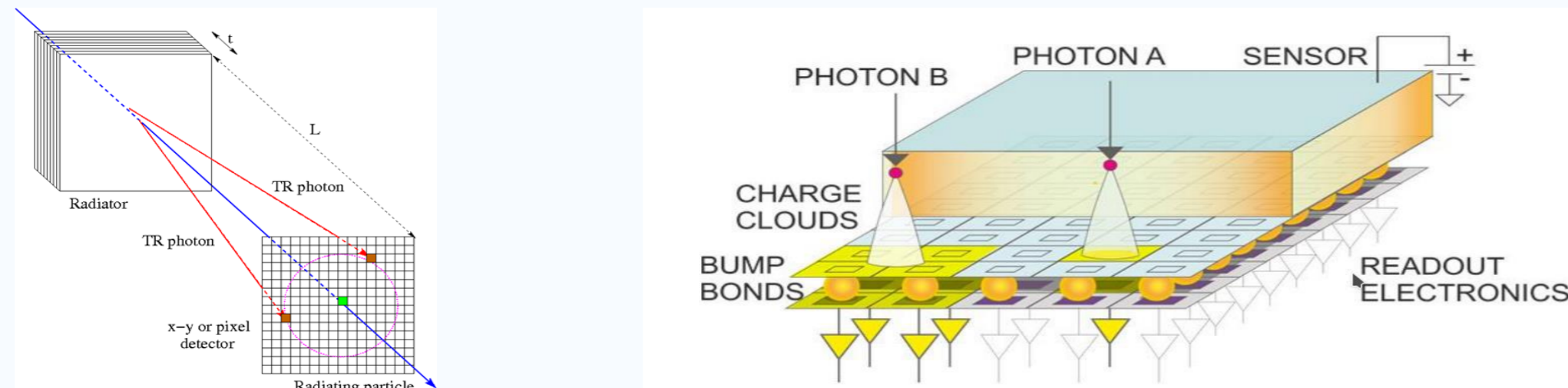


Аннотация

Детекторы переходного излучения используются для идентификации ультрарелятивистских заряженных частиц по рентгеновским фотонам, возникающим при прохождении частицы через многослойный радиатор. Применение пиксельных полупроводниковых сенсоров на основе GaAs позволяет регистрировать как ионизационные потери заряженной частицы, так и отдельные фотоны переходного излучения с высоким пространственным разрешением. Благодаря большой эффективности поглощения рентгеновских фотонов в диапазоне десятков кэВ GaAs-сенсор является перспективной альтернативой газовым детекторам переходного излучения [1-3]. В работе исследуется прототип детектора на основе GaAs-сенсора толщиной 500 мкм, соединённого с чипом Timepix3. Данный детектор совмещает свойство идентификации частиц и прецизионного измерения их координат.

1. Детектор и регистрируемый сигнал

Детектор состоит из радиатора, полупроводниковой матрицы и считывающей электроники. Заряженная частица проходит через радиатор генерируя фотоны переходного излучения (их количество пропорционально γ). Рожденные фотоны и частица пучка падают на детектор, по количеству вторичных кластеров (фотонов ПИ) определяется тип частицы, а благодаря малому размеру пикселя и диффузии носителей зарядов с высокой точностью определяется координата частицы.



Ключевые параметры:

- Сенсор GaAs:Cr толщиной 500 мкм;
- Чип - Timepix3, матрица 256×256 пикселей (65536 каналов), шаг 55 мкм;
- Активная область ≈14×14 мм²;
- Режим ToT: длительность импульса над порогом используется как мера энерговыделения (1 бин ToT ≈ 1 кэВ);
- Порог пикселя ≈ 3.4 кэВ;

