

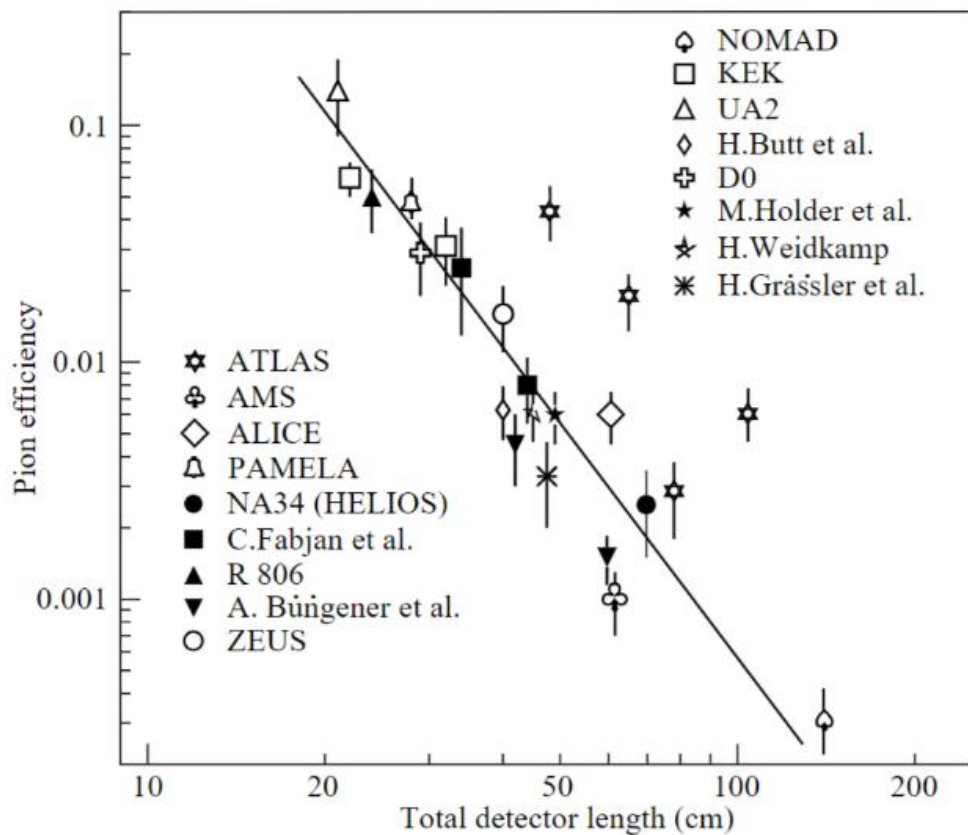
Текущее состояние моделирования отклика GaAs-детектора

Жутиков Иван, группа А23-121

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Тихомиров В.О.

Мотивация

Детекторы переходного излучения (TRD) широко применяются для идентификации частиц высоких энергий в экспериментах с космическими лучами и на ускорителях. Однако особенности переходного излучения — в частности, низкая интенсивность ($\sim \alpha$) и малый угол излучения ($\sim \text{мрад}$) — существенно усложняют моделирование и интерпретацию результатов, особенно при малых расстояниях между фотонами TR и частицей.



Цели и задачи

Цель работы — разработать усовершенствованную Монте-Карло (МК) модель, способную достаточно точно воспроизводить экспериментальные данные, полученные при регистрации переходного излучения. Для этого необходимо существенно переработать и дополнить существующую версию МК-программы.

Ключевые задачи:

- Провести валидацию модели на данных, полученных на установке CERN SPS NA с использованием электронов и пионов с импульсом 20 ГэВ/с.
- Смоделировать TR-радиатор с многослойной структурой (до 500 полиэтиленовых фольг толщиной 36 мкм, разделённых воздушными промежутками 0,485 мм).
- Учесть в модели геометрию и характеристики, детектора: GaAs-сенсор толщиной 500 мкм, сопряжённый с чипом Timerix3.

Моделирование основных процессов

ФОТОНЫ

1. Излучение TR:
 - Генерация фотонов переходного излучения (TR) в радиаторах со сложной структурой (энергетические спектры и угловые распределения).
 - Поглощение и рассеяние в радиаторе и других материалах на пути от радиатора до детектора.
2. Процессы в GaAs:
 - Поглощение и рассеяние
 - Рождение и динамика фотонов флуоресценции.

Частицы

- 1) Многократное рассеяние в радиаторе и учёт его вклада в угол излучения переходного фотона.
- 2) Выделение энергии частицами в детекторе моделируется с использованием распределений Ландау на малых шагах.
- 3) Образование кластеров от δ -электронов и тормозного излучения учитывается с использованием данных «dummy» радиатора.

Процессы в детекторе

1. Пробег электронов ионизации в GaAs.
2. Отталкивание зарядов во время дрейфа электронов.
3. Диффузия заряда при дрейфе электронов к анодам.
4. Разделение заряда между пикселями.
5. Перекрёстные помехи между пикселями (cross talk).
6. Шум пиксельной электроники и порог срабатывания сигнала.

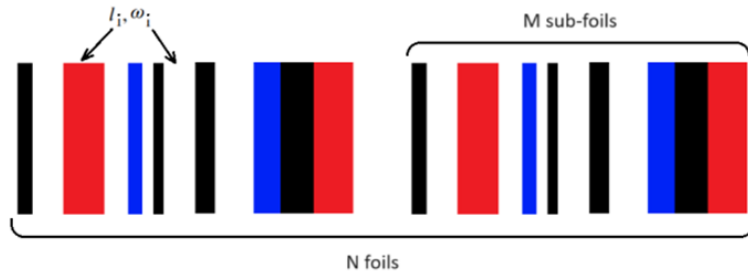
Захват электронов и дырок учитывается не как динамический процесс, а лишь в виде электростатической поправки.

Симуляция фотонов

ФОТОНЫ

1. Излучение TR:
 - Генерация фотонов переходного излучения (TR) в радиаторах со сложной структурой (энергетические спектры и угловые распределения).
 - Поглощение и рассеяние в радиаторе и других материалах на пути от радиатора до детектора.
2. Процессы в GaAs:
 - Поглощение и рассеяние
 - Рождение и динамика фотонов флуоресценции.

Энергетическое и угловое распределение TR фотонов для радиатора с произвольными параметрами.



500 полиэтиленовых фольг толщиной 36 мкм с воздушным зазором 0,485 мм, с 10% нерегулярностью как в толщине фольги, так и в размере зазора.



$$\frac{d^2 N_\gamma}{d\theta d\omega} = \frac{c}{4\pi} E H^* R^2$$

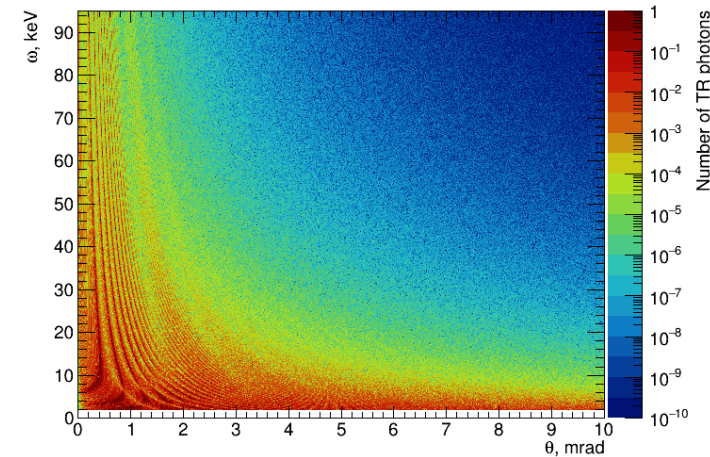
$$E = \left[\sum_{i=0}^{M-2} \frac{A_{i,i+1}}{R} e^{-2i \sum_{j=i+1}^{M-1} \frac{l_j}{Z_j}} + \frac{A_{M-1,0}}{R} \right] \frac{\sin\left(N \frac{\Delta\phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)} \quad Z_i = \frac{4c}{\omega \left(\gamma^{-2} + \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 + \theta^2 \right)}$$

$$A_{i,j}^2 = \frac{1}{c} \left(\frac{qe}{4\pi c} \right)^2 \theta^3 \omega (Z_i - Z_j)^2$$

$$\Delta\phi = 2 \sum_{i=0}^{M-1} \frac{l_i}{Z_i}$$

Где:

- Z_i зона формирования в i -м материале
- ω_i плазменная частота для i -го материала
- E и H создаваемые электрическое и магнитное поля
- R расстояние до точки наблюдения
- A_{ij} амплитуда, соответствующая переходу от среды i к среде j
- $\Delta\phi$ фазовое запаздывание, вызванное разностью скоростей частицы и электромагнитной волны в данном слое

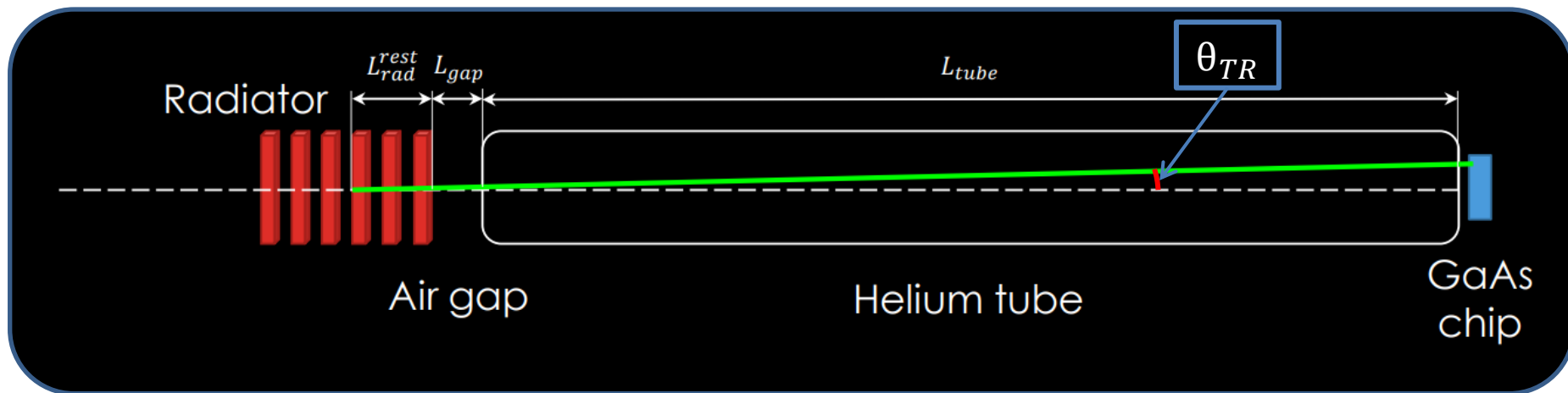


¹ Cherry M. L. Extending the Lorentz factor range and sensitivity of transition radiation with compound radiators // arXiv: [2201.07901](https://arxiv.org/abs/2201.07901)

