



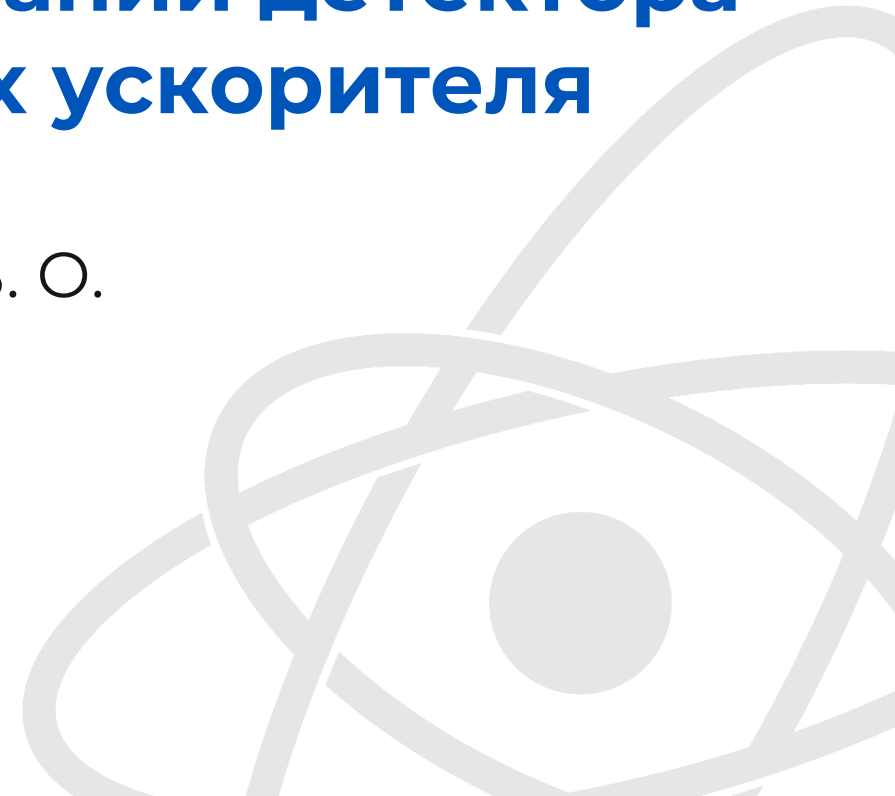
Выпускная квалификационная работа бакалавра на тему

Моделирование тестовых испытаний детектора переходного излучения в пучках ускорителя

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

Студент Ильиных С. Д.

28.06.2023



Цели и задачи

Цели:

- создание геометрической и физической модели эксперимента по тестированию детектора переходного излучения на основе арсенида галлия;
- получение распределений по углу, энергии и числу первичной частицы и квантов переходного излучения, зарегистрированных в детекторе.

Задачи:

- проведение обзора экспериментов по тестированию детектора переходного излучения, проведенных в 2018 и 2021 годах;
- описание основных физических процессов, происходящих в радиаторе и детекторе, включая переходное излучение, диффузию заряда в чувствительном объеме детектора и перекрестные помехи;
- анализ и последующая реализация модели экспериментальной установки с использованием пакета моделирования Geant4, включая описание материалов, геометрических объемов и подключение физического пакета;
- обработка данных, полученных в результате моделирования;
- получение распределений и их последующий анализ.