2. Попиксельная калибровка ToT → E

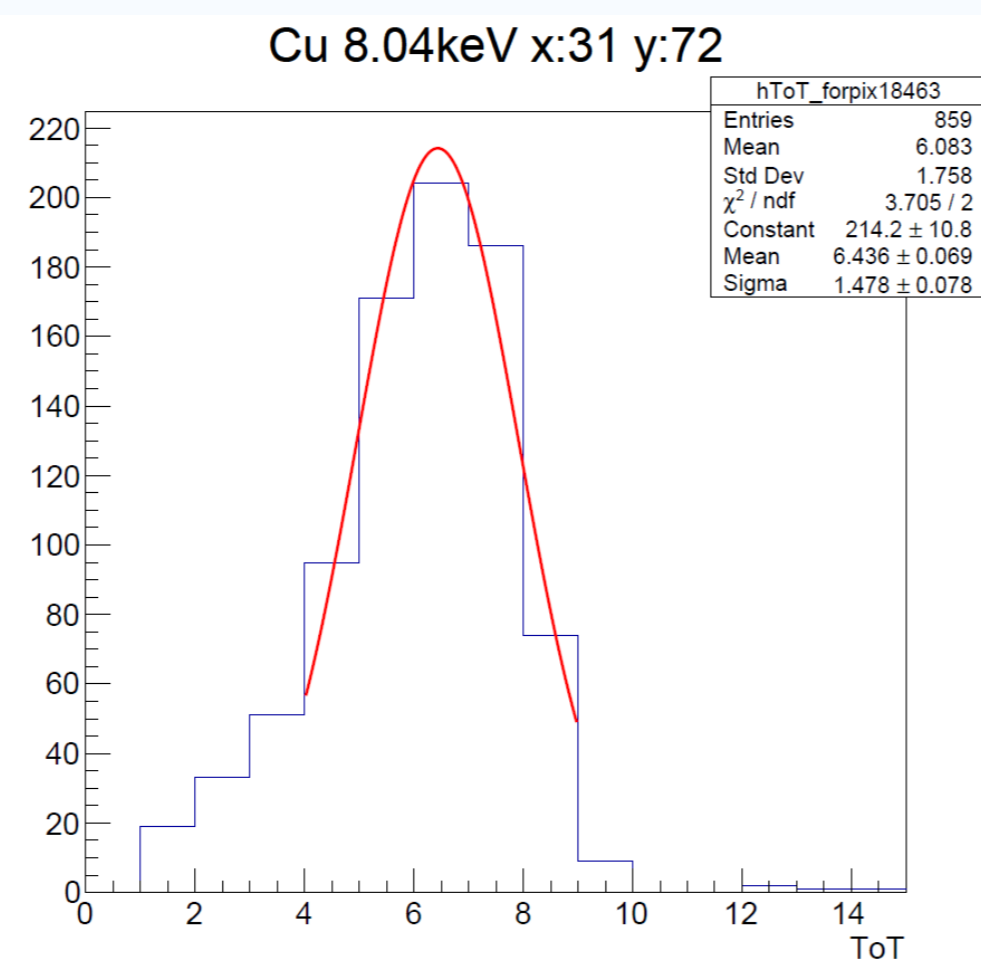
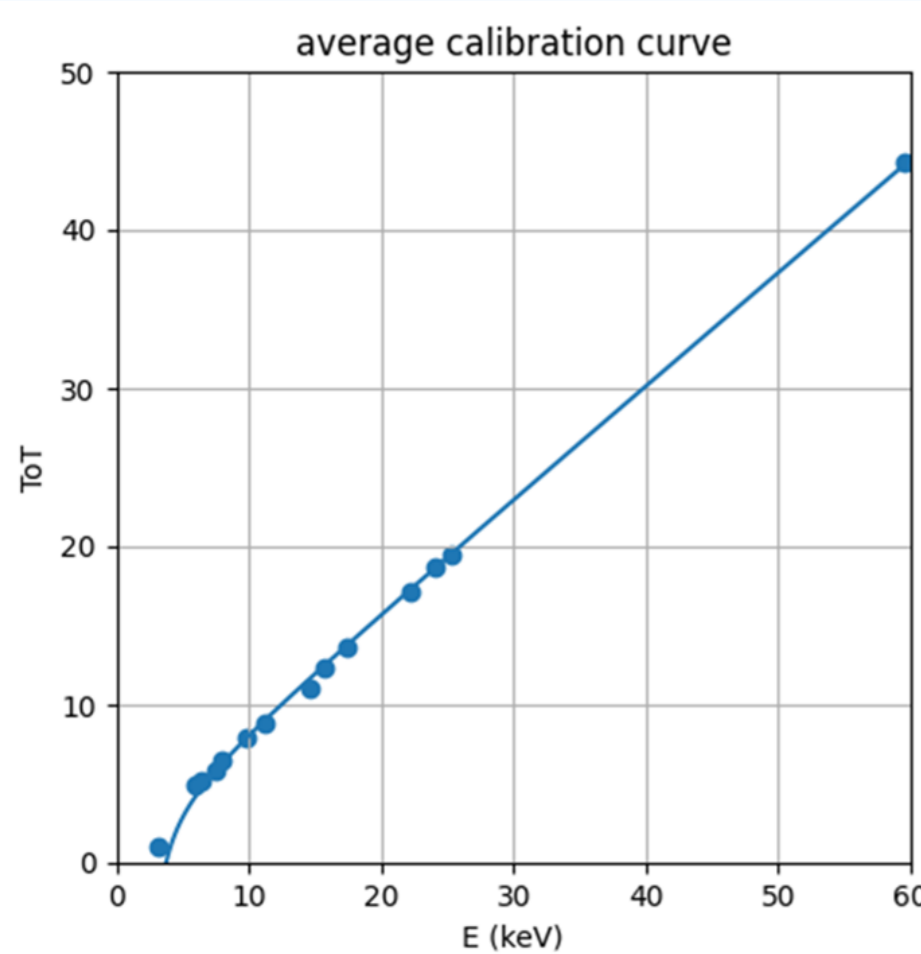
Для каждого из 65536 пикселей строится индивидуальная функция калибровки.