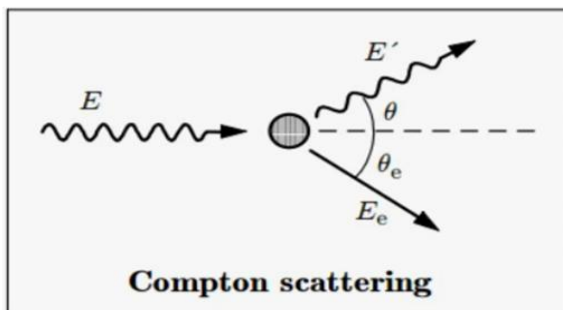
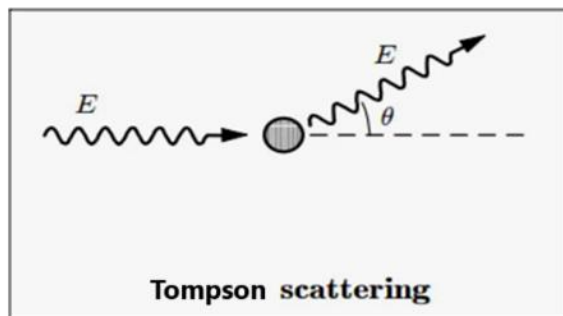
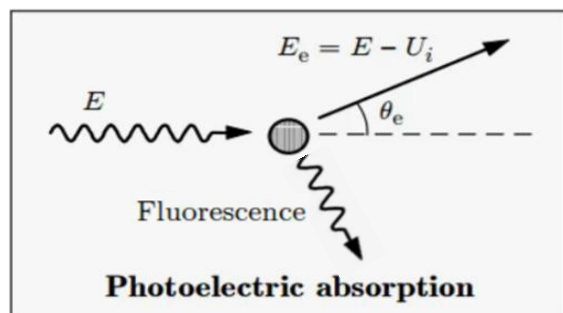
Излучение TR фотонов

- Число фотонов TR, порождённых в каждом отдельном событии, определяется из распределения Пуассона со средним значением $N\gamma$.
- Номер фольги, в которой был сгенерирован фотон, выбирается случайным образом вдоль радиатора.
- Считается, что фотон образуется в конце фольги радиатора.
- Таким образом, расстояние от точки генерации фотона до детектора может быть вычислено как:

$$L_{\gamma} = L_{rad}^{rest} + L_{gap} + L_{tube}$$



Процессы поглощения в материалах перед детектором и в самом детекторе

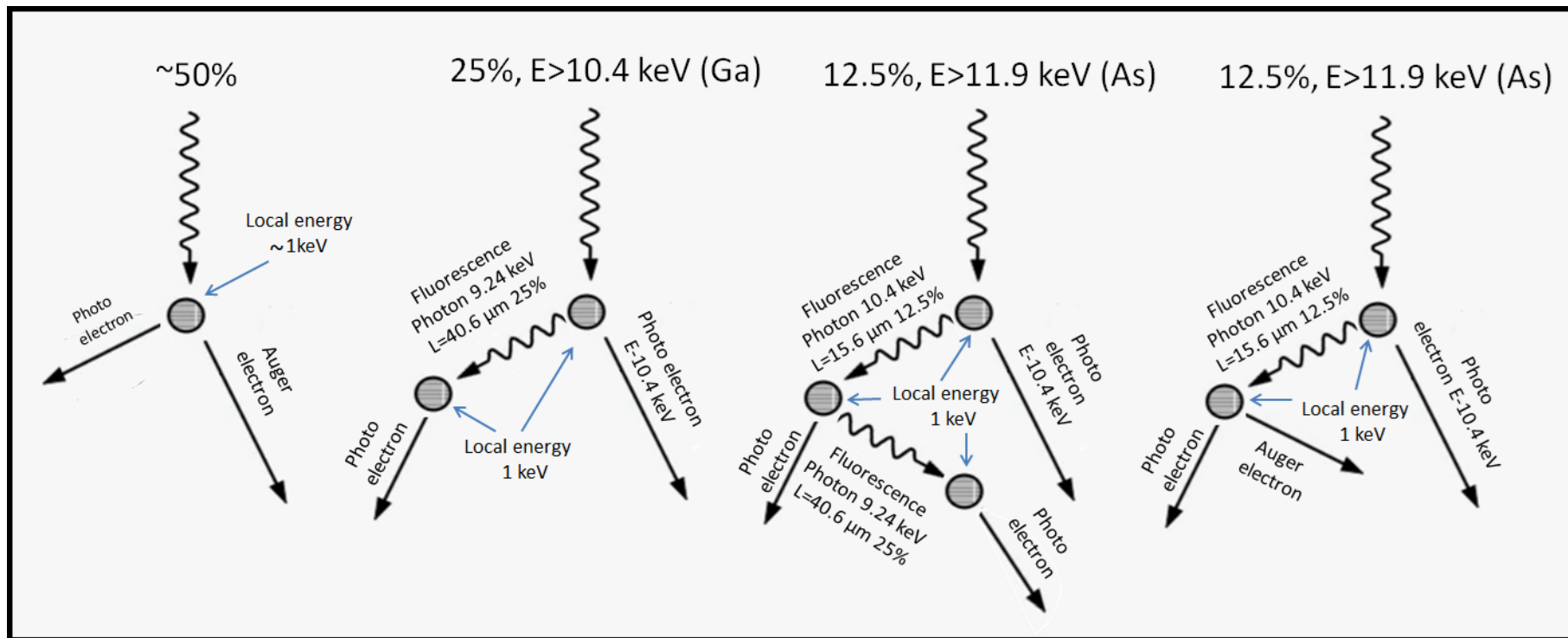


- При расчётах сечения учитывается полный вклад когерентного и некогерентного рассеяния, а также фотоэлектрического эффекта. Фотоны, взаимодействующие с материалами на пути к детектору, считаются потерянными.

- Внутри детектора рассеяние и фотоэффект рассматриваются отдельно, так как они приводят к различным типам сигналов, а сам детектор имеет значительный выход флуоресценции.

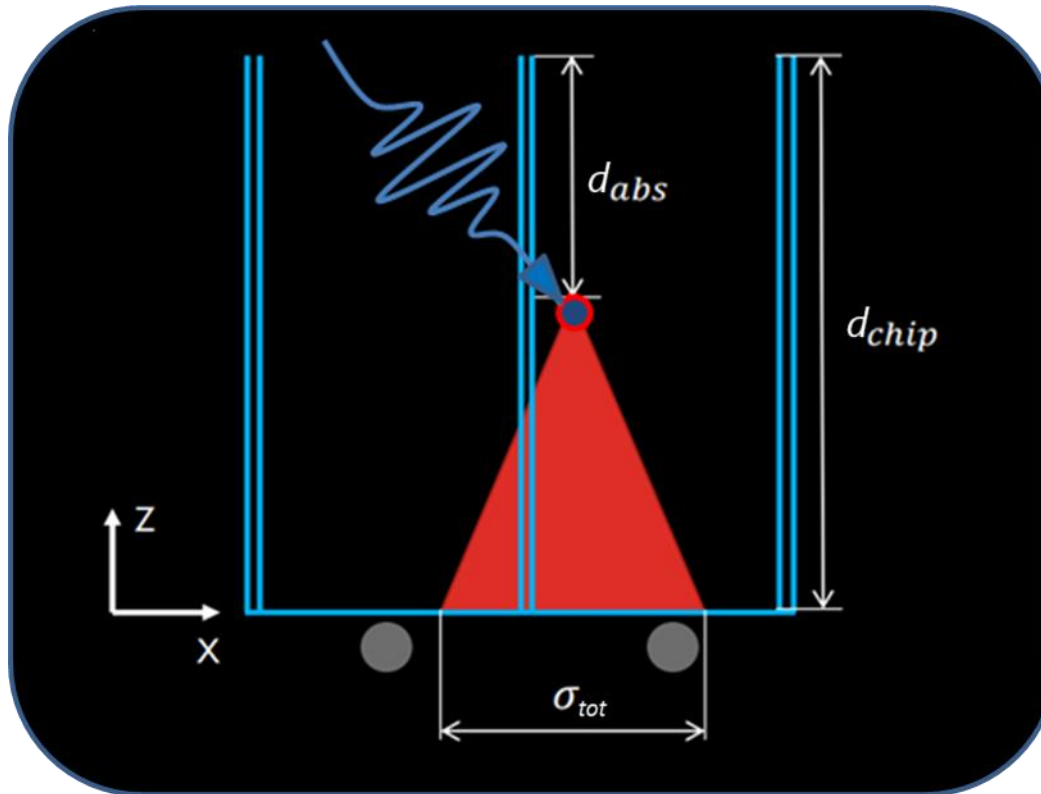
- Для моделирования процессов рассеяния в детекторе угловое и энергетическое распределения фотонов рассчитываются по формулам Томсона и Клейна–Нишины.

Флюоресценция в детекторе



- Материал датчика GaAs даёт высокий выход флуоресцентных фотонов: 50 % для Ga (9,24 кеВ) и 56 % для As (10,5 кеВ), с длинами пробега 40,6 мкм и 16,6 мкм соответственно. Эти фотоны могут распространять заряд и выходить за пределы основного кластера, формируя отдельные кластеры.
- Кроме того, в симуляции учитывается процесс двойной флуоресценции, при котором фотон от As возбуждает испускание фотона от Ga, что дополнительно увеличивает эффективную длину поглощения.

Сигнал от фотона



- После генерации координат фотона проводится моделирование глубины его поглощения в детекторе.
- Все процессы формирования заряда, возникающего вследствие взаимодействия фотоэлектронов, рассматриваются с предположением сферической симметрии. См. слайд 15.