Схема экспериментальной установки

Test beam set up configuration

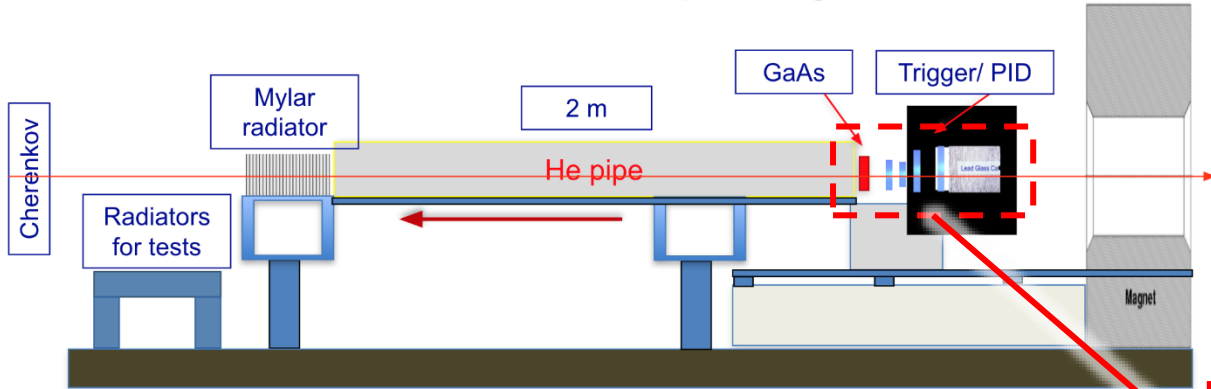
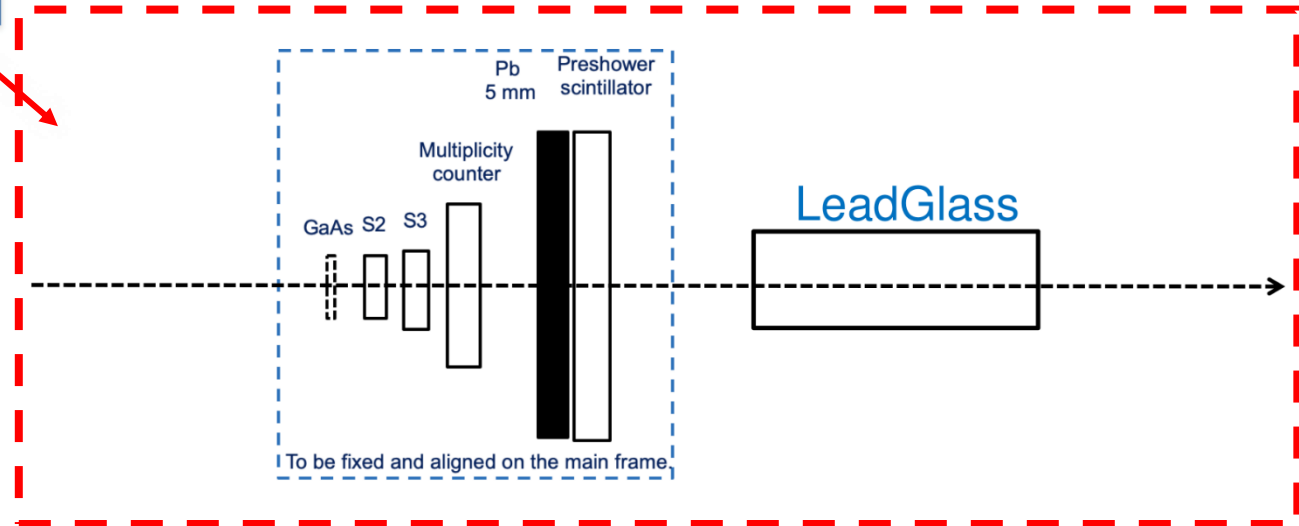


Схема экспериментальной установки



Детектор ПИ, триггерная схема и калориметр

Описание материалов и геометрических объемов

Материалы

Назначение материала	Название материала	Плотность, г/см ³	Молекулярный состав
Окружающая среда	Воздух	0,00129	N (70%) + O (30%)
Радиатор	Майлар	1,39	C ₅ H ₄ O ₂
Радиатор	Полиэтилен	0,92	C ₂ H ₄
Торцевые стенки трубы	Полипропилен	0,91	CH ₂
Гелий	Гелий	0,178	He
Никелевое напыление детектора ПИ	Никель	8,902	Ni
Детектор ПИ	Арсенид галлия	5,32	Ga (48,22%) + As (51,798%)
Свинцовая пластина перед ДПРЛ	Свинец	11,35	Pb
Сцинтиллятор	Полистирол	1,032	C ₈ H ₈
Калориметр	Свинцовое стекло	5,51	SiO ₂ (23,9%) + PbO (74,8%) + K ₂ O (0,65%) + Na ₂ O (0,65%)