$$\text{ToT} = a \cdot E + b - c/(t - E) \rightarrow E = f(\text{ToT}) \text{ для каждого пикселя}$$

Материал	Энергия кэВ
⁵⁵ Fe (источник)	5.95
Fe	6.4
Ni	7.46
Cu	8.04
Ge	9.9
Se	11.22
Sr	14.17
Zr	15.77
Mo	17.4
Ag	22.2
In	24.1
Sn	25.3
²⁴¹ Am(источник)	59.5

Детектор облучался характеристическими рентгеновскими квантами с известной энергией, образовавшимися в ходе облучения мишеней, из различных материалов, при помощи рентгеновской трубки Mini-x. В каждом из 65536 пикселей набиралась достаточная статистика, для аппроксимации функцией Гаусса, при каждой энергии. Во всех пикселях определялось среднее значение ToT, соответствующее энергии фотона. Точки (среднее значение ToT; энергия фотона) наносились на график, и по ним определялись коэффициенты калибровочной кривой для конкретного пикселя.

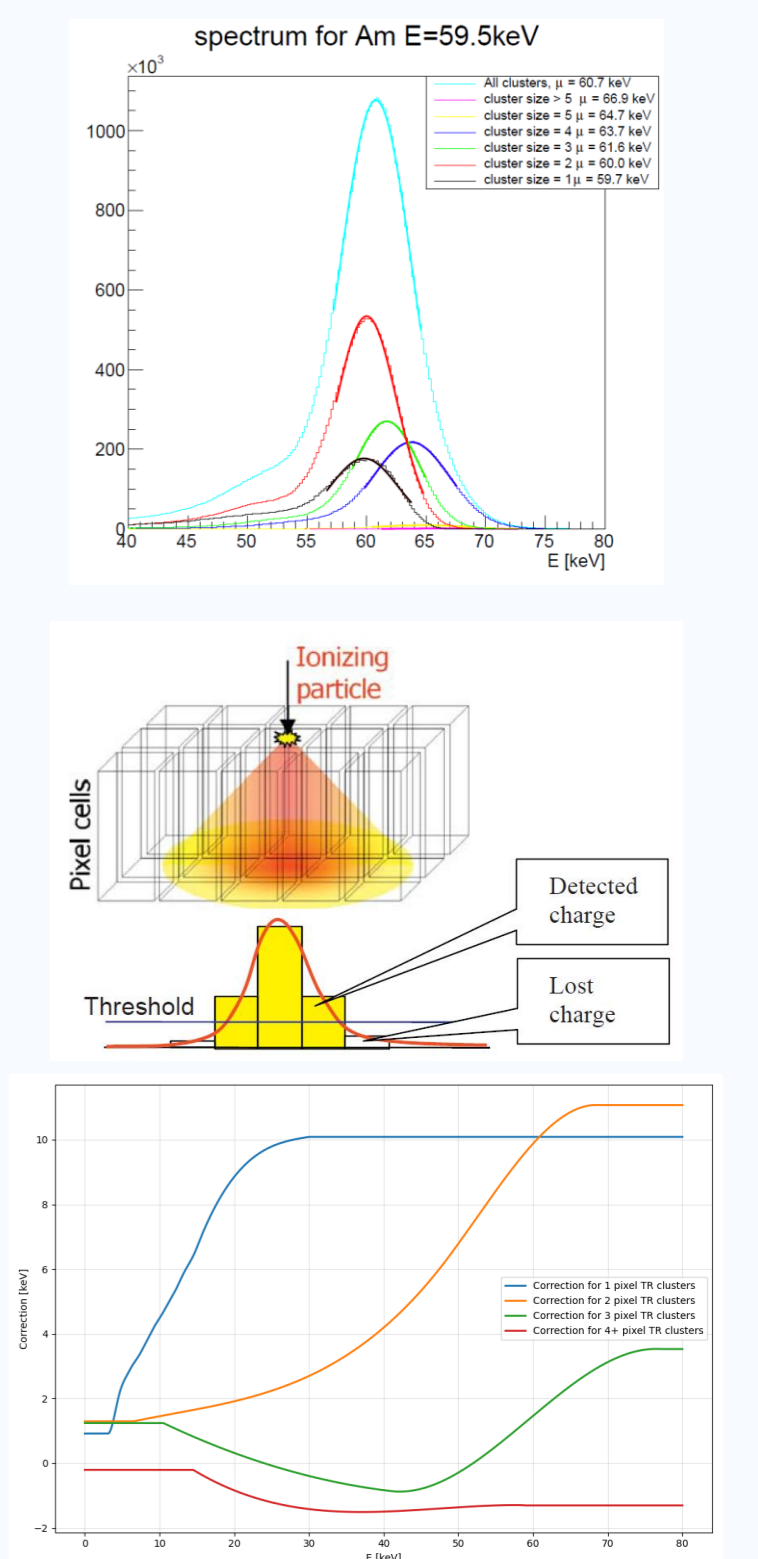
Все спектры по ToT набирались только для однопиксельных событий. В течении 500 нс не должно происходить срабатываний соседних пикселей.



В ходе работы был улучшен алгоритм выбора границ аппроксимации. Раньше границы определялись статически одинаковыми для всех пикселей при одной энергии. Это приводило к неверному определению среднего значения ToT, и в следствии, к примеру, в некоторых пикселях среднее ToT от Cu могло оказаться меньше чем от Ni. Теперь границы определяются динамически в зависимости от наполнения бинов. Также был учтен факт малой статистики для ²⁴¹Am. Среднее ToT в этом случае определялось как среднее по последним 8 не пустым бином.

3. Коррекция для многопиксельных кластеров

Получив калибровочные кривые и построив спектры от калибровочных фотонов с табличной энергией совпали только спектры от однопиксельных кластеров. Для многопиксельных кластеров картина иная. Когда фотон попадает на детектор, его энергия рассеивается между несколькими пикселями, но если высветившаяся в пикселе энергия будет меньше порога (~3.4 кэВ), он не сработает и эта часть энергии будет потеряна. Таким образом, в однопиксельных событиях обычно регистрируется не полная энергия фотона, а ее часть, однако при калибровке мы сопоставляем данные с однопиксельных событий с полной энергией фотона - из за этого в многопиксельных событиях, в которых регистрируется большая часть энергии фотона, чем в однопиксельных, энергия становится завышенной, и многопиксельные спектры смещаются вправо относительно табличных значений. Что бы учесть этот эффект вводится коррекция. Для этого строятся графики зависимости разницы табличных значений и полученных значений от полученных значений для кластеров разного размера, затем эти графики аппроксимируются, и полученные функции применяются к данным. Подобного рода коррекции применяются и к MC симуляции.