Симуляция частицы

Частицы

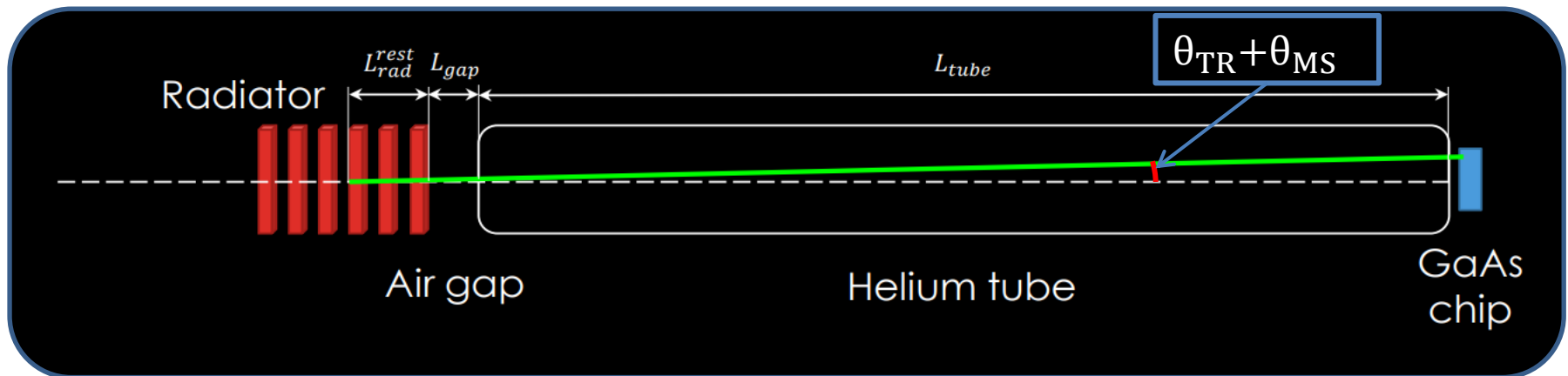
- 1) Многократное рассеяние в радиаторе и учёт его вклада в угол излучения переходного фотона.
- 2) Выделение энергии частицами в детекторе моделируется с использованием распределений Ландау на малых шагах.
- 3) Образование кластеров от δ -электронов и тормозного излучения учитывается с использованием данных «dummy» радиатора.

Многократное рассеяние в радиаторе

- Многократное рассеяние моделировалось на основе приближения, предложенного PDG.² Полярный угол рассеянной частицы выбирается из распределения Гаусса с сигмой, заданной выражением:

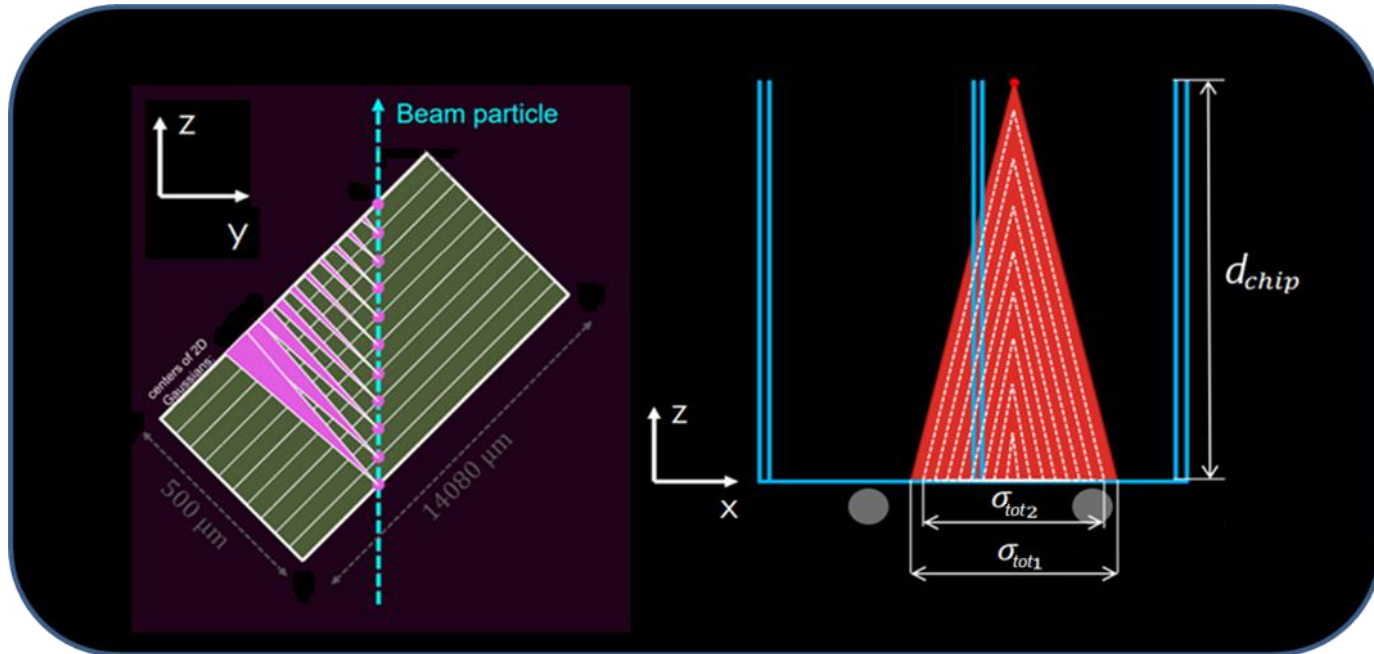
$$\sigma_{MS} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z \sqrt{\frac{l}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \left(\frac{l}{X_0} \right) \right)$$

- где p , βc и Z - импульс, скорость и зарядовое число налетающей частицы соответственно; l толщина материала, а X_0 радиационная длина материала.
- Полученный угол многократного рассеяния затем прибавляется к углу фотона переходного излучения.



² <http://pdg.lbl.gov/2005/reviews/passagerpp.pdf>

Сигнал от частицы



- Мы предполагаем, что потеря энергии частицей происходит равномерно вдоль её трека.
- Детектор толщиной 500 мкм разбивается на 50 сегментов. В каждом из этих 10 мкм-сегментов энергия моделируется с использованием распределения Ландау с наиболее вероятной энергией $E_{mpv} = 5,2$ кэВ и $\sigma_L = 0,40$ кэВ.
- Каждое облако заряда затем обрабатывается так же, как и облако от фотона.

“Dummy” радиатор

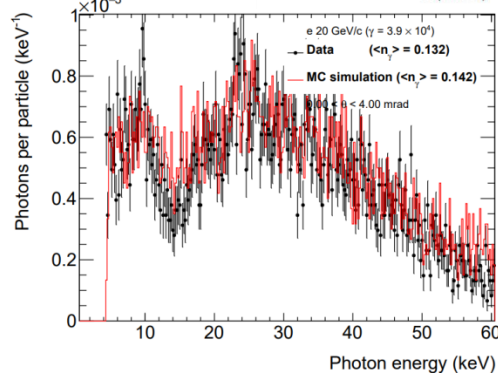
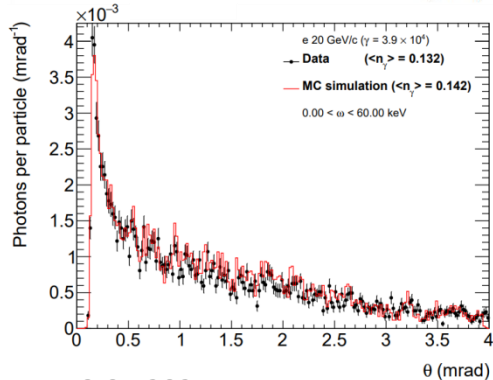
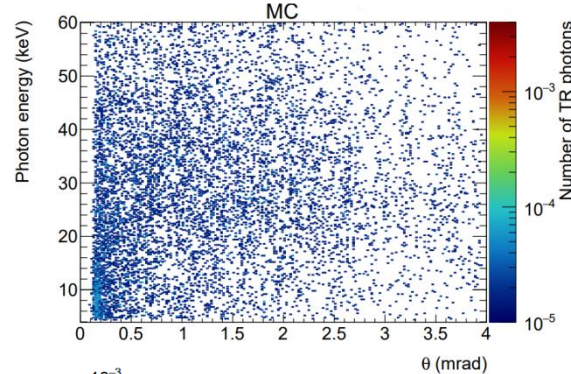
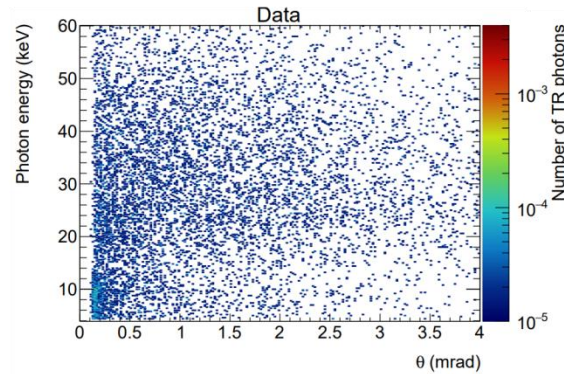
“Dummy”
cluster

8
16

Particle cluster

8.8
156 16
14 68

Описанный метод не позволяет моделировать вторичные процессы, приводящие к образованию фотонов и δ -электронов вдоль пучка, а также другие эффекты, которые могут быть ошибочно интерпретированы как фотоны



- Для учёта этих эффектов в симуляции были проведены специальные измерения с использованием «dummy» радиаторов (полиэтиленовые пластины толщиной 3–18 мм). Пластина толщиной 18 мм эквивалентна по массе материалу радиатора из 500 фольг.
- Фотоны с энергетическими и угловыми распределениями, соответствующими наблюдаемым кластерам от «dummy» радиаторов, затем добавлялись к потоку фотонов переходного излучения.

Симуляция процессов в детекторе

Процессы в детекторе

1. Пробег электронов ионизации в GaAs.
2. Отталкивание зарядов во время дрейфа электронов.
3. Диффузия заряда при дрейфе электронов к анодам.
4. Разделение заряда между пикселями.
5. Перекрёстные помехи между пикселями (cross talk).
6. Шум пиксельной электроники и порог срабатывания сигнала.

