частиц пересчитывается в объёмный заряд:

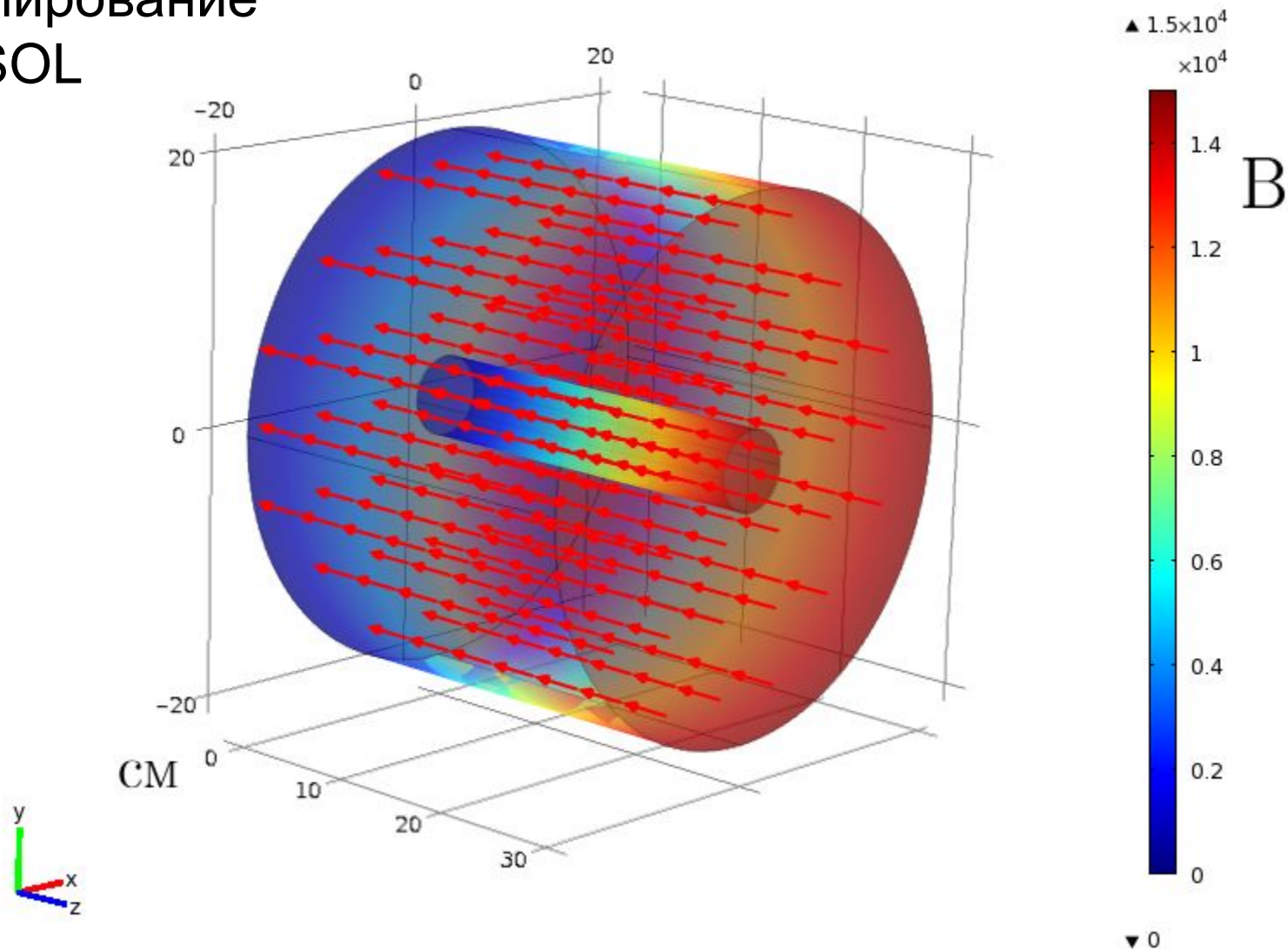
$$\rho[\text{Кл/см}^3] = \frac{\Delta N_{tracks}}{\Delta S \Delta t} \cdot \frac{\Delta n_e}{\Delta r} \cdot \text{Gain} \cdot \text{IBF} \cdot t_{drift} \cdot |e|$$

$$\frac{\Delta n_e}{\Delta r}$$

Полное количество электронов ионизации на единицу длины трека фоновой ионизирующей частицы

Конфигурация внешнего электрического поля в ТРС при подаваемом напряжении 15 кВ

Моделирование
COMSOL



Результаты моделирования влияния объёмного заряда ионов

Максимальное отклонение ($\delta\xi_{\max}$) силовых линий полного поля от силовых линий внешнего поля за счёт объёмного заряда ионов для разных газов и значений ИВФ. E – величина внешнего однородного электрического поля в объёме ТРС. Коэффициент газового усиления принят равным 10^4 .

Газ	E [В/см]	$\Delta n_e / \Delta r$ [1/см]	t_{drift} [с]	ИВФ	$\delta\xi_{\max}$ [мм]
Ar(90%)-CH ₄ (10%)	125	90	0,14	1%	94,0
Ar(80%)-CH ₄ (10%) -CF ₄ (10%)	500	90	0,03	1%	5,0
Ar(80%)-CH ₄ (10%) -CF ₄ (10%)	500	90	0,03	3%	15,1
Ar(45%)-iC ₄ H ₁₀ (15%)- CF ₄ (40%)	1000	112	0,02	1%	2,1
Ar(45%)-iC ₄ H ₁₀ (15%)- CF ₄ (40%)	1000	112	0,02	3%	6,2

Карта отклонений траекторий электронов за счёт объёмного заряда ионов

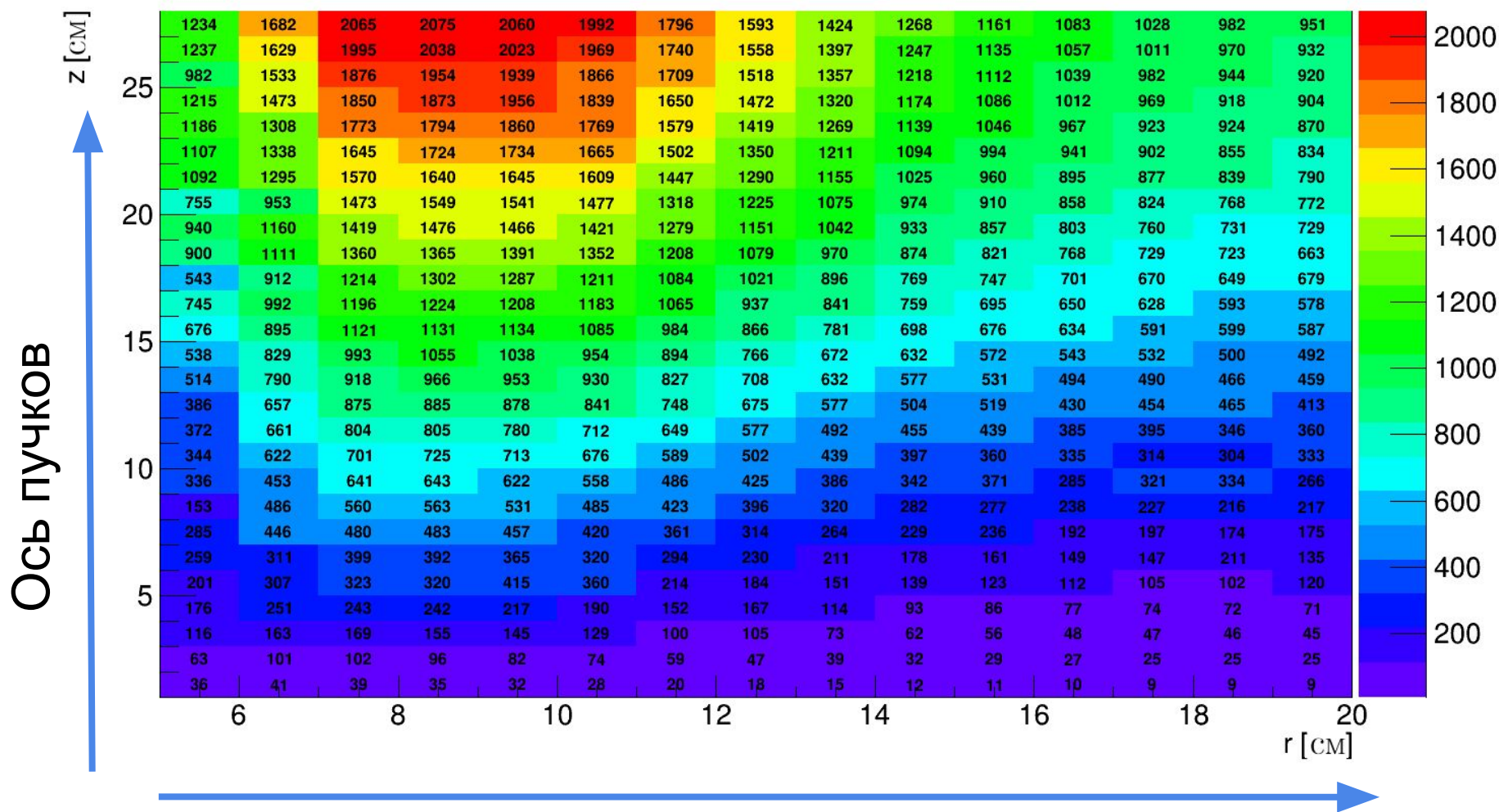
Газ Ar(45%)-iC₄H₁₀(15%)-CF₄(40%)

Коэффициент усиления 10⁴

Поле E = 1000 В/см

Обратный ионный ток 1%

[МКМ]