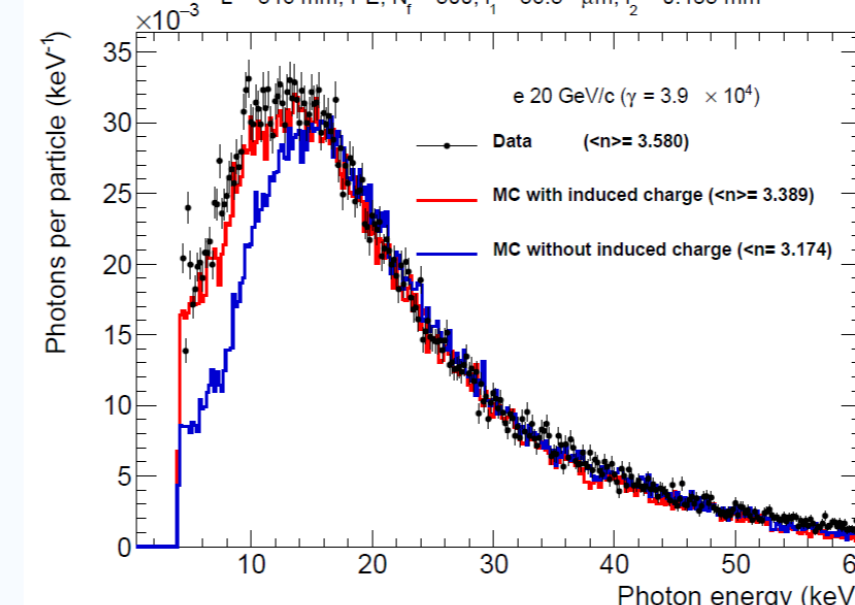
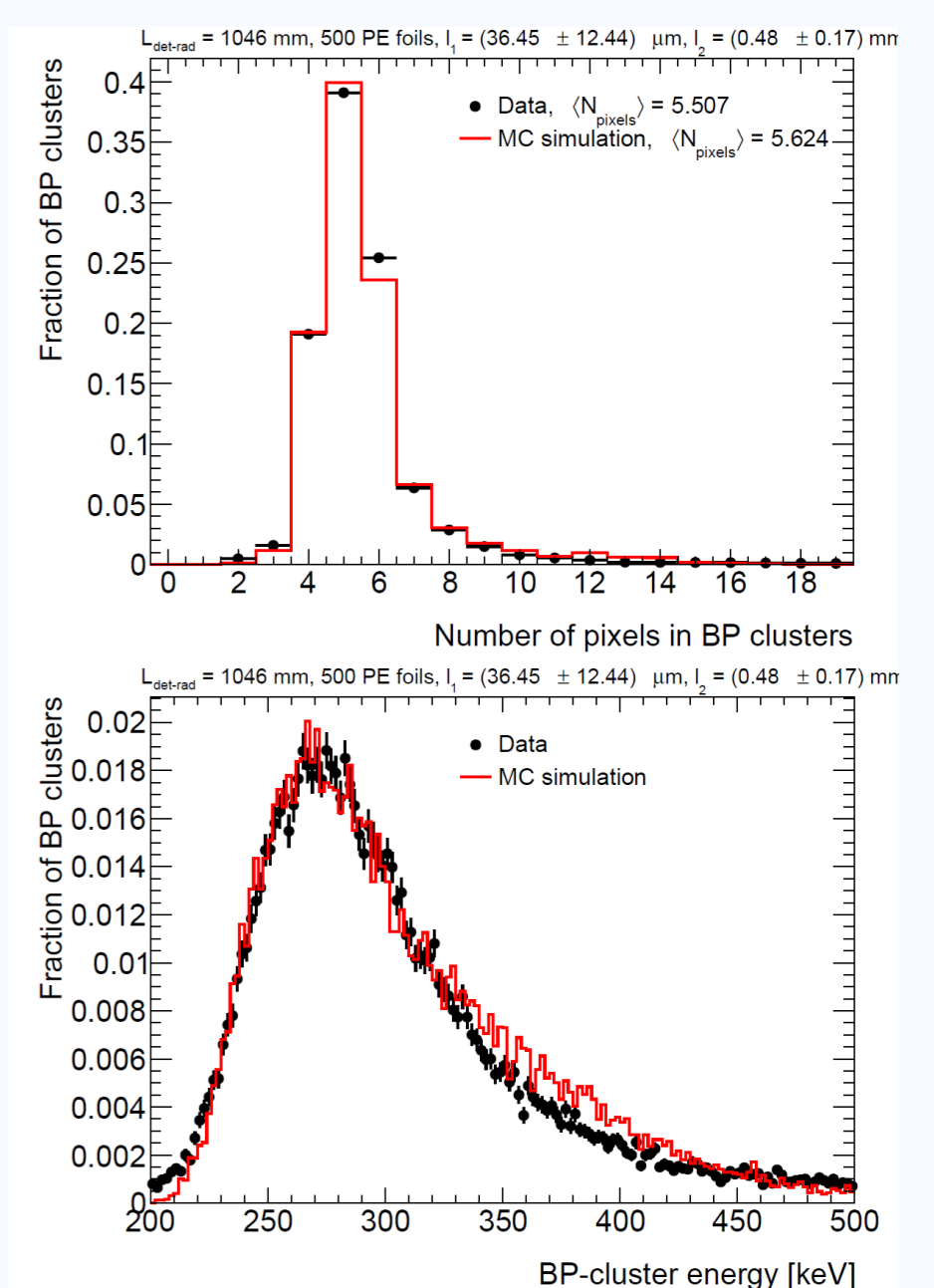
4. MC модель отклика детектора