Пробег электрона, отталкивание и диффузия

В Монте-Карло применялась упрощённая модель диффузии, в которой отдельно учитывались вклады от самой диффузии, кулоновского отталкивания и начального размера облака электронов.

$$R_0 = 0.0075 \cdot E^{1.75}$$

$$t_{drift} = \frac{(500 - d) \cdot 10^{-4}}{V_{drift}}$$

$$R_r = \sqrt[3]{R_0^3 + 3 \frac{\mu q}{4\pi\epsilon} \frac{E}{\omega_{eh}} t_{drift}}$$

$$\sigma_r = 0.5 \cdot R_r$$

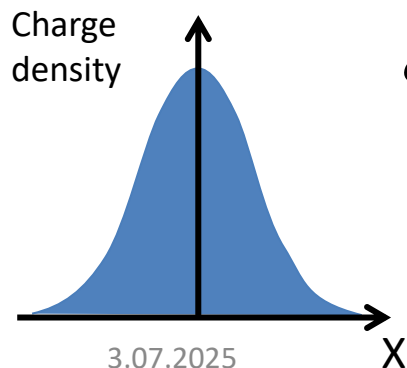
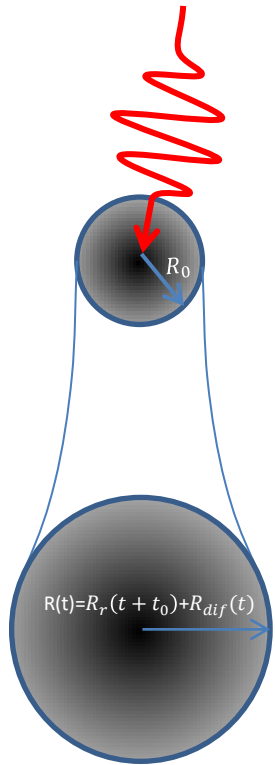
$$\sigma_{dif} = \sqrt{2Dt_{drift}}$$

Где:

- d (в μm) - глубина, на которой откладывается энергия.
- V_{drift} это скорость дрейфа (10^7 cm/s при рабочем напряжении смещения).
- $D = 180 \text{ cm}^2/\text{s}$ - коэффициент диффузии.
- E – поглощенная энергия
- ϵ это произведение диэлектрической проницаемости вакуума (ϵ_0) и относительной диэлектрической проницаемости материала ($\epsilon_{GaAs} = 13.1$)
- $\omega_{eh} = 4.26 \text{ eV}$ - средняя энергия образования пары электрон-дырка.

А затем полное распределение плотности заряда описывается гауссовской функцией плотности вероятности с

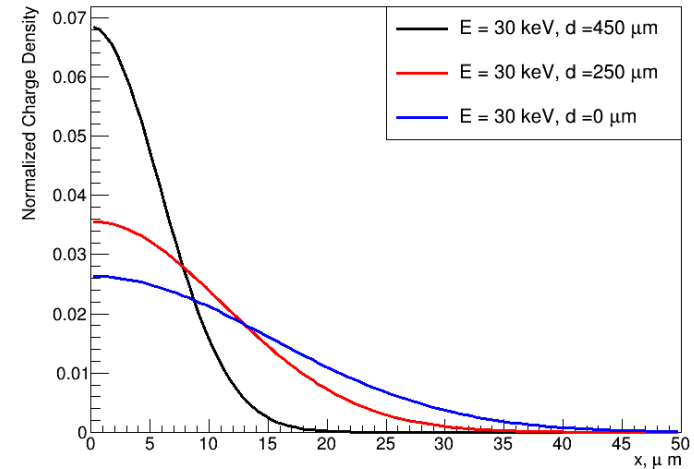
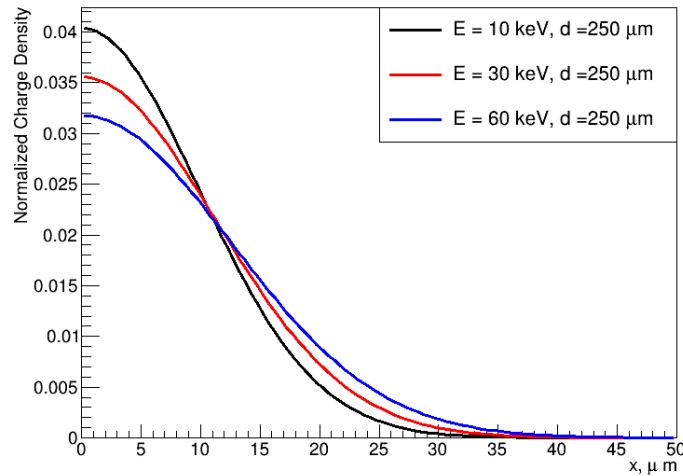
$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_{dif}^2}$$



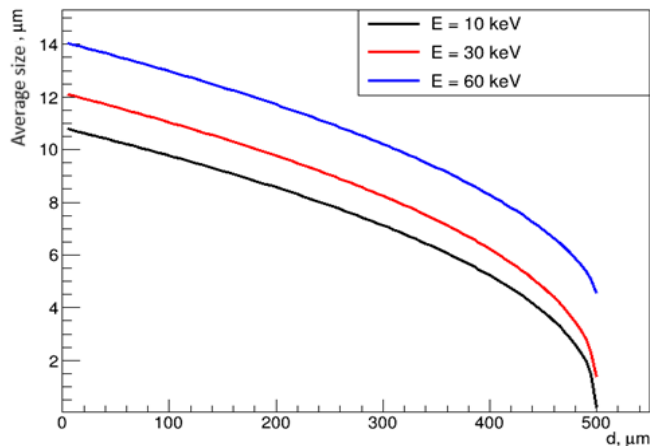
3.07.2025

Модель диффузии

Плотность заряда для различных энергий и глубин поглощения



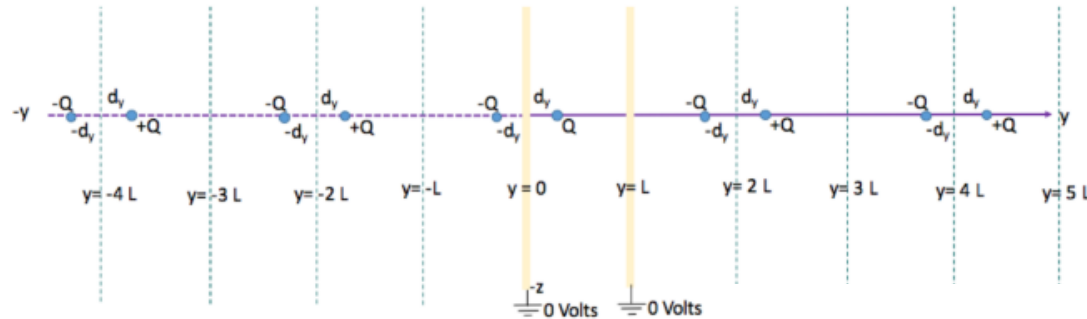
Средний размер облака заряда в зависимости от глубины поглощения



- Согласно этим формулам рассчитываются размер и распределение заряда в облаке к моменту когда оно достигает анода.

Электростатическая поправка вносимая захваченными дырками и электронами

Захваченный в детекторе заряд индуцирует заряд на электродах, аналогично тому, как это происходит при наличии заряда между двумя проводящими пластинами. Данный индуцированный заряд может исказить регистрируемый детектором сигнал, особенно вокруг частицы.

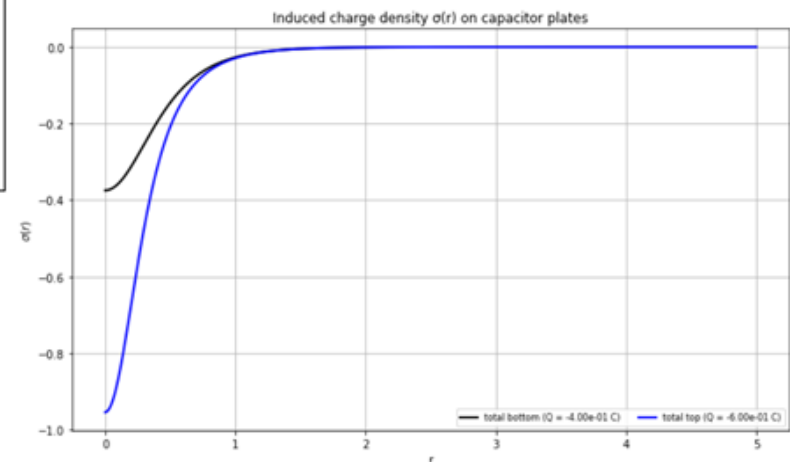


$$Q = 1 \text{ C}, L = 1 \text{ m}, z_0 = 0.6 \text{ m}$$

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

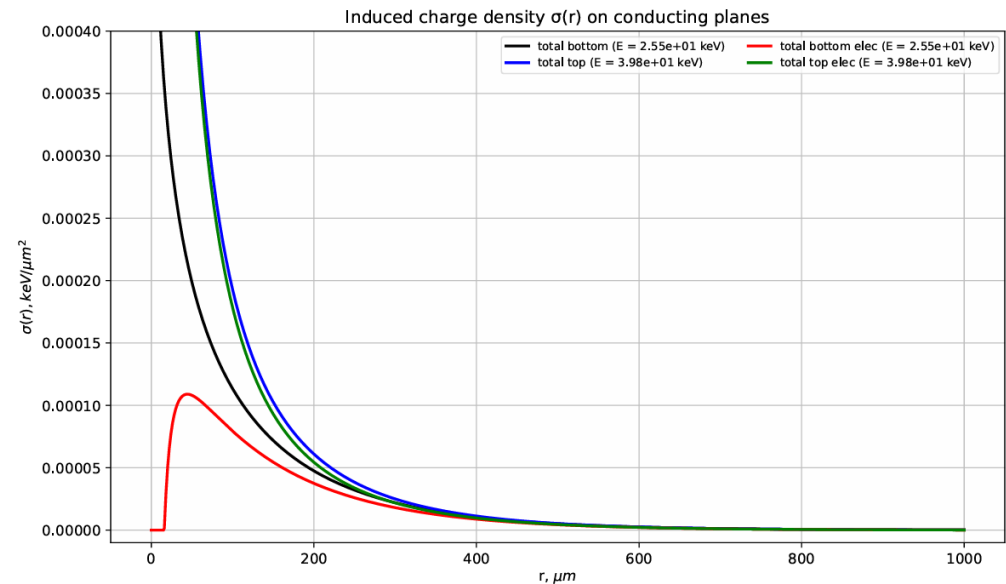
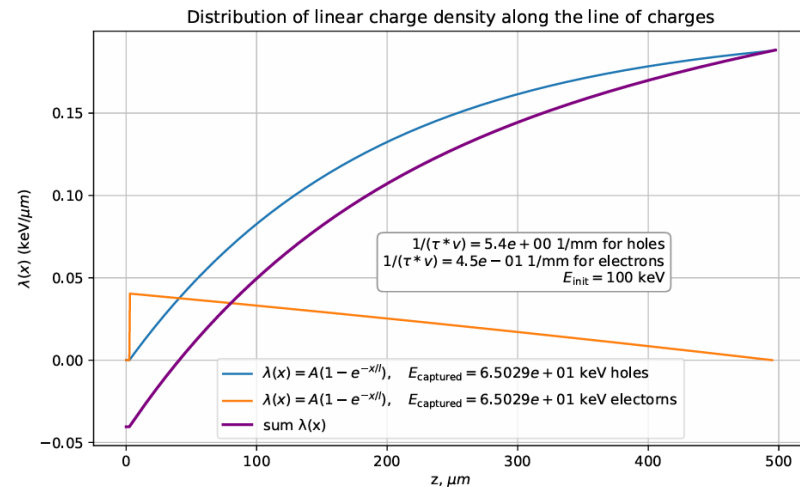
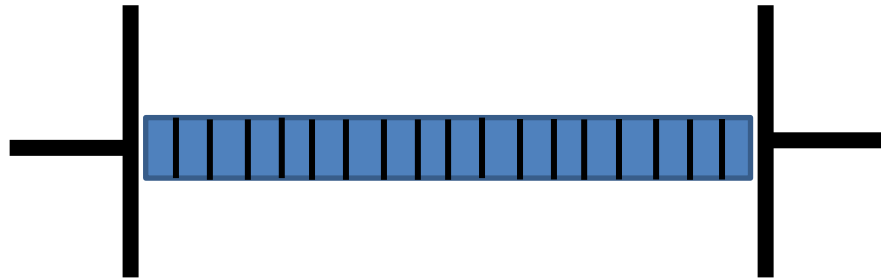
$$z_n^{(+)} = 2nL + z_0,$$