Максимальное отклонение 2 мм

Радиус ТРС

Заключение

1. Выполнены измерения характеристик детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ, применяемых на установке ДЕЙТРОН и на установке Тестовый пучок электронов ускорительного комплекса ВЭПП-4. Детекторы продемонстрировали стабильную работу в пропорциональном режиме при коэффициенте газового усиления до 5×10^4 . Эффективность детекторов превышает 98% для коэффициента усиления, большего 2×10^4 .
2. Проведено микроскопическое моделирование процесса диффузии и усиления электронов в газе Ar(70%)-CO₂(30%), находящемся при атмосферном давлении и температуре 20°C. Исследованы три случая: однородное поле, один каскад ГЭУ, три каскада ГЭУ. В однородном электрическом поле напряжённостью 5 кВ/см коэффициент поперечной диффузии находится на уровне 320 – 330 мкм/√см. При моделировании одного каскада ГЭУ напряжённость электрического поля в дрейфовом промежутке была равна 2,5 кВ/см, а в индукционном промежутке: 3,8 кВ/см. Напряжённость электрического поля в отверстиях ГЭУ составляла ~ 50 кВ/см. В моделировании одного каскада ГЭУ установлено, что коэффициент эффективной поперечной диффузии находится в диапазоне 240 – 310 мкм/√см: максимальное значение достигается тогда, когда начальный электрон находится над металлом ГЭУ, а минимальное, когда электрон находится над отверстием ГЭУ. Коэффициент эффективной поперечной диффузии для трёхкаскадных ГЭУ составляет 300 ± 20 мкм/√см. Данное значение получено для напряжённости электрического поля 2,0 кВ/см в дрейфовом промежутке и 3,5 кВ/см в остальных промежутках.
3. Построено моделирование процесса регистрации электронов детектором на основе трёхкаскадных ГЭУ и выполнена оценка пространственного разрешения детектора. Пространственное разрешение детектора в моделировании составляет 15 – 20 мкм для шага полосок от 100 мкм до 500 мкм. Измеренное в эксперименте пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ находится на уровне 15 – 30 мкм.
4. Построено моделирование прохождения пи-мезонов через внутренний трекер детектора Супер Чарм-Тау Фабрики для различных вариантов трекера. Варианты включали внутренний трекер на основе четырёх кремниевых слоёв, на основе четырёх слоёв цилиндрических ГЭУ, а также на основе время-проекционной камеры.
Среди изученных вариантов наименьший пороговый импульс пи-мезона, допускающий реконструкцию трека, был получен для внутреннего трекера на основе ТРС с тонкой стенкой и составил 55 МэВ/с. Такая величина порогового импульса получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Внутренняя стенка время-проекционной камеры при этом состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.
5. Проведено моделирование влияния объёмного заряда положительных ионов внутри время-проекционной камеры на траекторию электронов ионизации в рабочем газе. Исследовались различные газовые смеси, при этом было обнаружено, что газ Ar(45%)-iC₄H₁₀(15%)-CF₄(40%) обеспечивает минимальные искажения траектории, составляющие в максимуме 2 мм на 30 см дрейфа во внешнем электрическом поле напряжённостью 1000 В/см и обратном ионном токе 1%. Данная величина искажений сопоставима с эффектом поперечной диффузии. Такие искажения могут быть скорректированы при обработке экспериментальных данных.

Спасибо за внимание!

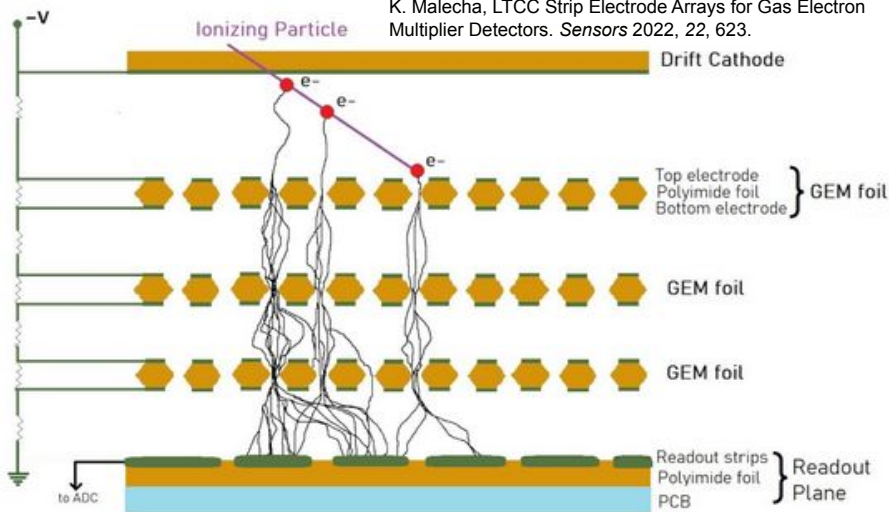
Дополнительные слайды

Comparison of GEM and MicroMegas

GEM

(Gas Electron Multiplier)

A. Dąbrowski, W. Nawrot, M. Czok, M. Babij, P. Bielówka, K. Malecha, LTCC Strip Electrode Arrays for Gas Electron Multiplier Detectors. *Sensors* 2022, 22, 623.



This work, 2026

The performance of GEM-based detectors has been studied in 1 GeV electron beam at Budker Institute of Nuclear Physics.

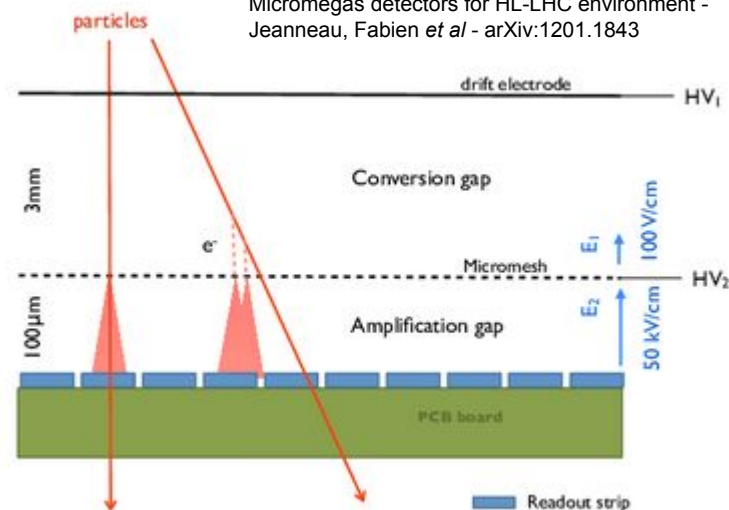
With a gas filling of Ar and 25% CO₂ and with a strip pitch of 250 μm an accuracy of 15 – 30 μm on the spatial resolution has been measured at normal incidence.

A simulation demonstrates that spatial resolution of 10–15 μm can be achieved with application of center-of-gravity differential correction function.

MicroMegas

(Micro-Mesh Gaseous Structure)

Performances and ageing study of resistive-anodes Micromegas detectors for HL-LHC environment - Jeanneau, Fabien *et al* - arXiv:1201.1843



J. Derré, Y. Giomataris, H. Zaccone, A. Bay, J.-P. Perroud, F. Ronga, Spatial resolution in Micromegas detectors, *NIM A*, Vol. 459, P. 523-531, 2001.

The performance of a telescope of Micromegas detectors has been studied in a pion beam at the CERN PS.

With a gas filling of CF₄ and 20% isobutane and with a strip pitch of 100 μm an accuracy of $14 \pm 3 \mu\text{m}$ on the spatial resolution has been measured at normal incidence.

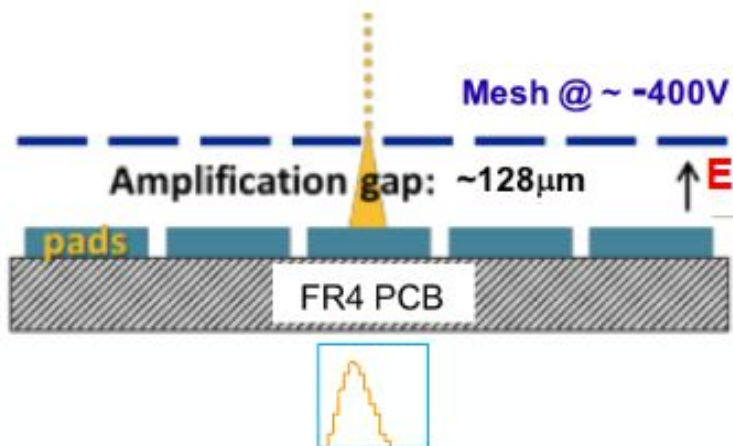
A simulation demonstrates that the resolution is limited by the size of the holes of the mesh of the detector and could be reduced to 11 μm in the same conditions with smaller holes.

Материал для возможного обсуждения

The new HA-TPCs readout
The resistive MicroMegas concept



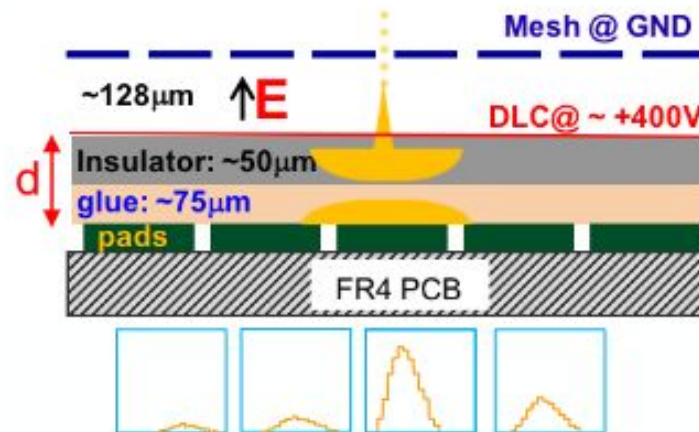
Standard Bulk-MM



If a single pad is fired, then resolution:

$$\sim pad_{size} \sqrt{(12)}$$

Resistive Bulk-MM



M. S. Dixit *et al.*, NIMA 518 (2004), p.721

ILC-TPC R&D: P. Colas *et al.*

- Charge dispersion in 2-D RC network
- Gaussian spreading as a function of time

$$\rho(r, t) = \frac{RC}{2t} e^{\left[\frac{-r^2 RC}{4t}\right]} \quad \sigma_r = \sqrt{\left(\frac{2t}{RC}\right)}$$

R: surface resistivity
C: capacitance/unit area

Encapsulated Resistive Micromegas Detectors
for the Upgrade of the T2K Near Detector
High-Angle Time Projection Chambers

Научная новизна работы

1. Моделирование процесса диффузии и газового усиления электронов в рабочем газе $\text{Ar}(70\%)\text{-CO}_2(30\%)$ детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ продемонстрировало, что коэффициент эффективной поперечной диффузии составляет 300 ± 20 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$ при напряжённости электрического поля 2,0 кВ/см в дрейфовом промежутке и 3,5 кВ/см в остальных промежутках. При моделировании диффузии электрона в однородном электрическом поле напряжённостью 5 кВ/см был получен коэффициент поперечной диффузии, который находился на уровне 320 – 330 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$. Таким образом, было обнаружено, что работа трёхкаскадных ГЭУ эффективно сужает облако электронов ионизации.
2. Экспериментально установлено, что пространственное разрешение детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ находится в диапазоне 15 – 30 мкм. Из моделирования следует, что применение корректировки дифференциальной нелинейности к методу центра тяжести при восстановлении координаты треков позволяет получить пространственное разрешение на уровне 10 мкм, что представляется физическим пределом для детекторов данного типа.
3. Средствами моделирования установлен минимальный импульс пи-мезонов, при котором их траектории могут быть достоверно реконструированы внутренним трекером детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики на основе время-проекционной камеры. Данный импульс составляет 55 МэВ/с. Такая величина порогового импульса получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Внутренняя стенка время-проекционной камеры при этом состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.
4. Обнаружено, что применение внутри время-проекционной камеры газовой смеси $\text{Ar}(45\%)\text{-iC}_4\text{H}_{10}(15\%)\text{-CF}_4(40\%)$ обеспечивает минимальные искажения траектории электронов ионизации, составляющие до 2 мм на 30 см дрейфа, что позволяет применять данную газовую смесь во внутреннем трекере детектора Супер Чарм-Тау Фабрики.