Геометрические объемы

Назначение объема	Форма	Параметры
Труба, заполненная гелием	Цилиндр	Длина: 2014 мм Радиус: 100 мм
Никелевое напыление детектора ПИ	Параллелепипед	Толщина: 1 мкм Длина: 14,08 мм Ширина: 14,08 мм
Детектор ПИ	Параллелепипед	Толщина: 0,5 мм Длина: 14,08 мм Ширина: 14,08 мм
Свинцовая пластина перед ДПРЛ	Параллелепипед	Толщина: 6 мм Длина: 135 мм Ширина: <input type="text" value="Цели и задачи"/>
Сцинтиллятор	Параллелепипед	Толщина: 10 мм Длина: 135 мм Ширина: 85 мм
Калориметр	Усеченная пирамида	Высота: 266 мм Меньшее основание: 100 мм × 95 мм Большее основание: 110 мм × 100 мм

Подключение физического пакета

1. Электромагнитные процессы:

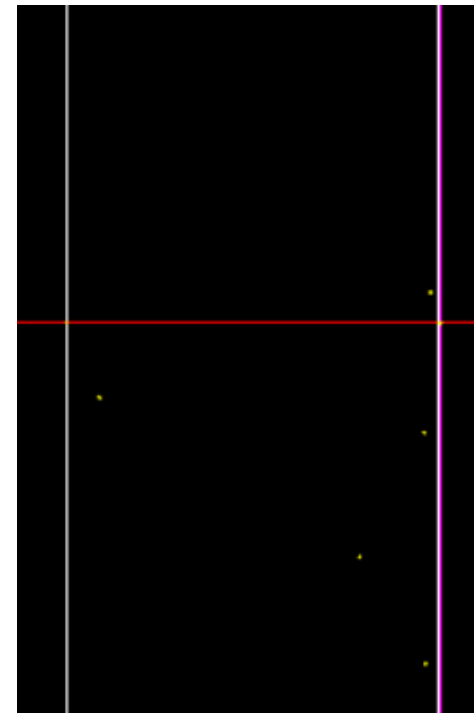
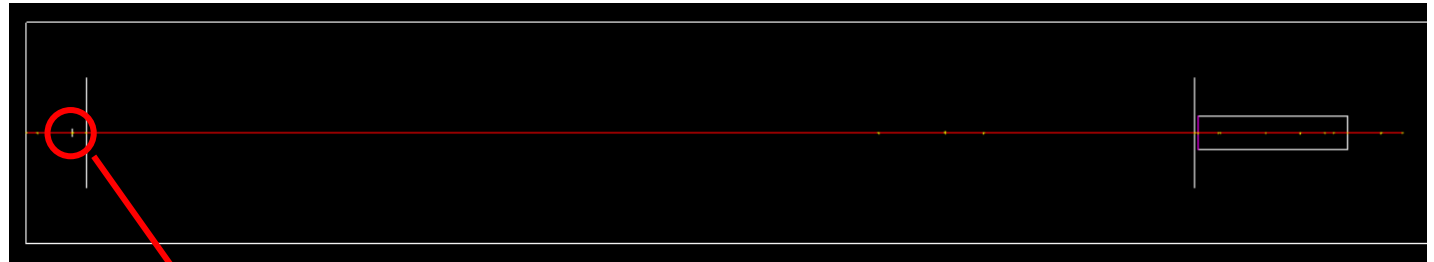
- образование e^-/e^+ -пар;
- фотоэффект;
- Комptonовское рассеяние;
- Рэлеевское рассеяние;
- ионизация вещества;
- тормозное излучение;
- многократное рассеяние;
- Кулоновское рассеяние;
- аннигиляция.