$$z_n^{(-)} = 2nL - z_0,$$

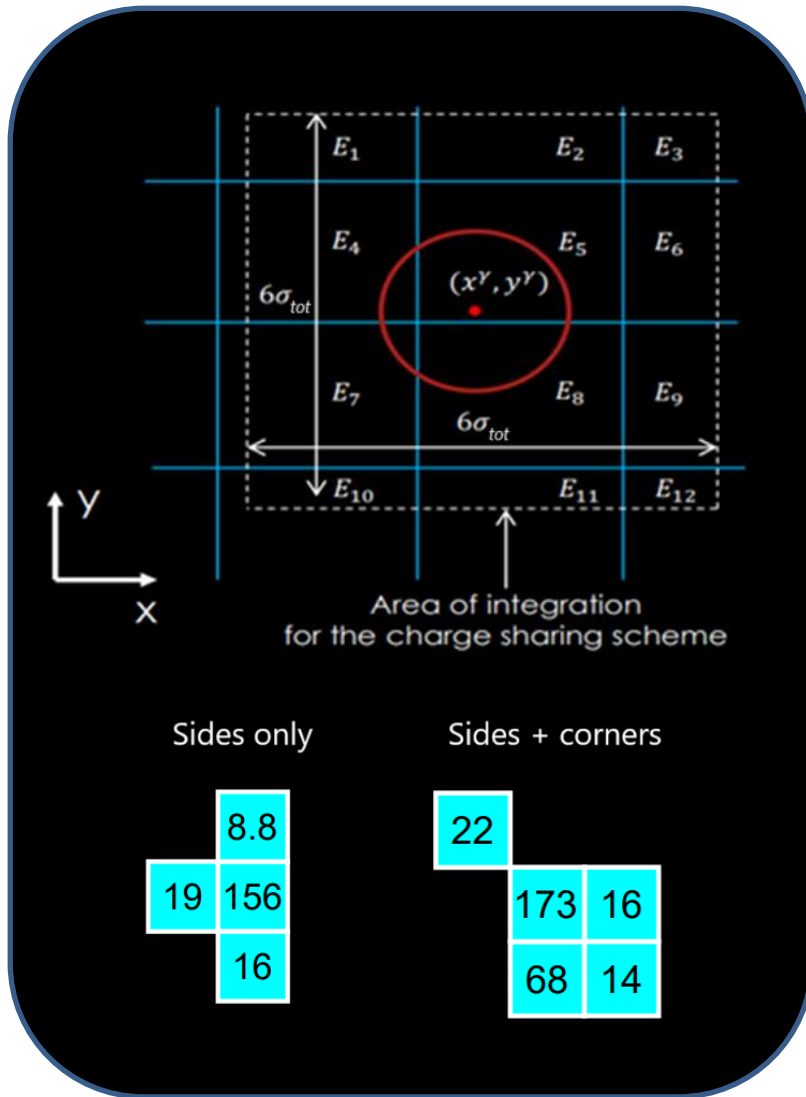


Поправка в случае трека от частицы

В случае, когда рассматривается трек частицы, он, как было указано ранее, разбивается на сегменты, для каждого из которых вычисляется количество поглощённых электронов и дырок. Затем, на основе полученного распределения заряда, аналогично точечному заряду, этот профиль делится на мелкие участки, от каждого из которых индуцированный заряд рассчитывается по ранее описанной схеме.



Распределение заряда, кластеризация и электронные помехи



- Суммарный заряд, собранный чипом, описывается двумерным гауссовским распределением с стандартным отклонением σ_{tot} . Этот заряд затем распределяется между соответствующими пикселями.
- Дополнительно, для частиц учитывалось перекрёстное влияние (cross talk) на уровне $\sim 2\%$ между соседними пикселями.
- После сбора заряда каждым пикселем, к нему добавляется электронный шум путём "размазывания" энергии, связанной с этим пикселем, с использованием гауссовского распределения с $\sigma_{noise} = 426$ эВ (что соответствует 100 первичным электронам).
- Каждый сработавший пиксель объединяется в кластер, если рядом с ним есть соседние сработавшие пиксели. Кластеризация может осуществляться только по сторонам или по сторонам и углам. В данной работе использовался второй вариант — кластеризация по сторонам и углам.
- Средний порог электроники, использовавшийся в тестовом пучке, соответствовал 3.4 кэВ.
- Для моделирования относительно большого тока утечки в детекторах на основе GaAs сигналы, прошедшие порог, дополнительно размазывались гауссовским распределением с $\sigma_{leak} = 1.2$ кэВ

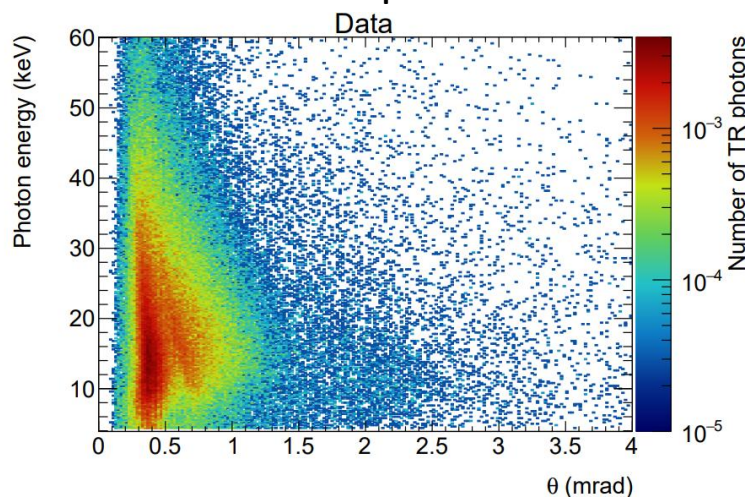
Результаты симуляций

Сравнение данных и МК

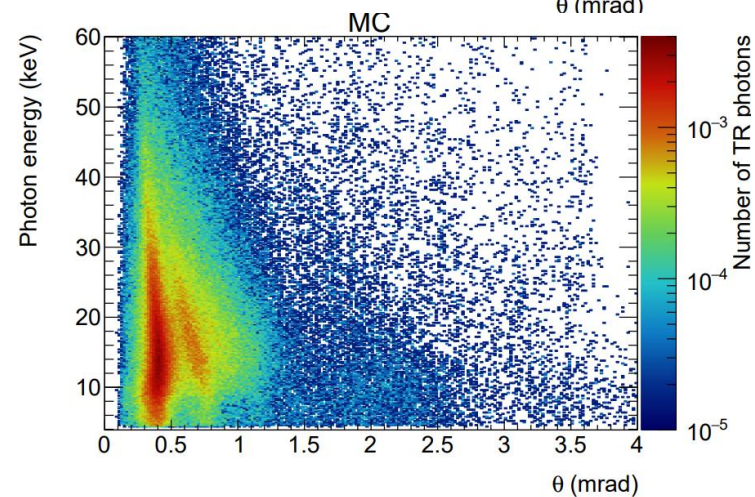
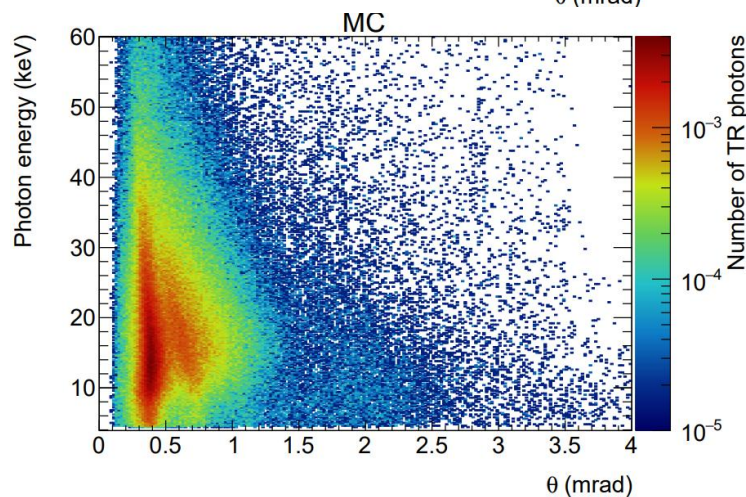
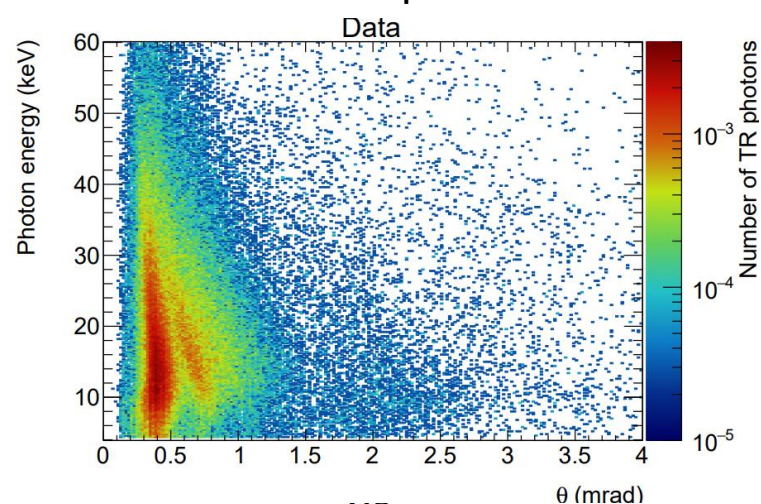
Двумерные распределения по энергии и углу

Радиатор сделан из 36 μm полиэтиленовых фольг с 0.485 mm воздушным зазором. Данные для расстояния в 1 м между детектором и радиатором