Коэффициент диффузии

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad [\sigma_{\text{Diffusion}}] = \frac{\text{MKM}}{\sqrt{\text{CM}}}$$

$$\sigma = \sqrt{2Dt}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad \sigma_{\text{Diffusion}} = \frac{\sigma_{\text{Cluster}}}{\sqrt{\Delta z}}$$

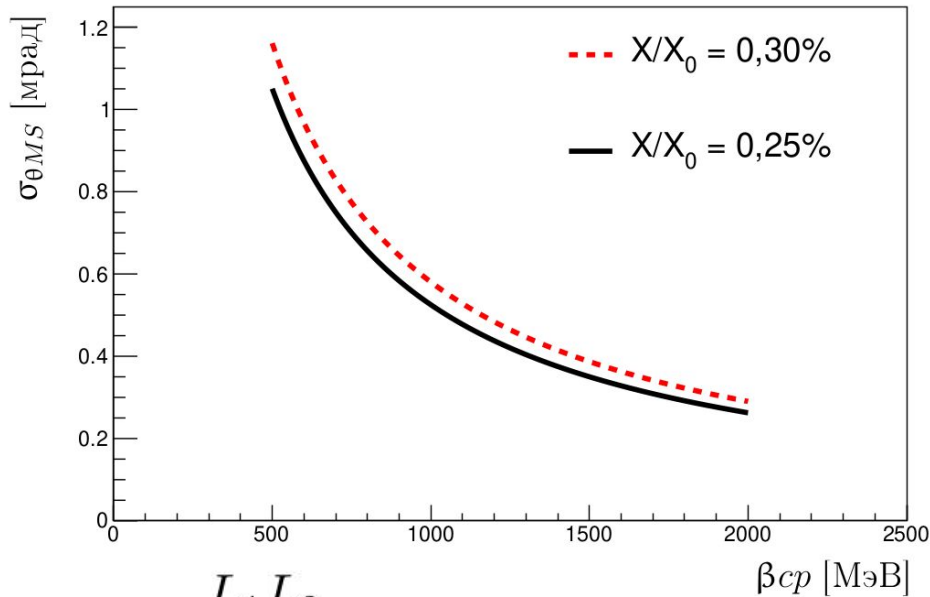
$$z = v \cdot t$$

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D \cdot \frac{z}{v}} = \sqrt{\frac{2D}{v}} \cdot \sqrt{z} = \sigma_{\text{Diffusion}} \cdot \sqrt{z}$$

$$\sigma_{\text{Diffusion}} = \sqrt{\frac{2D}{v}}$$

Вклад эффекта многократного рассеяния в измеряемое пространственное разрешение

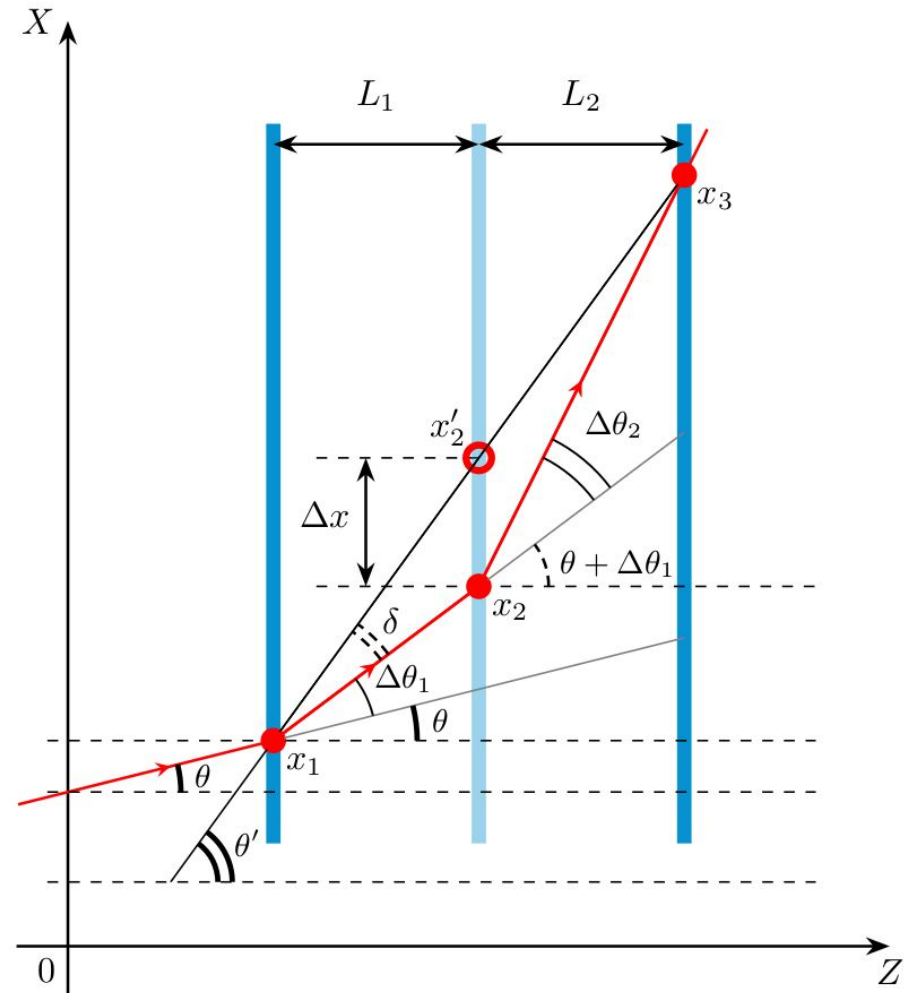
$$\sigma_{\theta MS} = \frac{13,6 \text{ МэВ}}{\beta_{cp} [\text{МэВ}]} \cdot \sqrt{\frac{X}{X_0}} \cdot \left[1 + 0,038 \cdot \ln \left(\frac{X}{X_0} \right) \right]$$



$$\Delta x = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \cdot \Delta \theta_2$$

$$\sigma_{\theta MS} = \sigma_{\Delta \theta_2}$$

$$\sigma_{x MS} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \cdot \sigma_{\theta MS}$$



Вклад ограниченного пространственного разрешения трековых детекторов

$$\Delta x = x'_2 - x_2$$

$$\sigma_{\Delta x}^2 = \sigma_{x'_2}^2 + \sigma_{x_2}^2$$

$$\sigma_{xresid} = \sigma_{\Delta x}$$

$$\sigma_{detector} = \sigma_{x_2} = \sigma_{d2}$$

$$\sigma_{xTrack} = \sigma_{x'_2}$$

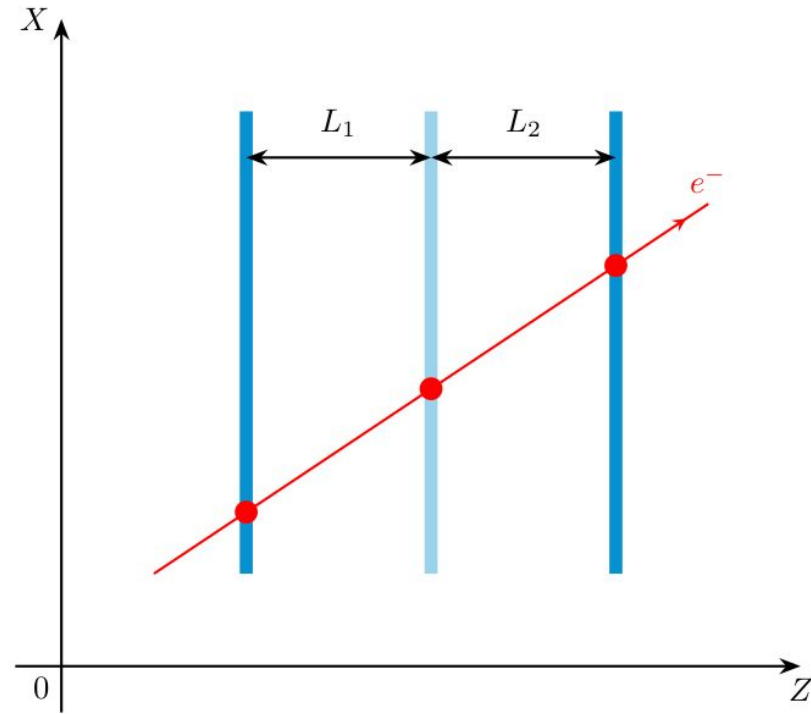
$$x'_2 = (1 - \lambda) \cdot x_1 + \lambda \cdot x_3$$

$$\sigma_{x'_2}^2 = ((1 - \lambda) \cdot \sigma_{x_1})^2 + (\lambda \cdot \sigma_{x_3})^2$$

$$\sigma_{d1} = \sigma_{x_1}$$

$$\sigma_{d3} = \sigma_{x_3}$$

$$\lambda = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$



$$\sigma_{xTrack}^2 = (1 - \lambda)^2 \cdot \sigma_{d1}^2 + \lambda^2 \cdot \sigma_{d3}^2$$

Вычитание вкладов для извлечения собственного пространственного разрешения

Общий случай:

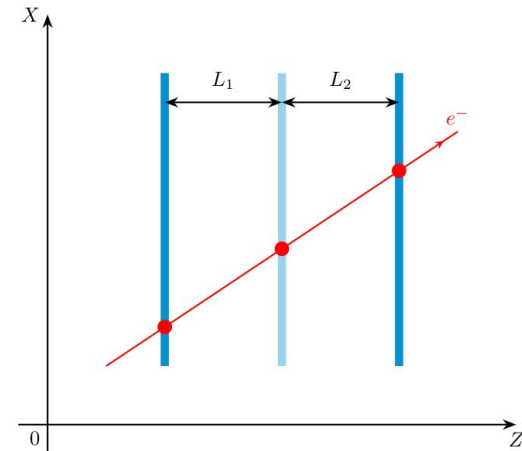
$$\sigma_{detector}^2 = \sigma_{xresid}^2 - \left(\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \right)^2 \sigma_{\theta MS}^2 - \left(\frac{L_2}{L_1 + L_2} \right)^2 \sigma_{d1}^2 - \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} \right)^2 \sigma_{d3}^2$$

Частный случай: все детекторы обладают одинаковым пространственным разрешением и расстояния между детекторами одинаковые