2. Транспортировка частиц через среду.

3. Распады (слабые и электромагнитные).

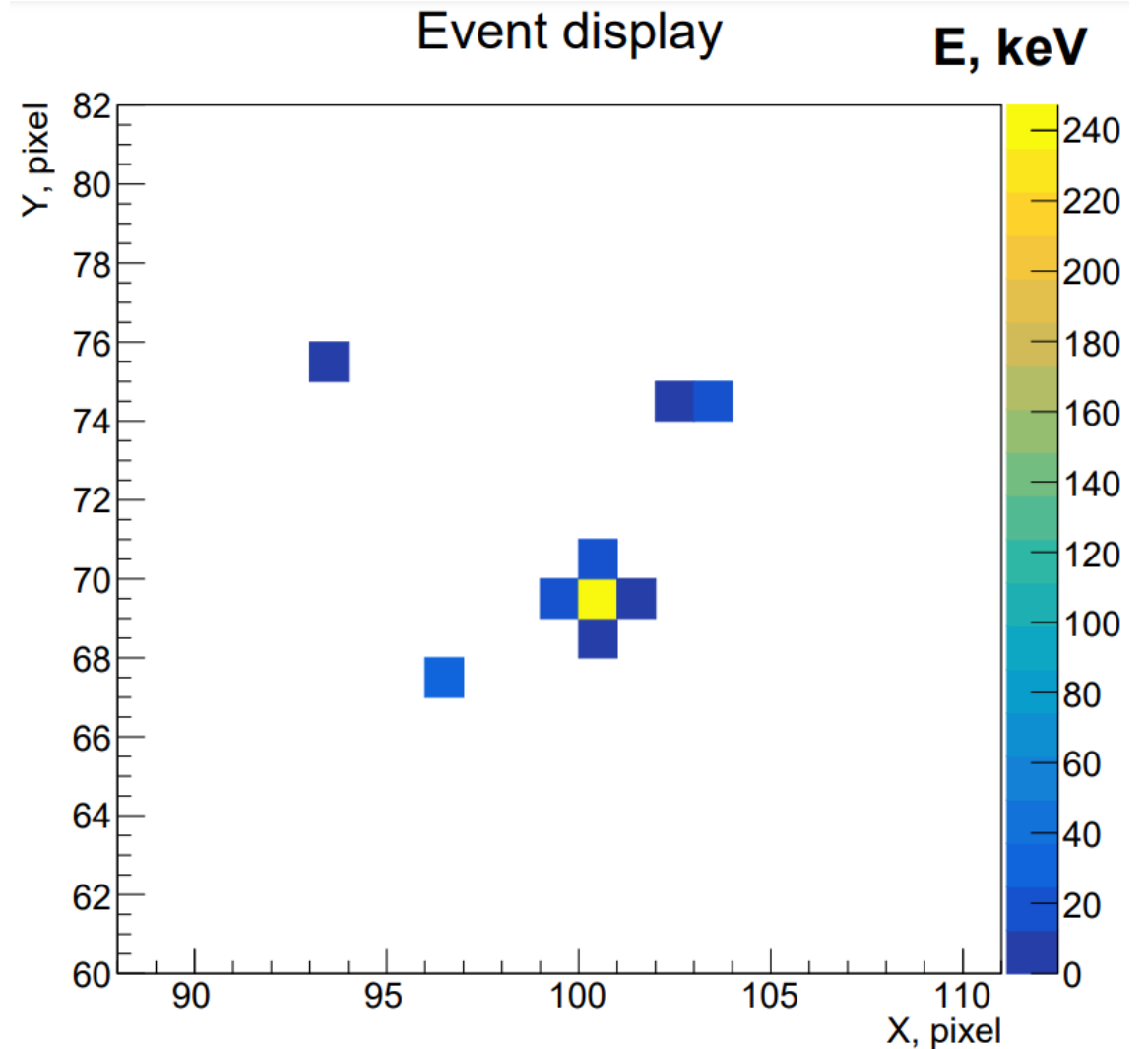
4. Специальные процессы:

- флуоресценция;
- рождение Оже-электронов;
- переходное излучение.