500 фольг



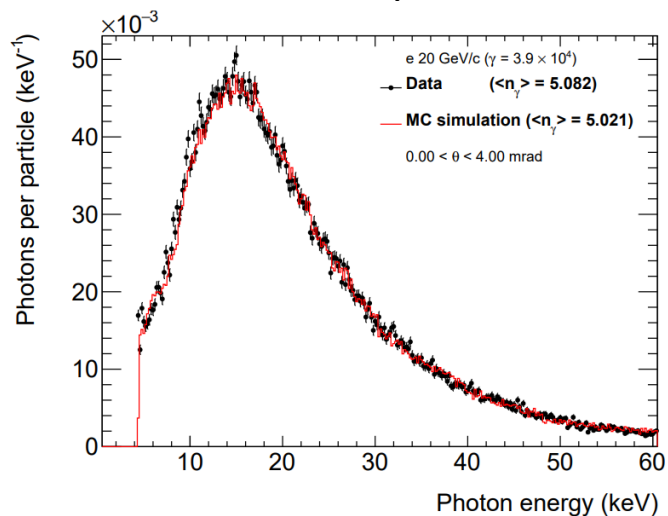
300 фольг



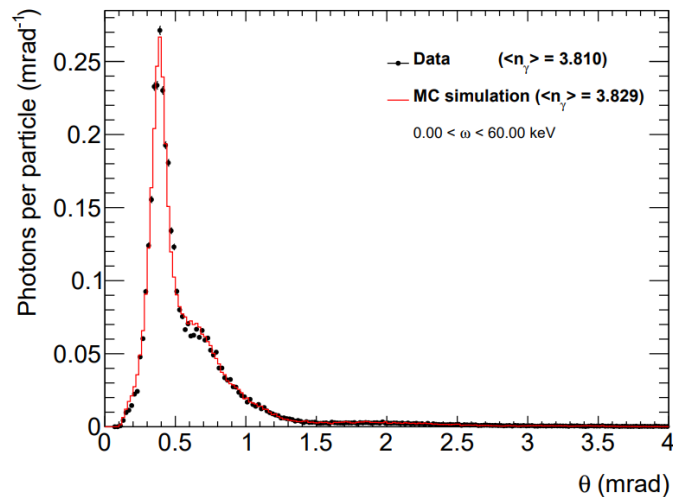
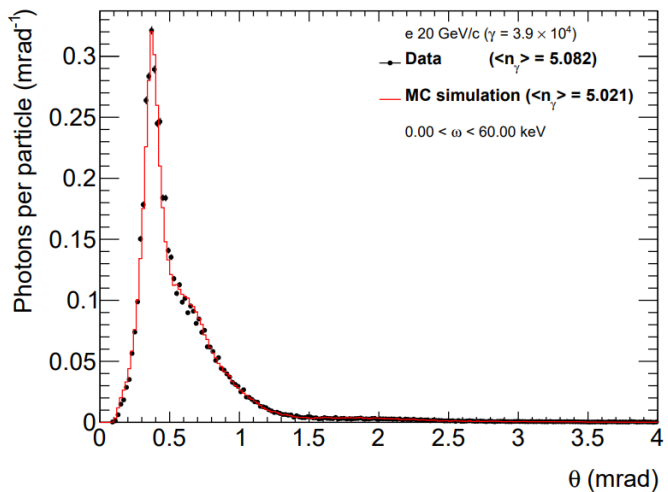
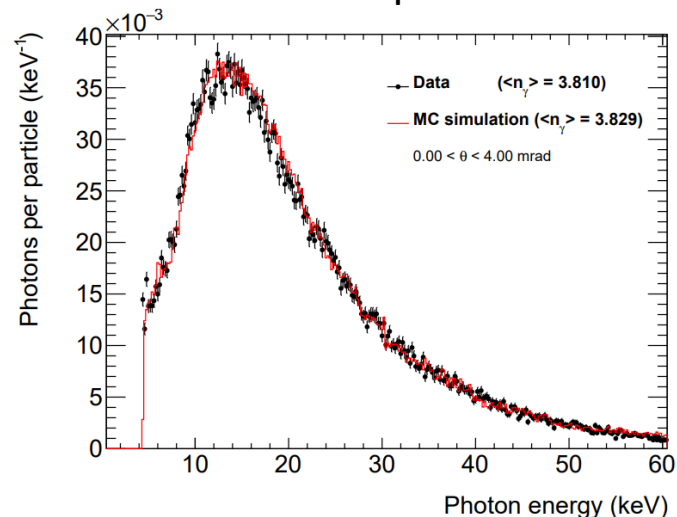
Сравнение данных и МК

Энергетическое и угловое распределение зарегистрированных фотонов переходного излучения (проекции на оси Y и X).

500 фольг



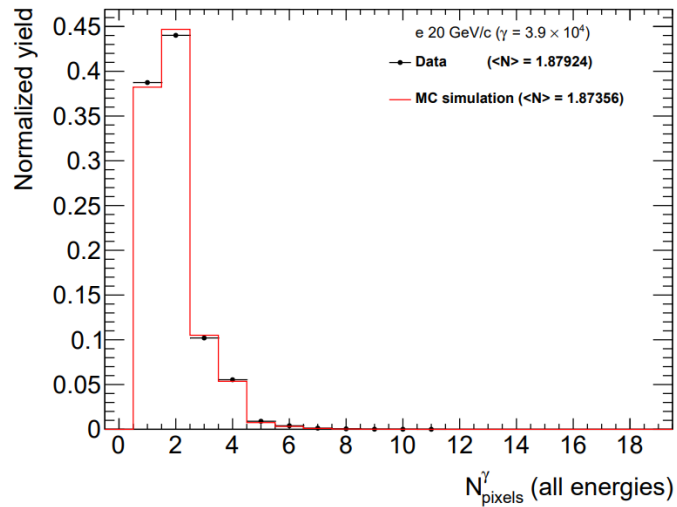
300 фольг



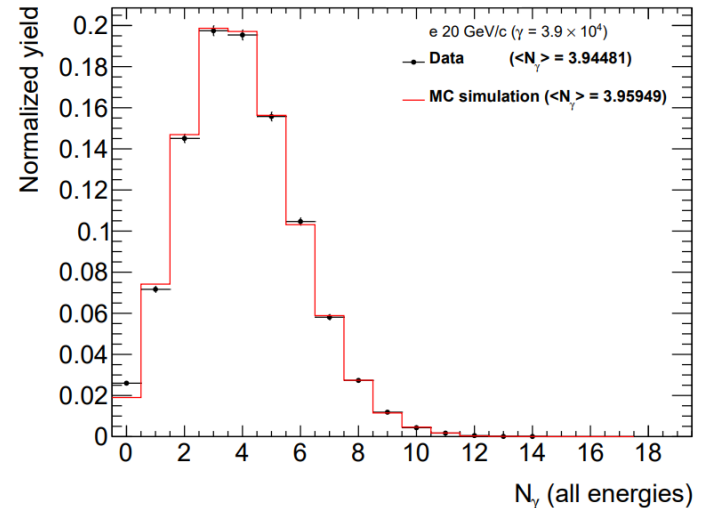
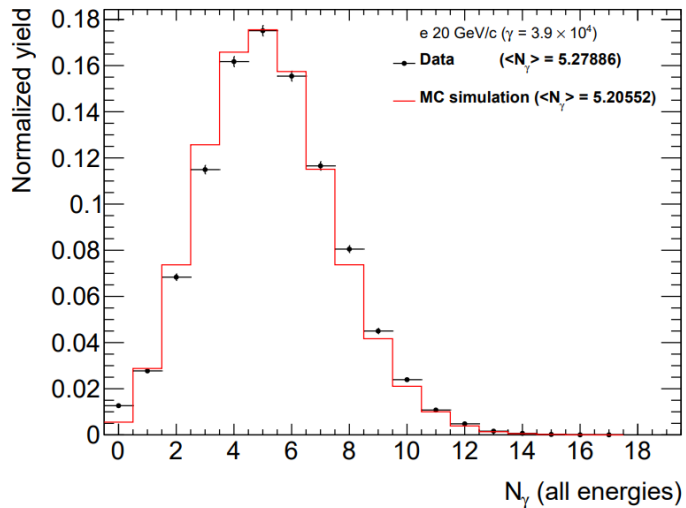
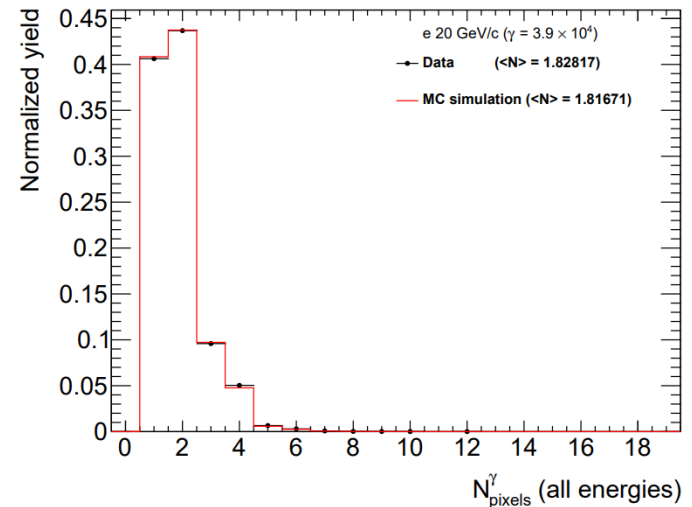
Сравнение данных и МК

Распределения по количеству пикселей в кластерах фотонов и по числу зарегистрированных фотонов переходного излучения.