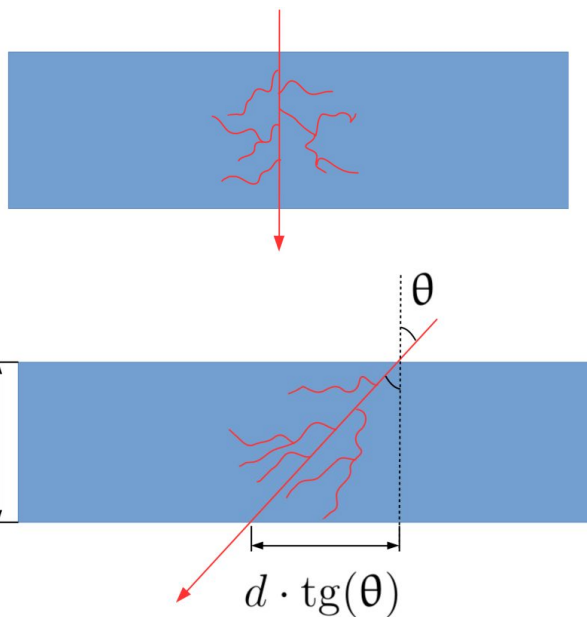
$$\sigma_{d1} = \sigma_{d2} = \sigma_{d3} = \sigma_{detector}$$

$$L_1 = L_2 = L$$

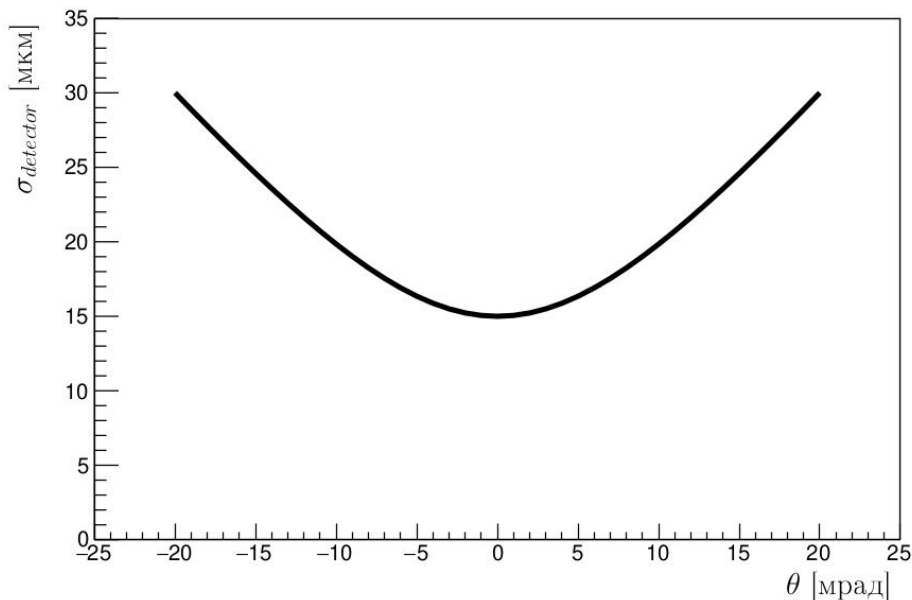
$$\sigma_{detector} = \frac{\sqrt{\sigma_{xresid}^2 - \sigma_{xMS}^2}}{\sqrt{3/2}}$$



Зависимость собственного пространственного разрешения детектора от угла наклона трека



$$\sigma_{detector}(\theta) = \sqrt{\sigma_{detector}^2(0) + \left(\frac{d \cdot \operatorname{tg}(\theta)}{\sqrt{12}}\right)^2}$$



Модельный пример зависимости пространственного разрешения детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ от угла наклона регистрируемого трека.

Параметр	Значение
$\sigma_{detector}(0)$	15 мкм
Толщина дрейфового промежутка d	4,5 мм

Отношение сигнала к шуму (Signal-to-Noise Ratio (SNR))

Детектор	1 отсчёт АЦП	σ_{Noise}
DEUTERON	114 e	3 000 e
TBF	162 e	4 000 e

Результаты калибровки электроники детекторов

$$N_{total} = Gain \cdot N_{thermal}$$

$$SNR = \frac{N_{signal}}{\sigma_{Noise}}$$

$$N_{signal} = \frac{1}{2} \cdot N_{total}$$

Зарегистрированный сигнал.
Каждая вторая полоска – сигнальная

Детектор	d [мм]	$N_{thermal}, e $	SNR
DEUTERON	3,0	28	50 – 190
TBF	4,5	42	50 – 210

Расчёт значения SNR для детекторов при коэффициенте усиления в диапазоне $(1-4) \times 10^4$. Буквой d обозначена толщина дрейфового промежутка.

Метод юстировки детекторов по трекам

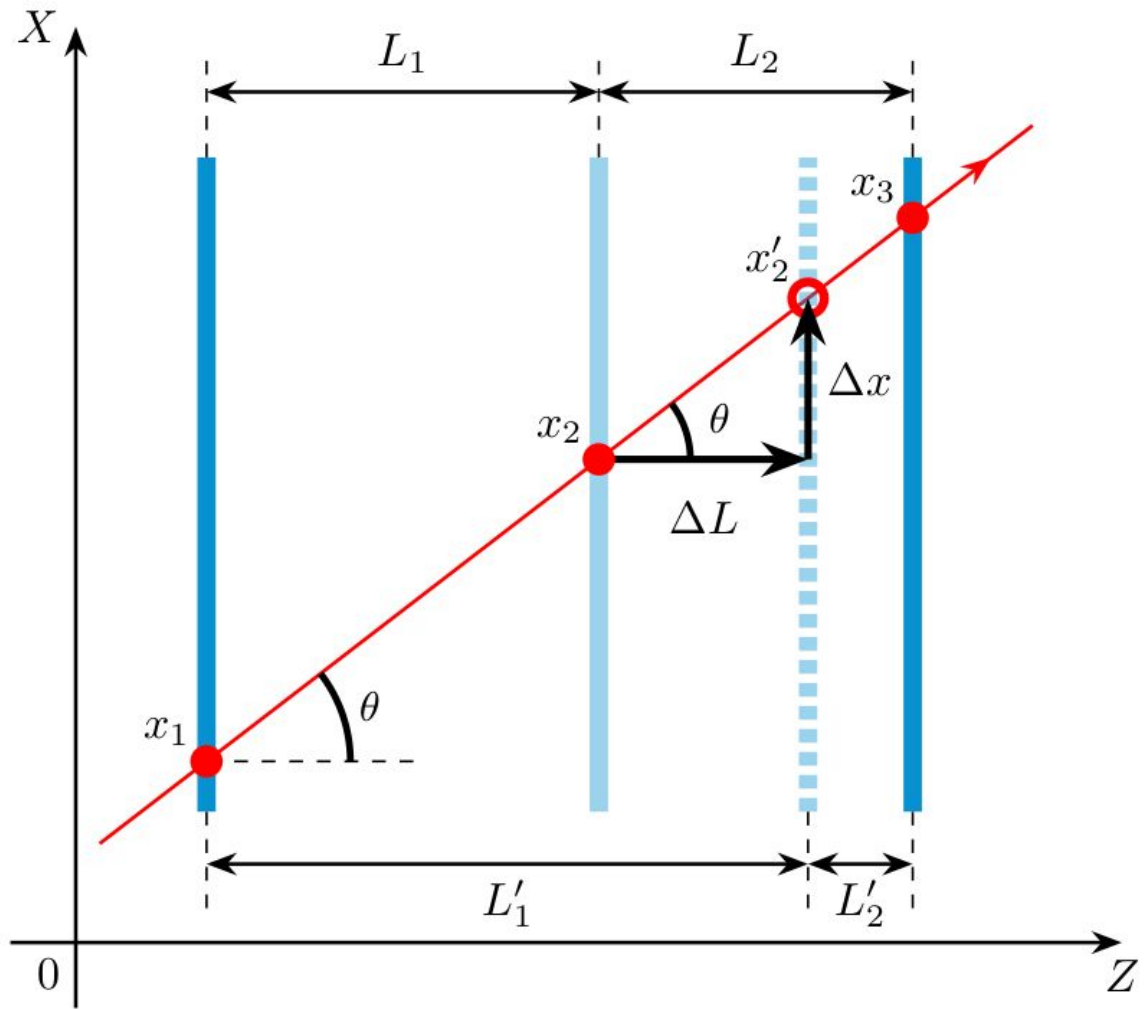
$$\lambda_{true} = \frac{L_1}{L_1 + L_2}$$

$$\lambda = \frac{L'_1}{L'_1 + L'_2}$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_{true}$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{true} \cdot \frac{\Delta L}{L_1}$$

$$\Delta x = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{true}} \cdot L_1 \cdot \theta$$

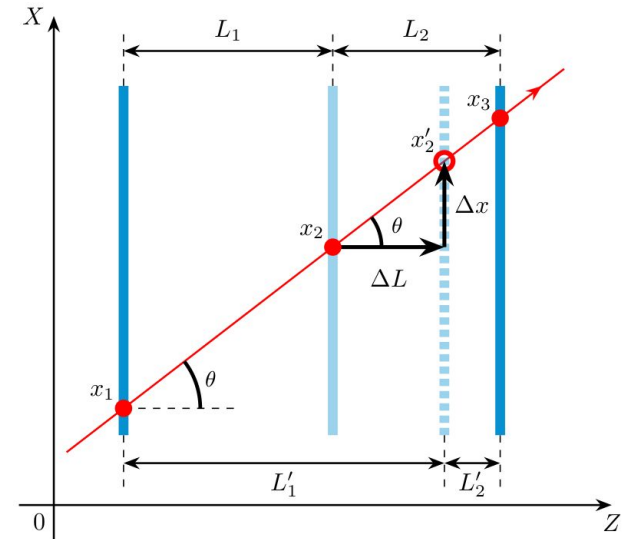


Моделирование юстировки детекторов по трекам

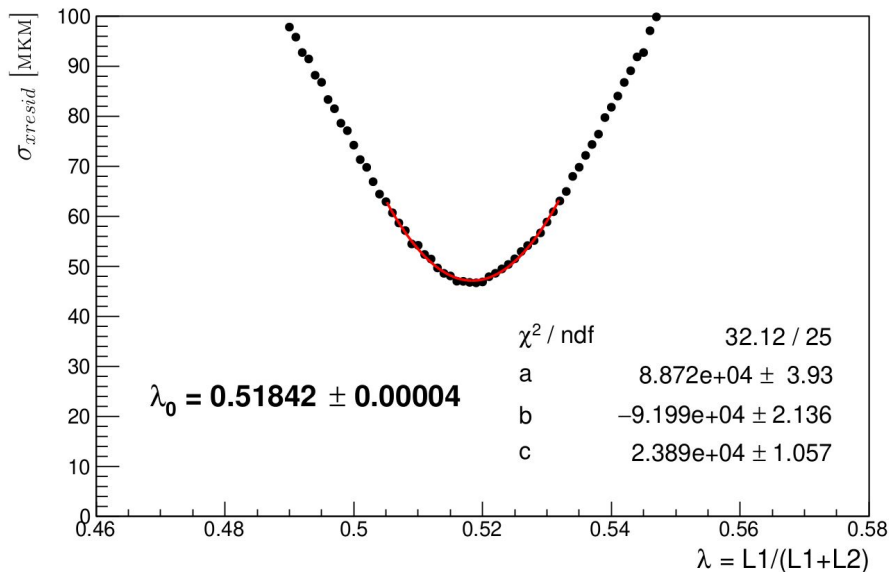
Сканирование событий по параметру λ

$$\lambda_{true} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{140}{140 + 130} \approx 0,5185$$

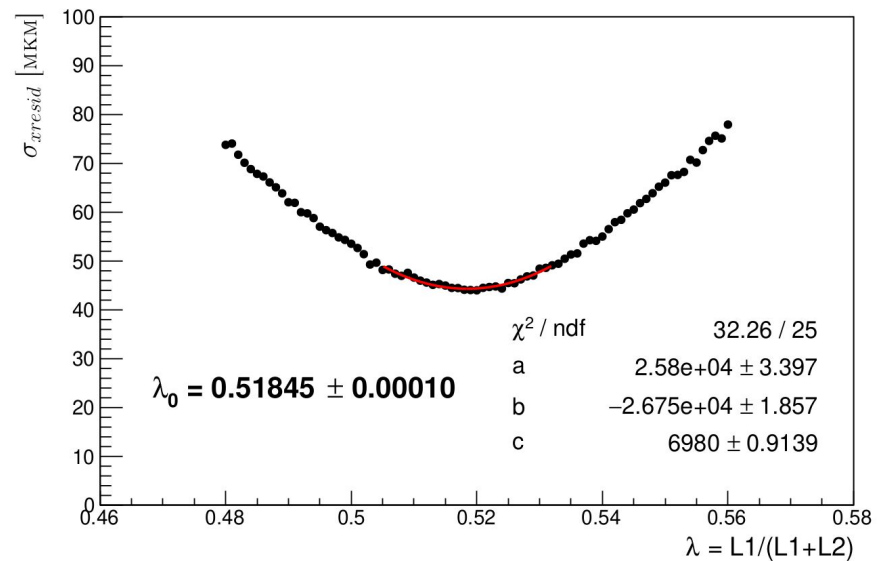
$$f(\lambda) = a \cdot \lambda^2 + b \cdot \lambda + c$$