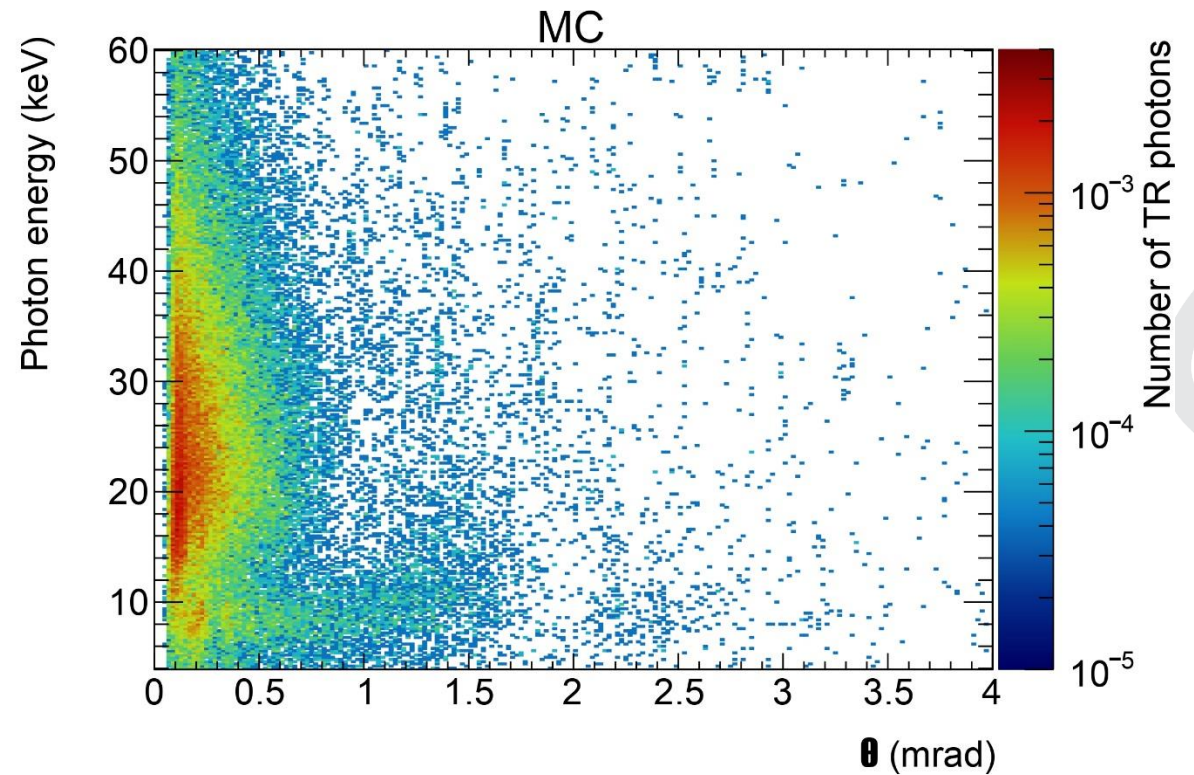
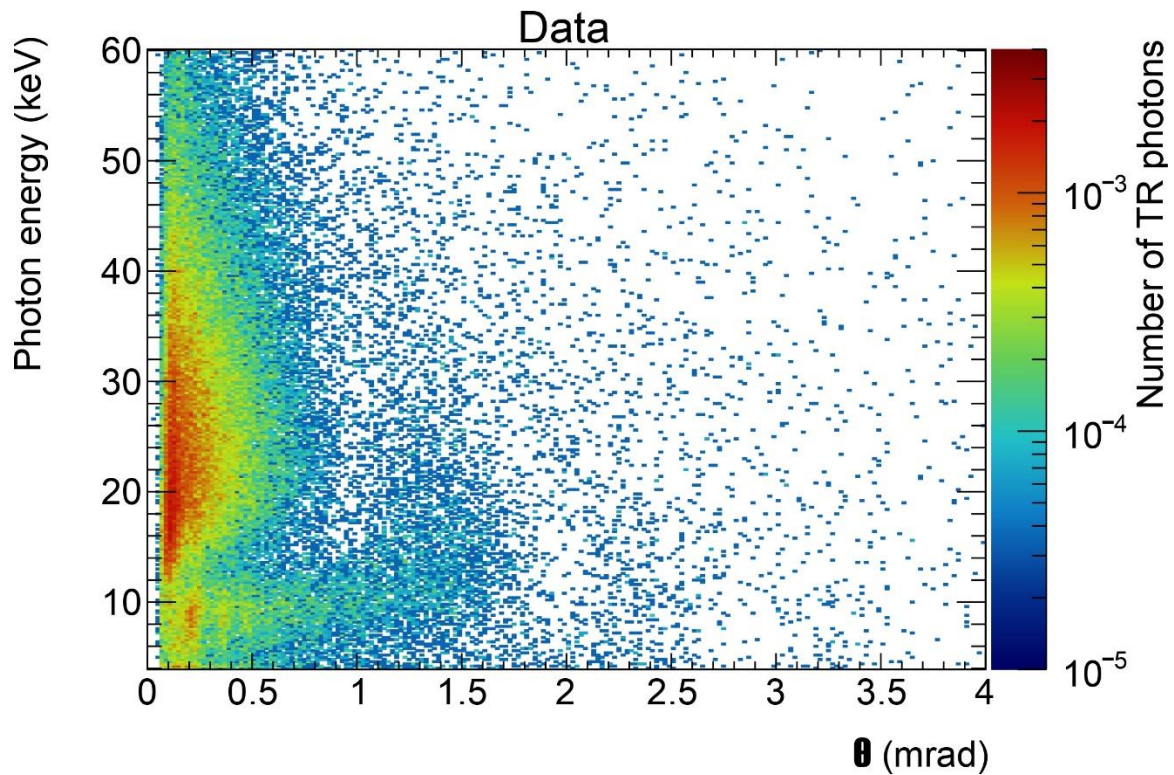
Обработка данных