500 фольг

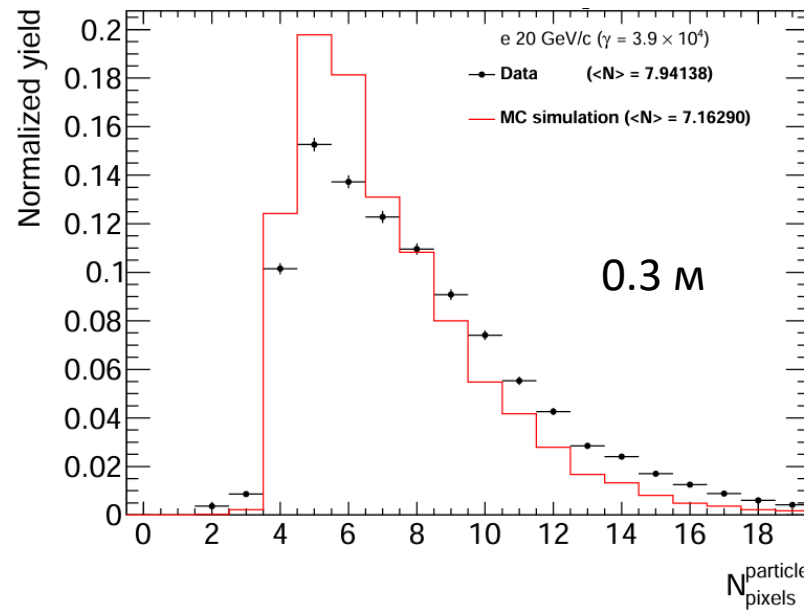
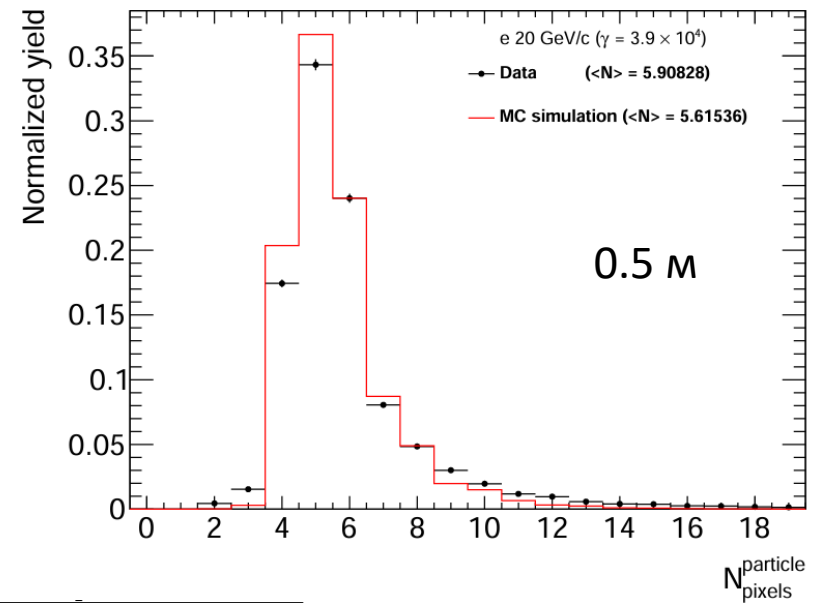
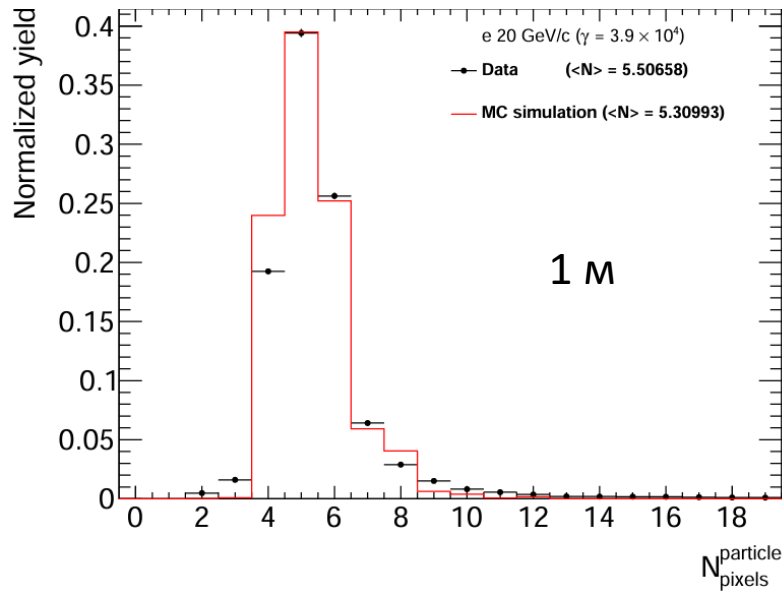


300 фольг



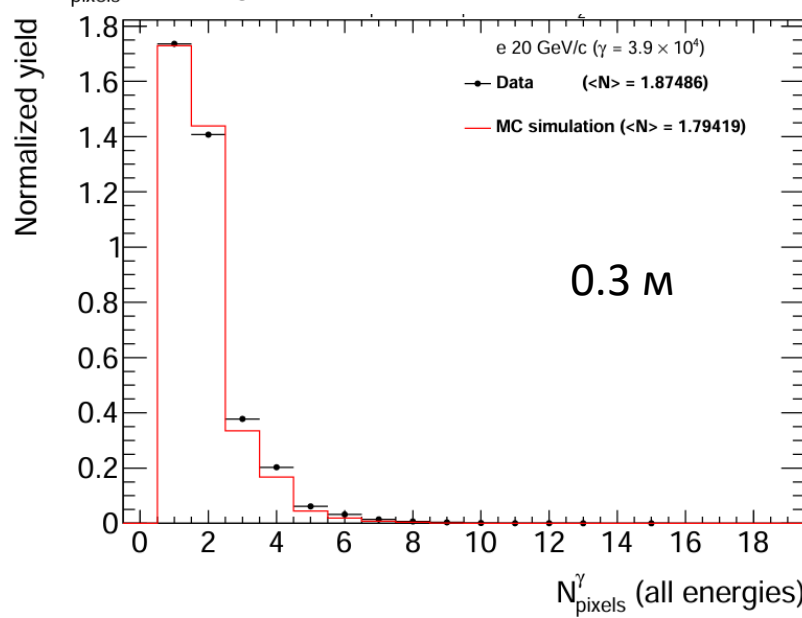
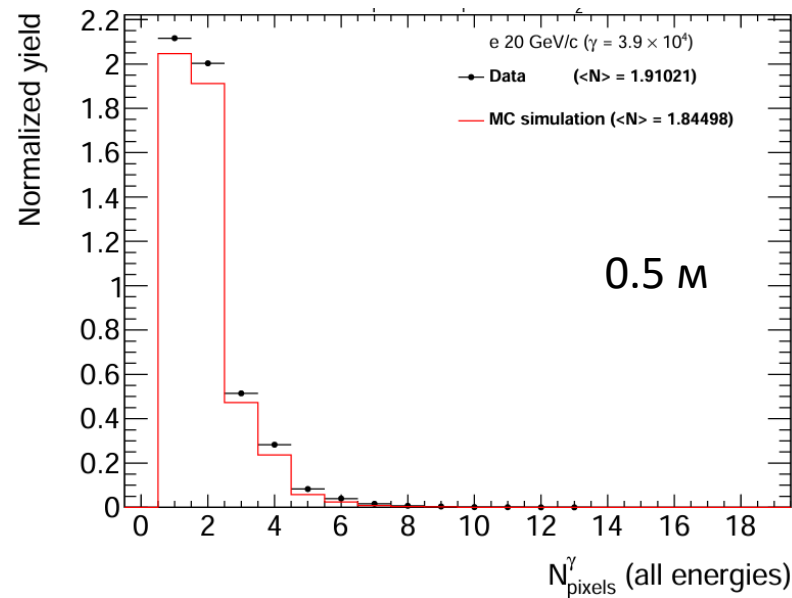
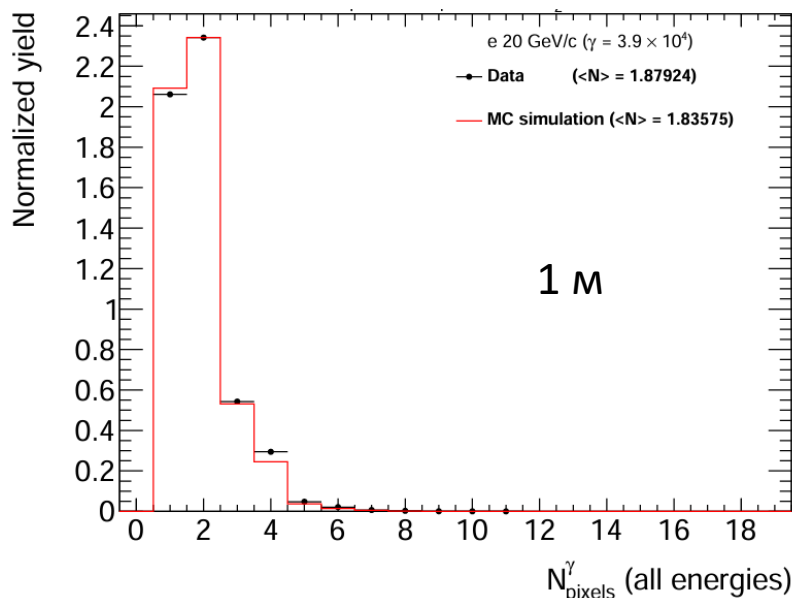
Сравнение данных и МК