$\theta \in [-20, +20]$ мрад



$\theta \in [-10, +10]$ мрад



Материалы детектора в моделировании

Название	Материал	Толщина
Первый слой	Каптон	50 мкм
Катод	Медь	5 мкм
Дрейфовый промежуток	Ar(75%)-CO ₂ (25%)	3,0 мм
ГЭУ-1		60 мкм
Первый транспортный промежуток	Ar(75%)-CO ₂ (25%)	1,5 мм
ГЭУ-2		60 мкм
Второй транспортный промежуток	Ar(75%)-CO ₂ (25%)	1,5 мм
ГЭУ-3		60 мкм
Индукционный промежуток	Ar(75%)-CO ₂ (25%)	2,0 мм
Анод	Медь	5 мкм
Последний слой	Каптон	50 мкм

Название	Материал	Толщина
Верхний электрод ГЭУ	Прореженная медь	5 мкм
Каптон ГЭУ	Прореженный каптон	50 мкм
Нижний электрод ГЭУ	Прореженная медь	5 мкм

Результаты моделирование пространственного разрешения в программе GEANT4

Шаг полосок, мкм	$\sigma_{detector}$, мкм	Алгоритм	$\langle N_{strips} \rangle$
100	$17,6 \pm 0,6$	Порог 10%	10,7
200	$15,4 \pm 0,5$	Порог 10%	5,4
300	$14,4 \pm 0,4$	Порог 10%	3,7
400	$15,6 \pm 0,5$	Порог 10%	2,9
500	$18,1 \pm 0,6$	3 полоски	3,0

Параметрическое моделирование (выбор параметров)

Детектор	MPV(WPR)	σ (WPR)
DEUTERON	0,44	0,001
TBF	1,00	0,01

Параметры распределения Ландау при моделировании величины WPR для детекторов разных типов. MPV – Most Probable Value.

Количество сработавших полосок в кластере коррелирует с полным сигналом этого кластера. Если отобрать события с фиксированным количеством полосок, то их сигнал распределён по Ландау. Значение SNR для каждого события выбиралось из отдельного распределения Ландау, параметры которого зависели от конкретного значения WPR в этом событии.

$$MPV(SNR) = 40 \cdot (1 - \exp(-\eta \cdot WPR))$$

Детектор	Значение η в формуле	σ (SNR)
DEUTERON	2	7
TBF	1	7

Параметры распределения Ландау при моделирования величины SNR для детекторов разных типов.

Детектор	Порог регистрации сигнала
DEUTERON	$3 \cdot \sigma_{Noise}$
TBF	$6 \cdot \sigma_{Noise}$

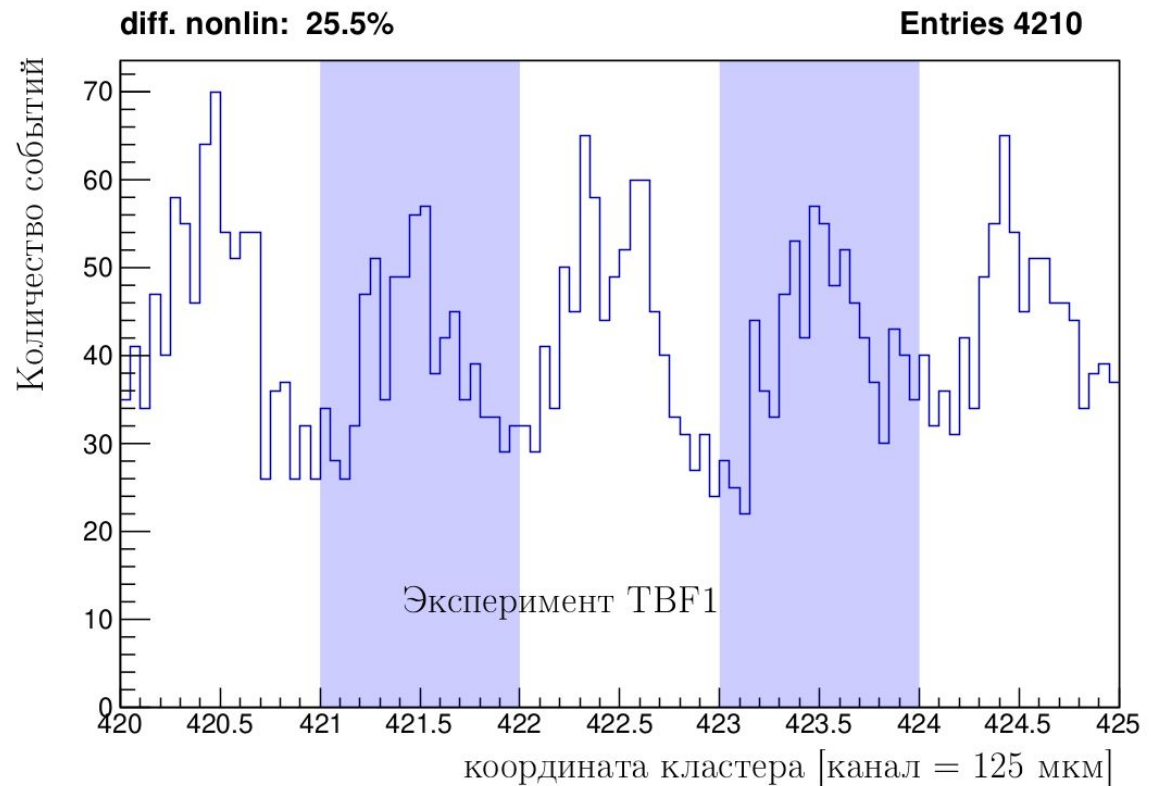
Порог регистрации сигнала для детекторов разных типов в моделировании

Определение дифференциальной нелинейности

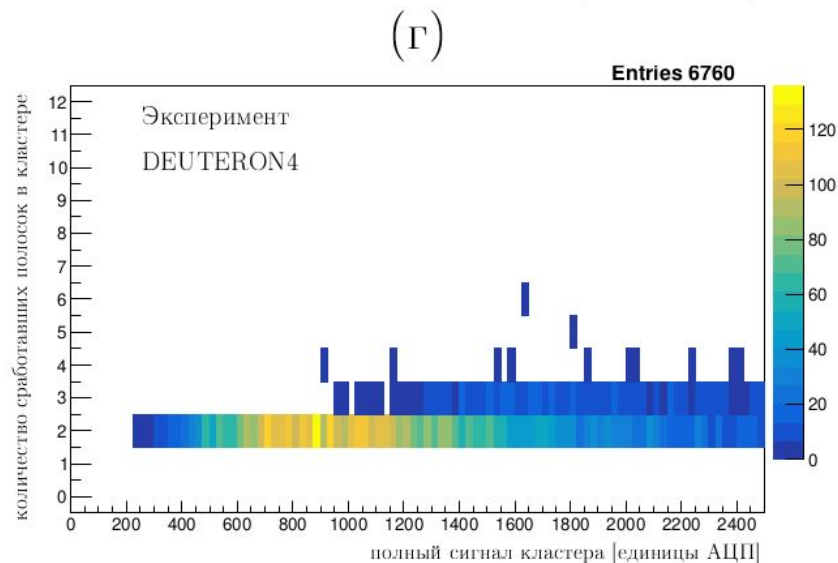
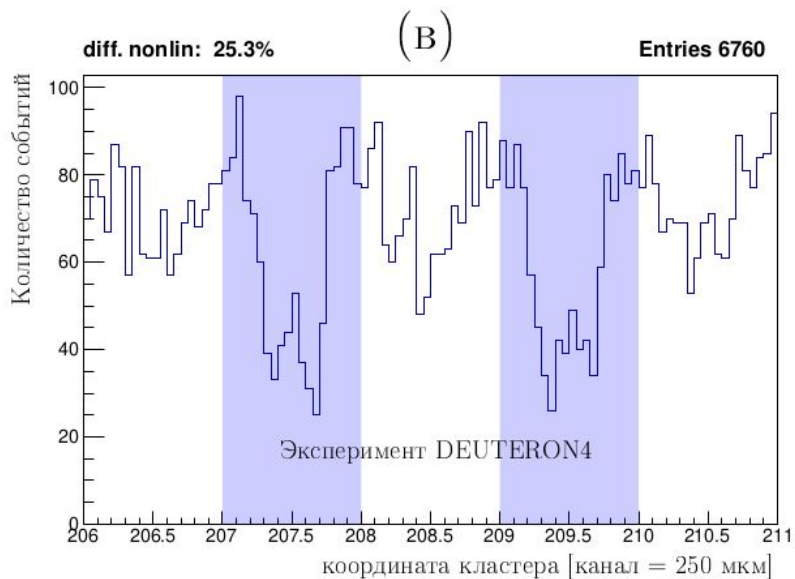
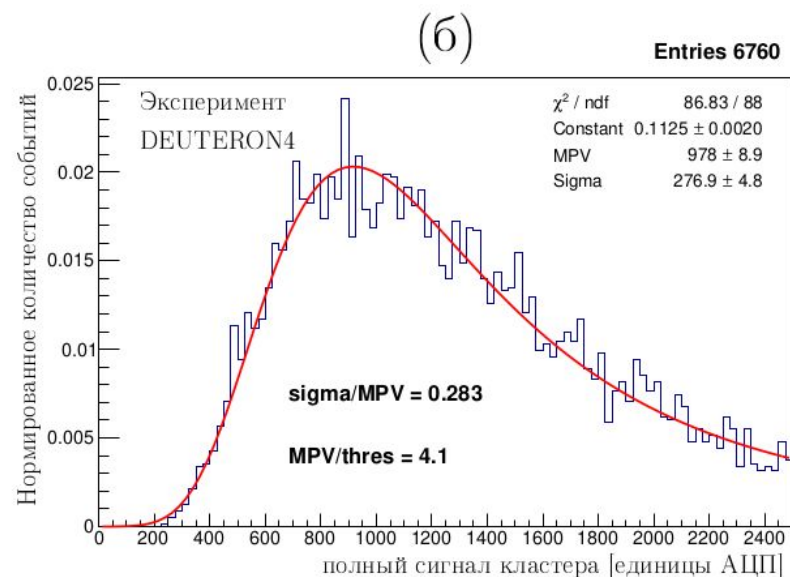
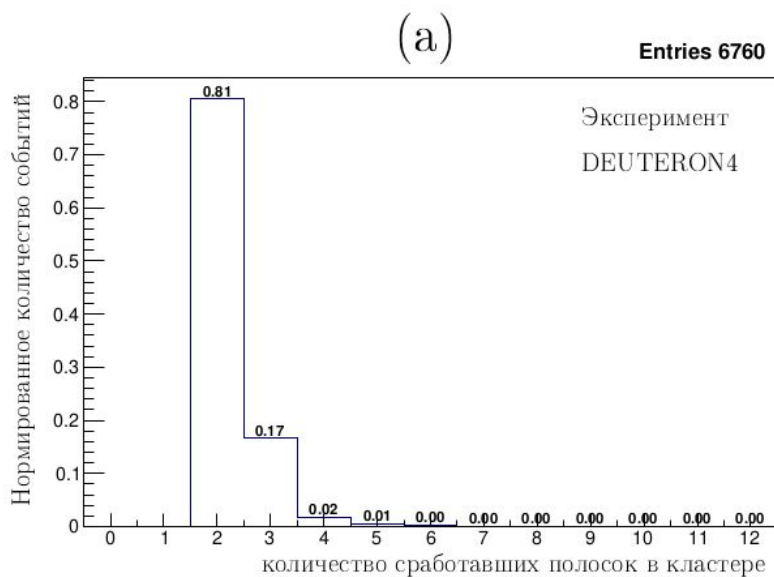
$$\bar{k} = \frac{\sum_{i \in W} k_i}{N}$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i \in W} (k_i - \bar{k})^2}{N - 1}}$$