Программа моделирования отклика детектора учитывает различные физические эффекты: энерговыделение частицы, поглощение и рассеивание фотонов, флуоресценцию Ga и As, диффузию и кулоновское расталкивание носителей заряда, захват носителей заряда, шумы и порог электроники, и перекрёстные наводки.

Пучковая частица (BP) формирует крупный кластер с энергией порядка сотен кэВ. В программе отклик заряженной частицы моделируется упрощённо: траектория в сенсоре делится на 50 сегментов, в каждом сегменте энерговыделение разыгрывается по распределению Ландау.

Параметры базовой модели:

- E_{trv} = 4.3 кэВ на сегмент;
 - σ_L = 0.725 кэВ;
 - дополнительно учитываются перекрёстные наводки между соседними пикселями и эффект захвата заряда.
- MPV и масштаб Ландау можно подобрать для совпадения пика спектра энергии BP-кластера, но этого недостаточно для попиксельных спектров. Поэтому вводится коррекция, применяемая к каждому пикселю в BP-кластере отдельно.



$$\sigma(r) = q \cdot K(r, z)$$

$$K(r, z) = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\frac{z_n^{(+)}}{r^2 + z_n^{(+)2} 3/2} - \frac{z_n^{(-)}}{r^2 + z_n^{(-)2} 3/2} \right]$$

Для ликвидации расхождения в энергетических спектрах переходных фотонов излученных из радиатора, находящегося на малом расстоянии от детектора (фотоны оказываются на малом расстоянии от частицы на плоскости детектора), был учтен эффект захвата заряда. Носители заряда, образованные частицей, захватываются в толще детектора в ходе дрейфа, и наводят поверхностный заряд на соседние пиксели в детектирующей плоскости. Наведенный заряд рассчитывается при помощи метода изображений.

Заключение

Усовершенствована процедура и проведена детальная попиксельная калибровка GaAs+Timepix3 детектора; для экспериментальных данных и MC определены энергетические коррекции для многопиксельных кластеров, учитывающие эффект charge sharing и потери сигнала на пороге. Модернизировано моделирование отклика детектора с учётом пространственного заряда, возникающего из-за захвата электронов и дырок в объёме GaAs-сенсора, что позволило получить хорошее согласие экспериментальных данных и результатов моделирования.

Список источников

- [1] J. Aloyz et al., Electron/hadron separation with the TRD based on GaAs pixel detectors, Nucl. Instrum. Meth. A 1090 (2026) 171597.
- [2] M. Albrow et al., Transition radiation detectors for hadron separation in the forward direction of LHC experiments, Nucl. Instrum. Meth. A 1055 (2023) 168535.
- [3] J. Aloyz et al., Studies of the spectral and angular distributions of transition radiation using a silicon pixel sensor on a Timepix3 chip, Nucl. Instrum. Meth. A 961 (2020) 163681.

Благодарность

Авторы работы выражают благодарность Проф. Романюку А.С. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект "Изучение физических явлений микро- и макромира для разработки технологий будущего" № FSWU-2026-0010