Распределения по количеству пикселей в кластерах частиц для разных расстояний



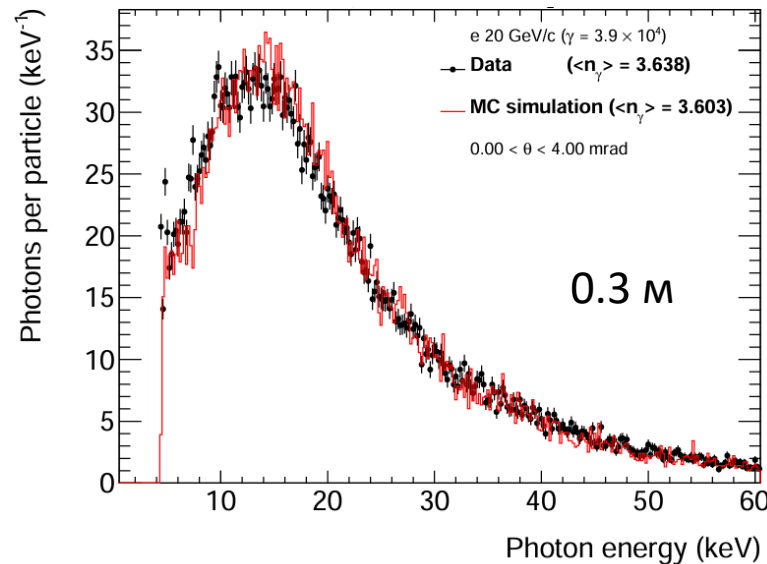
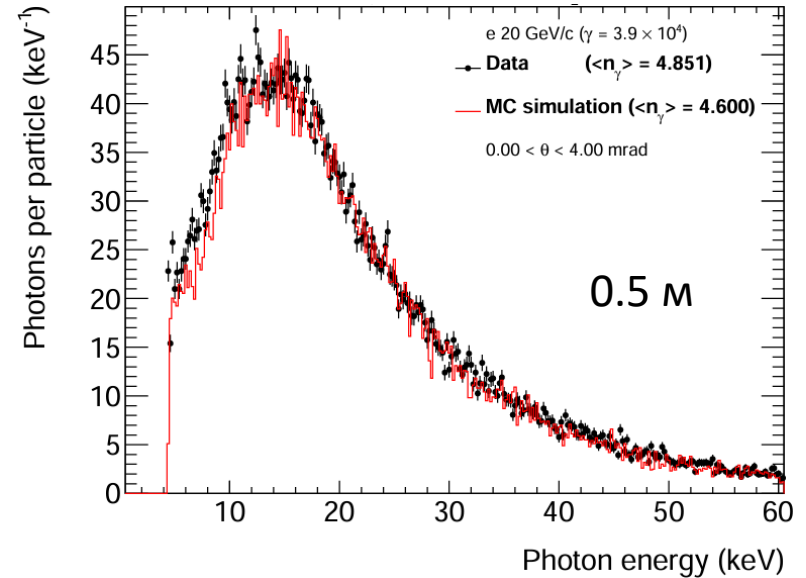
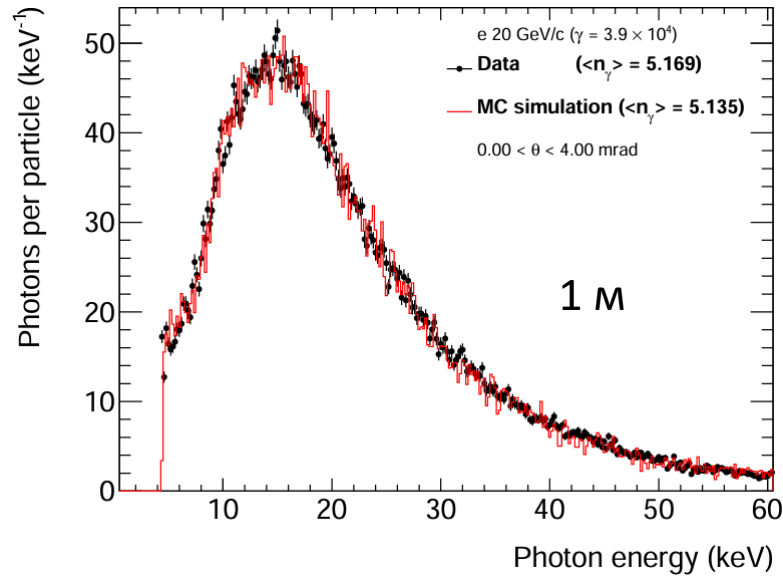
Сравнение данных и МК

Распределения по количеству пикселей в кластерах фотонов для разных расстояний



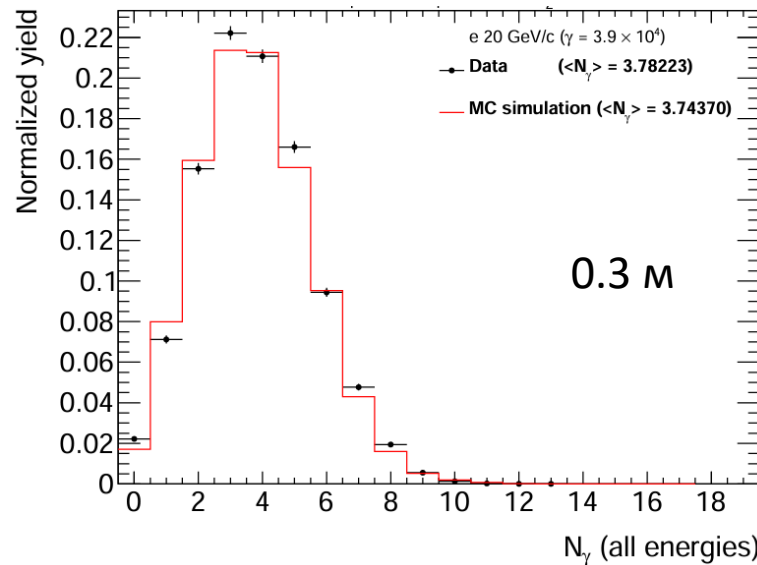
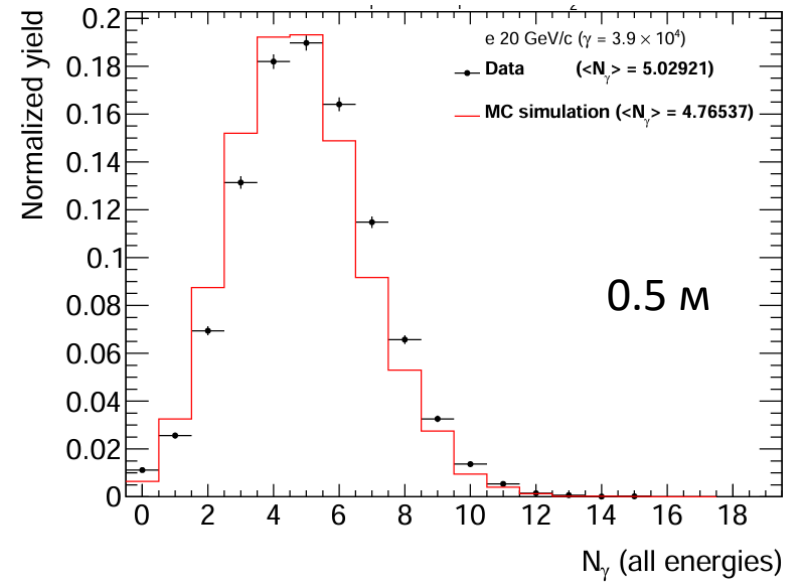
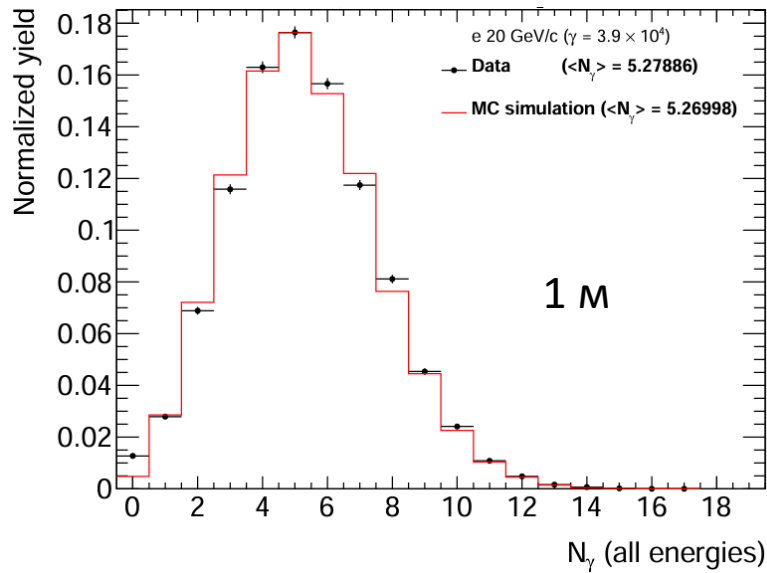
Сравнение данных и МК

Спектр TR фотонов для разных расстояний



Сравнение данных и МК

Распределение по числу фотонов для разных расстояний



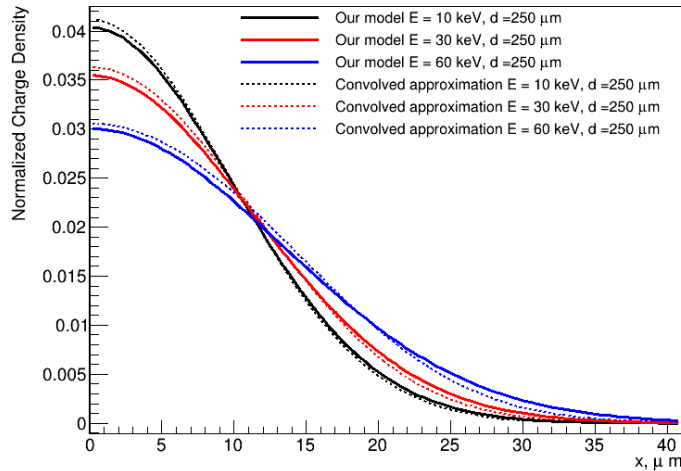
Заключение

- Была существенно доработана модель для Монте-Карло симуляции TRD на основе GaAs.
- В данной модели учтены различные детекторные эффекты: геометрические особенности, многократное рассеяние, выделение энергии частицами, поглощение и рассеяние фотонов, флуоресцентное излучение, разделение заряда, формирование и эволюция облака заряда, шумы детектора и др.
- Результаты симуляции демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными, хотя остаются отдельные аспекты, требующие доработки.

Спасибо за внимание!

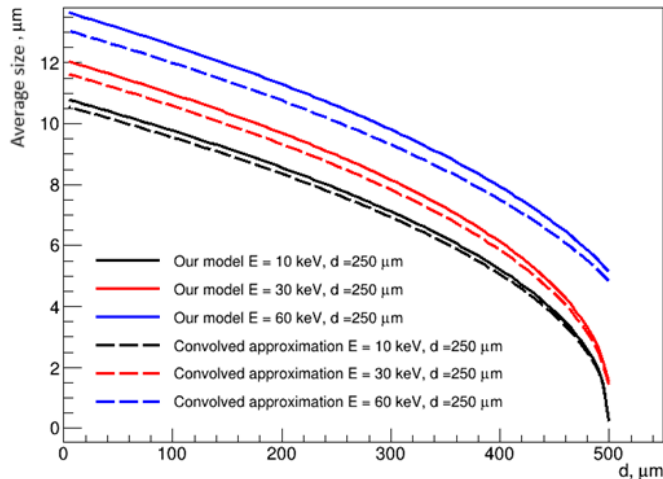
Back up

Сравнение со сверточной аппроксимацией



$$\lambda(x, t) = \frac{3N}{8\eta^3} (\eta^2 - x^2 - \sigma^2) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{b}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] + \frac{3N}{4\eta^3} \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[(2x - a)e^{-\frac{a^2}{2\sigma^2}} - (2x - b)e^{-\frac{b^2}{2\sigma^2}} \right]^3$$

где: $a = x - \eta$ и $b = x + \eta$



$$\eta(t) = \sqrt[3]{R_0^3 + \frac{3 \frac{\mu q}{4\pi\epsilon} \frac{E}{\omega_{eh}} (500 - d) \cdot 10^{-4}}{V_{drift}}}$$

- Сравнение этой модели со сверточным приближением показывает, что распределение заряда достаточно точно описывается для нашего энергетического диапазона

³ Boggs S. E. Modeling charge cloud dynamics in cross strip semiconductor detectors //