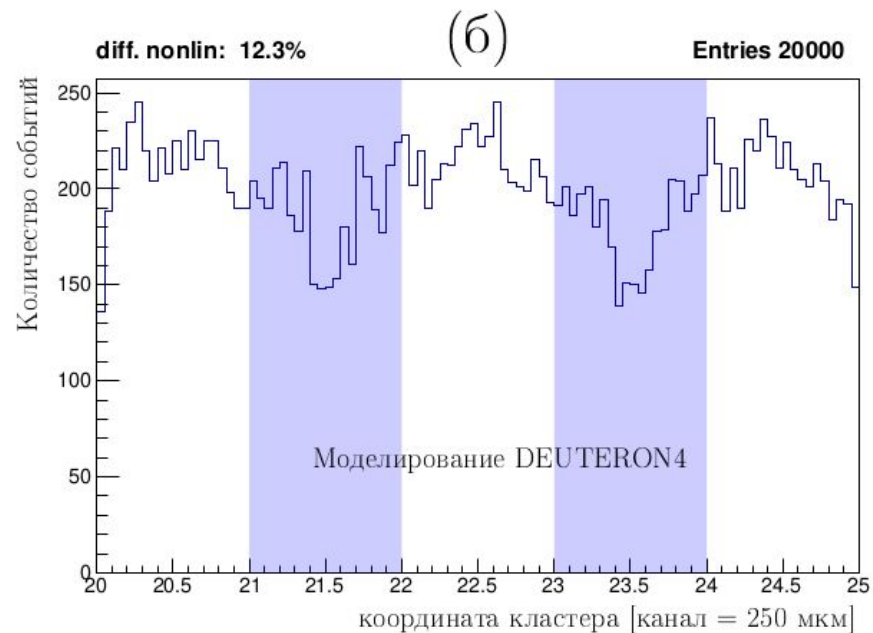
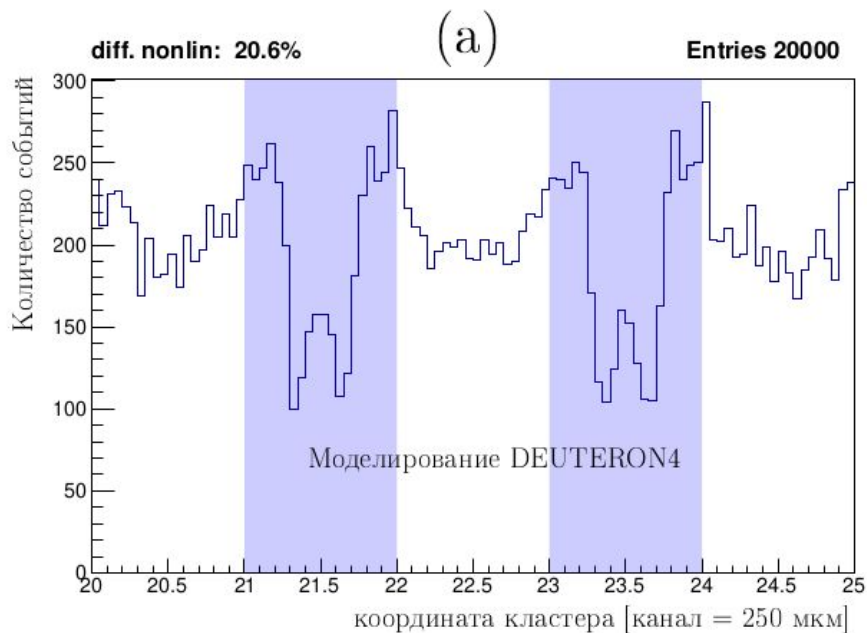
$$\text{diff. nonlin.} = \frac{\sigma_k}{\bar{k}}$$



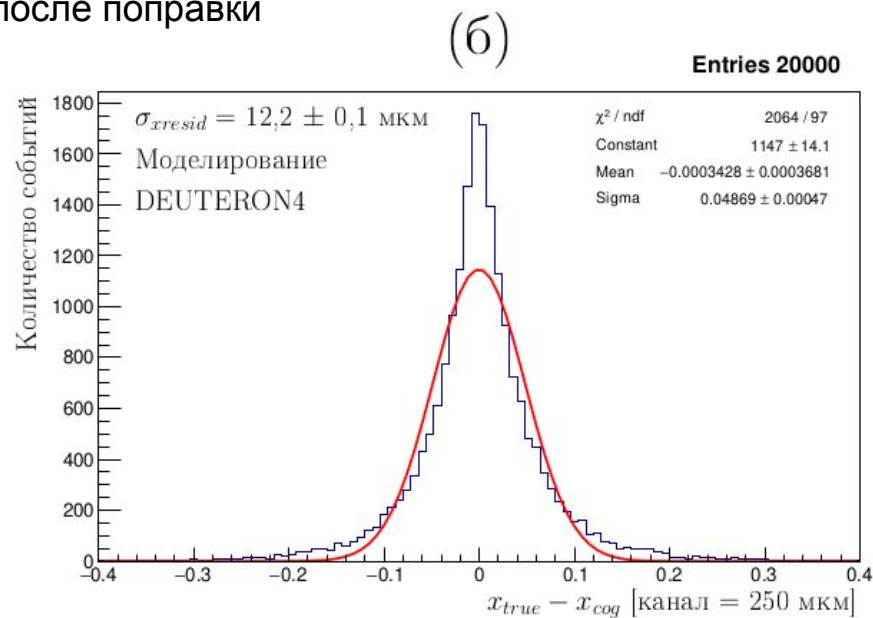
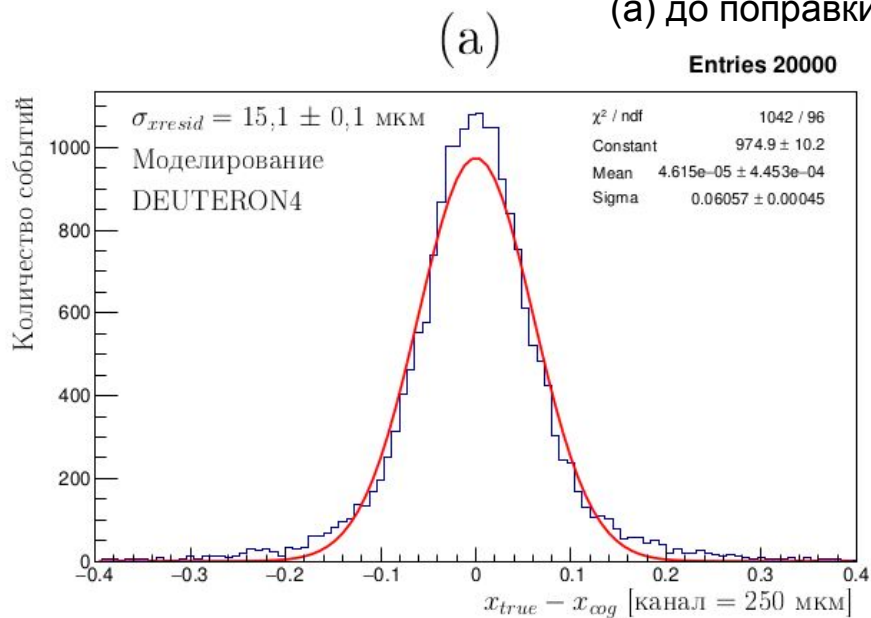
Параметрическое моделирование (экспериментальные данные)



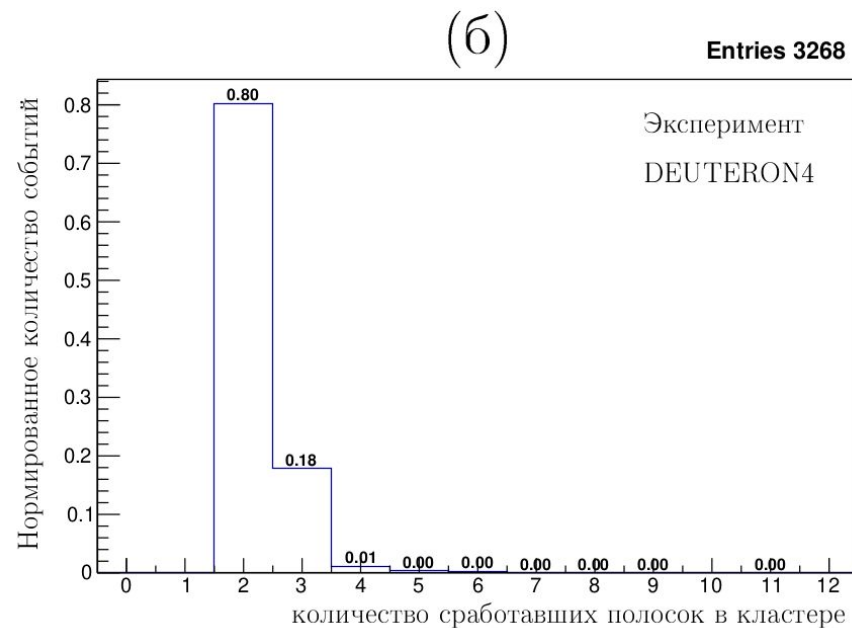
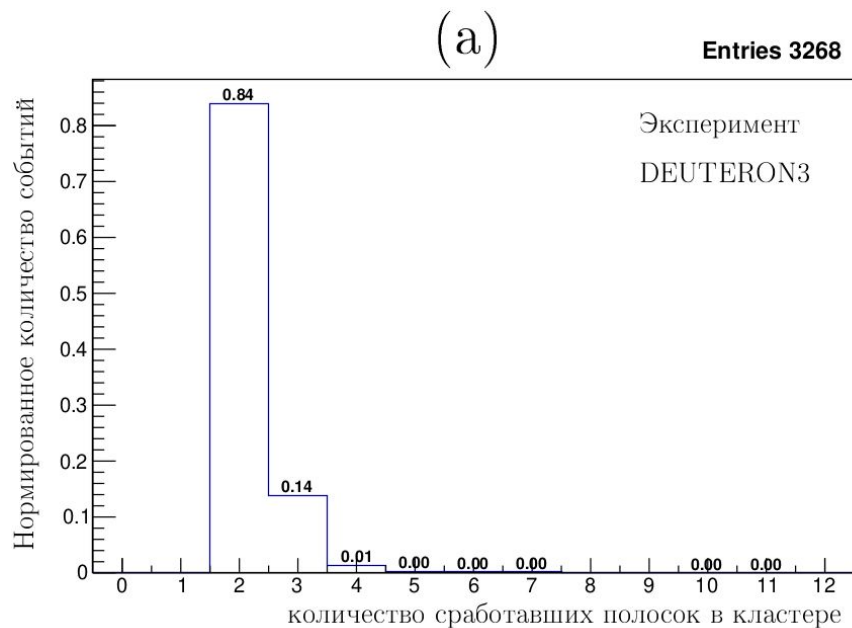
Корректировка дифф. нелинейности в моделировании



(а) до поправки; (б) после поправки

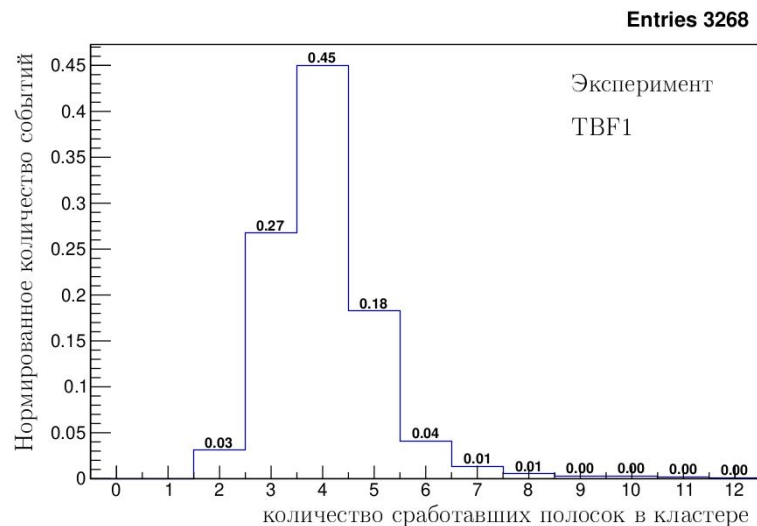


Количество сработавших полосок в эксперименте



Нормированные распределения событий по количеству сработавших полосок для детекторов: (а) DEUTERON3; (б) DEUTERON4

Нормированное распределение событий по количеству сработавших полосок для детектора TBF1



Шаг полосок и ширина канала

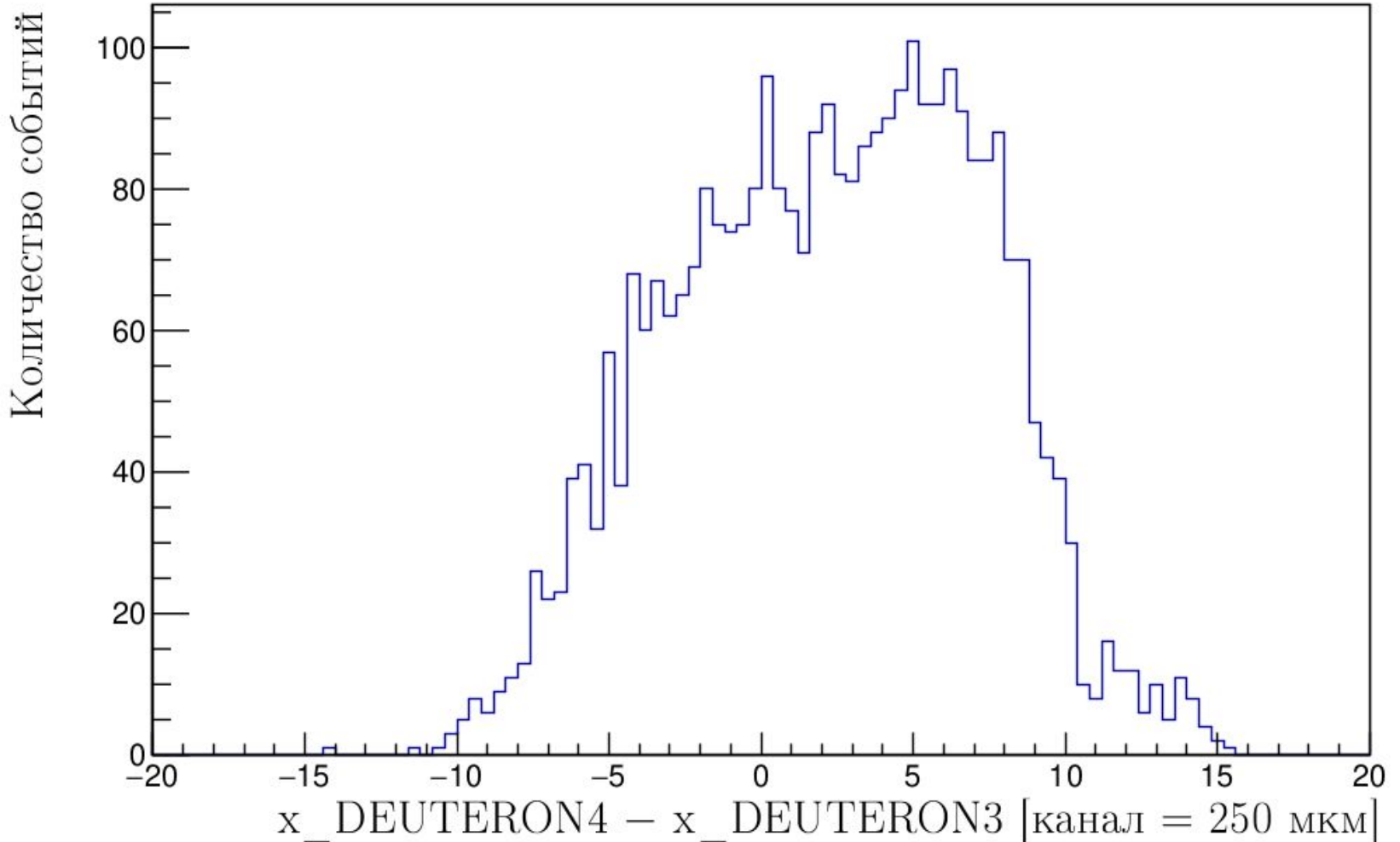
Тип детектора	Шаг сигнальных полосок
DEUTERON	500 мкм
TBF	250 мкм

$$x[\text{мкм}] = K_{coord} \left[\frac{\text{мкм}}{\text{канал}} \right] \cdot x[\text{канал}]$$

Тип детектора	K_{coord}
DEUTERON	250 мкм/канал
TBF	125 мкм/канал

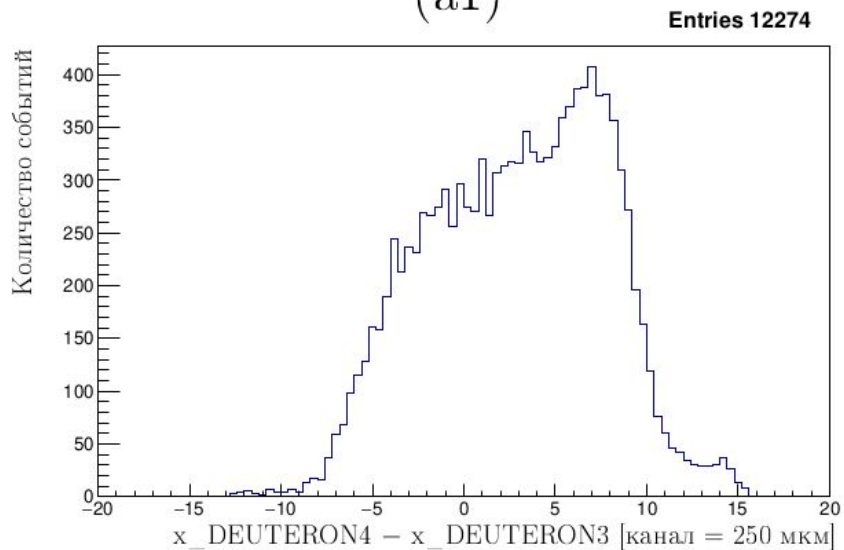
Распределение событий по разности координат трековых детекторов в эксперименте

Entries 3268

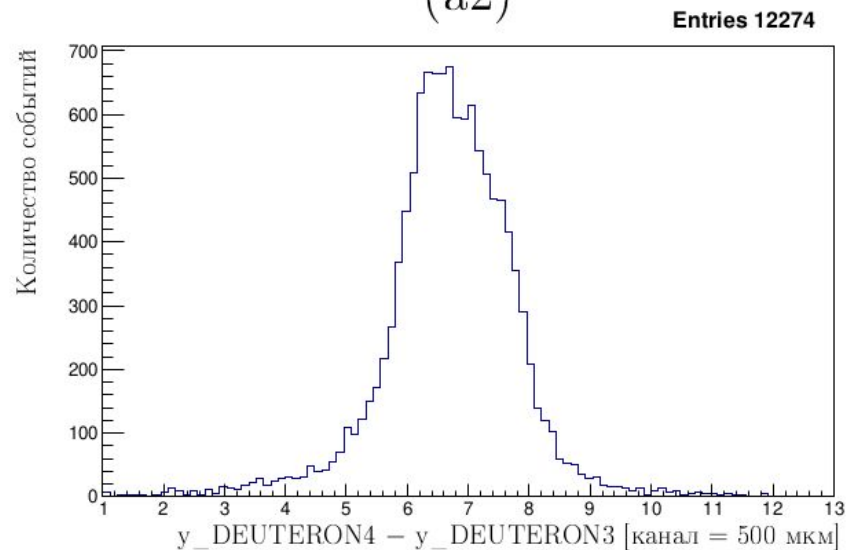


Экспериментальные данные

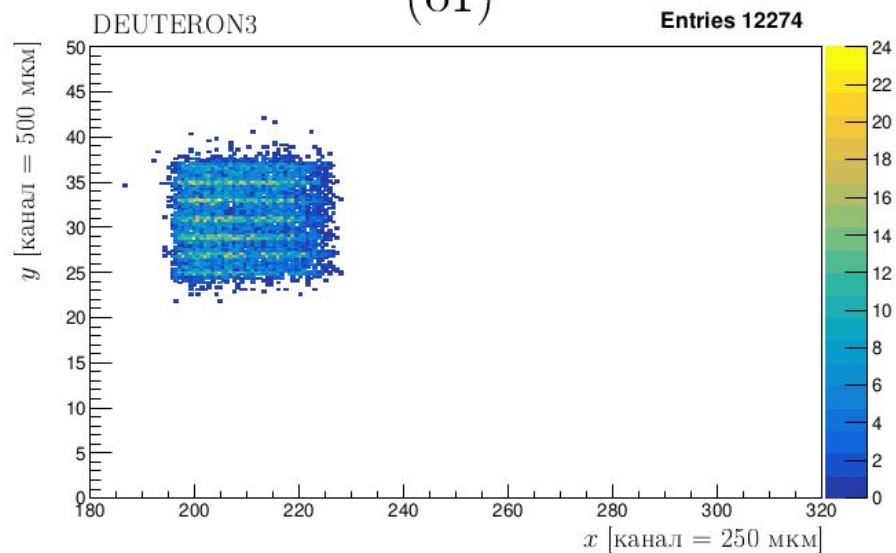
(a1)



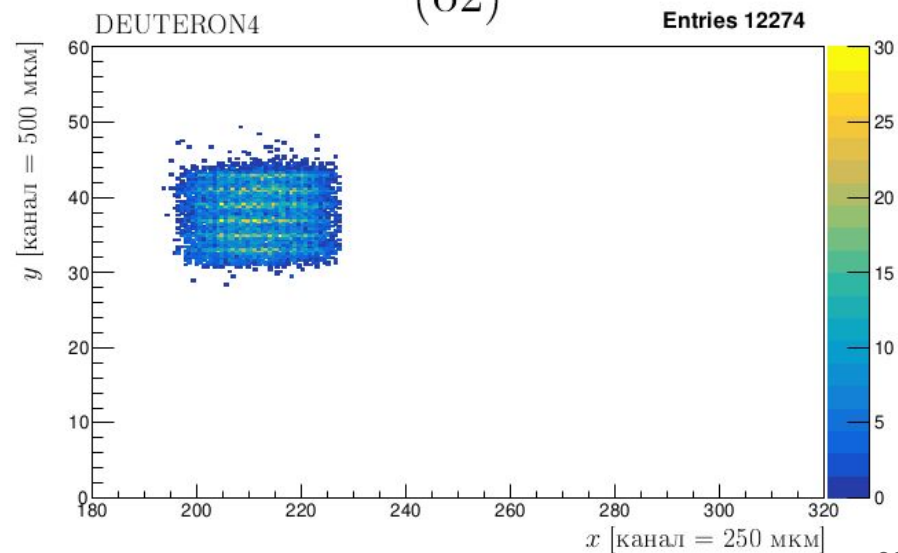
(a2)



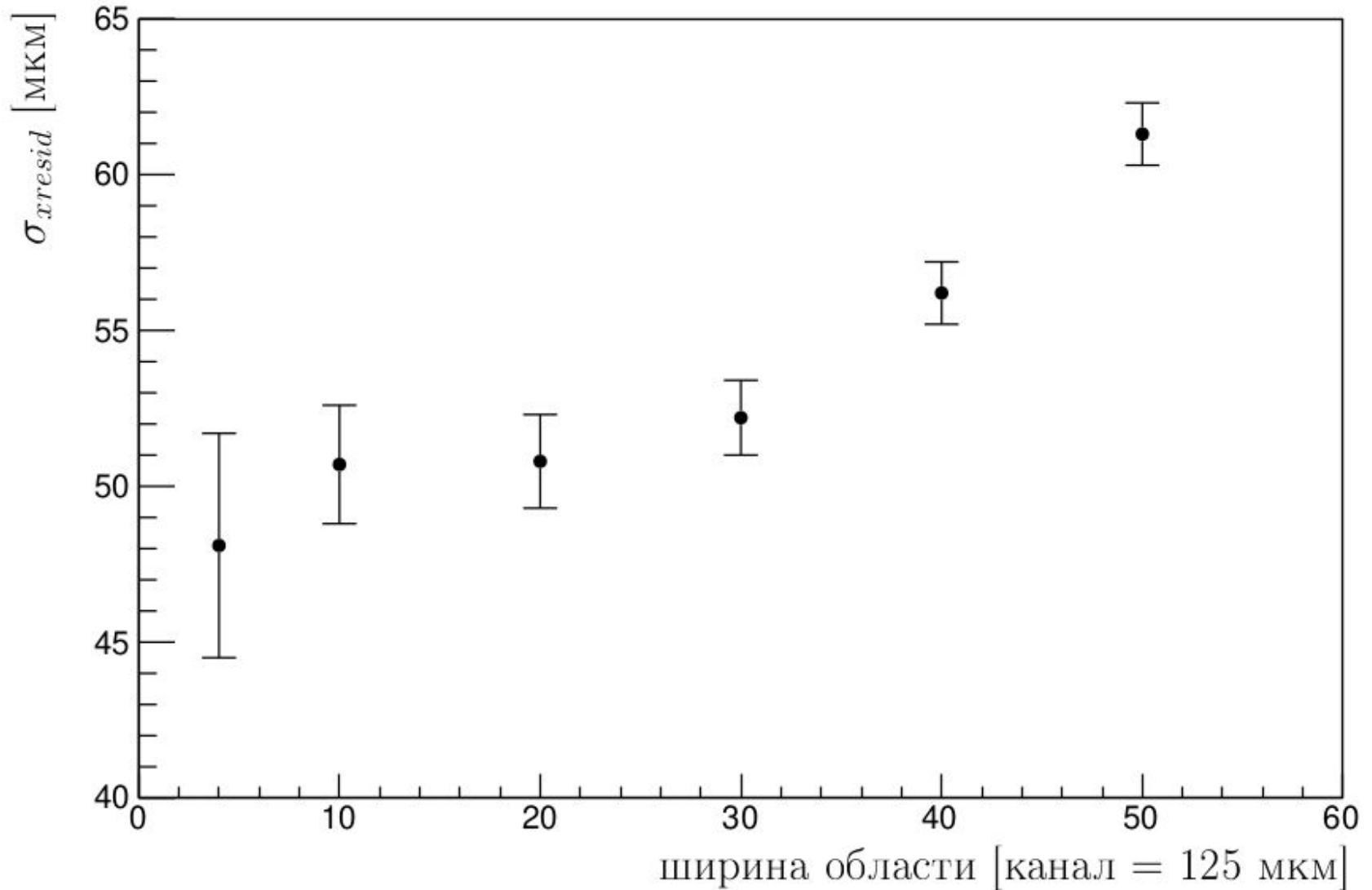
(б1)



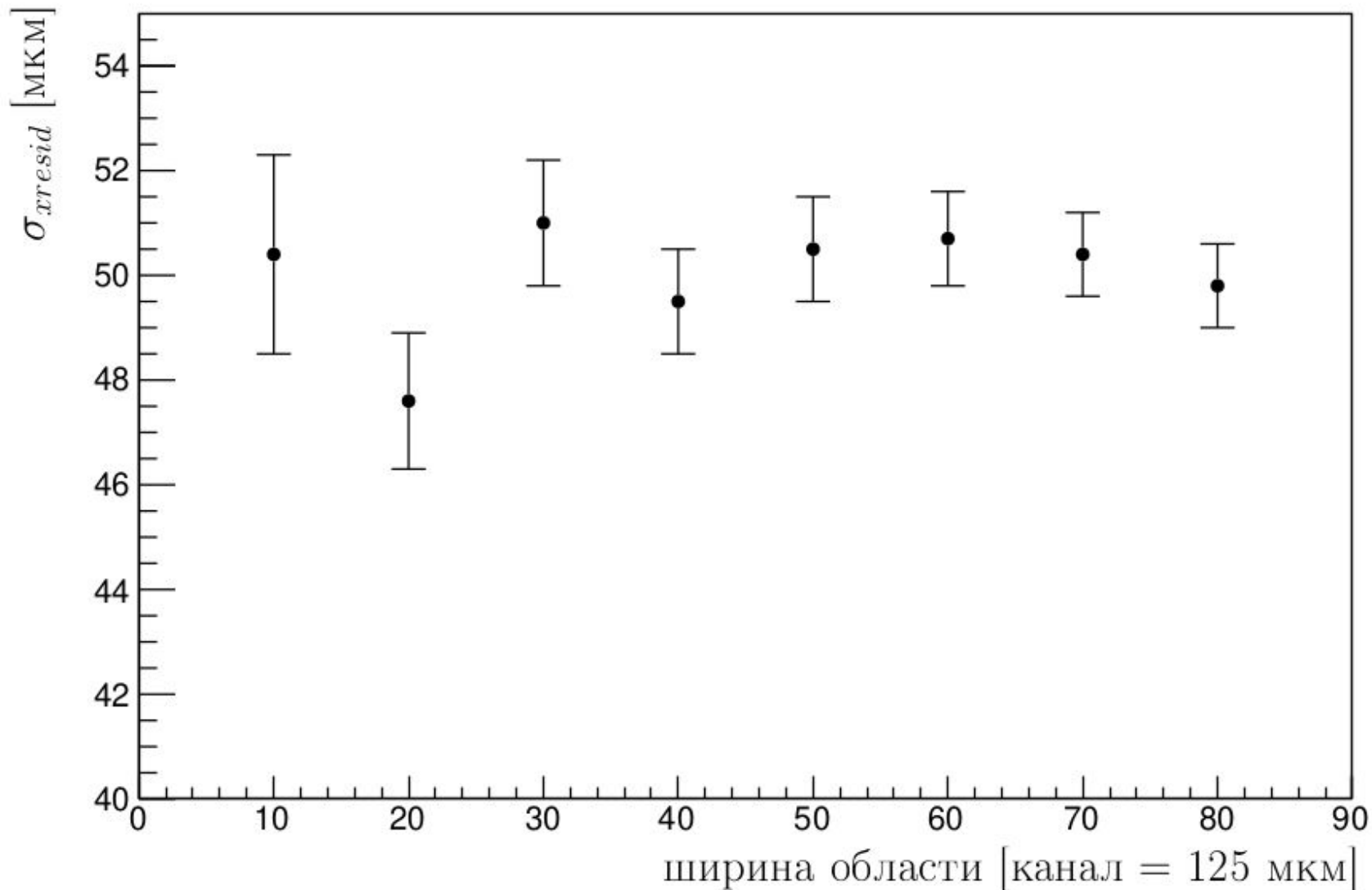
(б2)



Эксперимент: расширение области по вертикали



Эксперимент: расширение области по горизонтали



Оценка возможности улучшения пространственного разрешения за счёт корректировки дифф. нелинейности в эксперименте

Детектор	До поправки	После поправки
DEUTERON4	15,1 ± 0,1	12,2 ± 0,1
TBF1	16,2 ± 0,1	9,0 ± 0,1

Результаты параметрического моделирования.
Пространственное разрешение детекторов разных типов, выраженное в микрометрах.

Значения для детектора DEUTERON4

$\sigma_{detector}$ [МКМ]	σ_{xresid} [МКМ]
15,1	44,1
12,2	42,7

$\Delta\sigma_{detector}$ [МКМ]	$\Delta\sigma_{xresid}$ [МКМ]
2,9	1,4

Значения для детектора TBF1

$\sigma_{detector}$ [МКМ]	σ_{xresid} [МКМ]
16,2	44,7
9,0	41,5

$\Delta\sigma_{detector}$ [МКМ]	$\Delta\sigma_{xresid}$ [МКМ]
7,2	3,2

$$\sqrt{\sigma_{xMS}^2 + \frac{3}{2} \cdot \sigma_{detector}^2} = \sigma_{xresid}$$

$$\sigma_{xMS} = 40 \text{ МКМ}$$

Теоретический анализ вычитания вкладов