1. Кластеризация
2. Восстановление и корректировка энергии частицы
3. Восстановление координаты частицы
4. Восстановление угла, под которым испустился квант переходного излучения, от направления первичной частицы
5. Учет вклада фиктивного радиатора



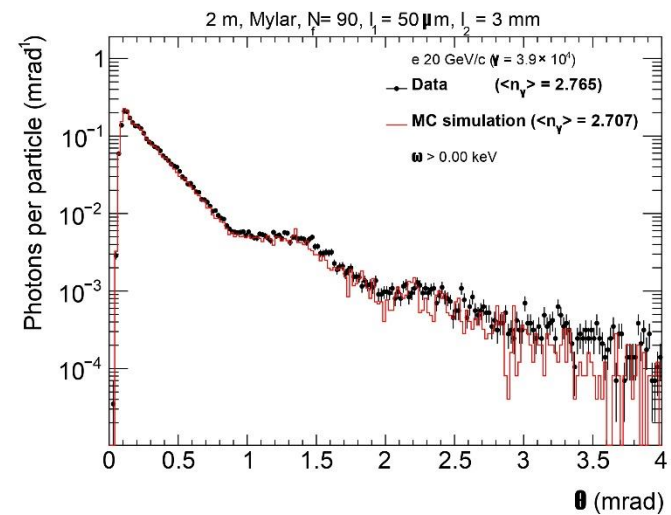
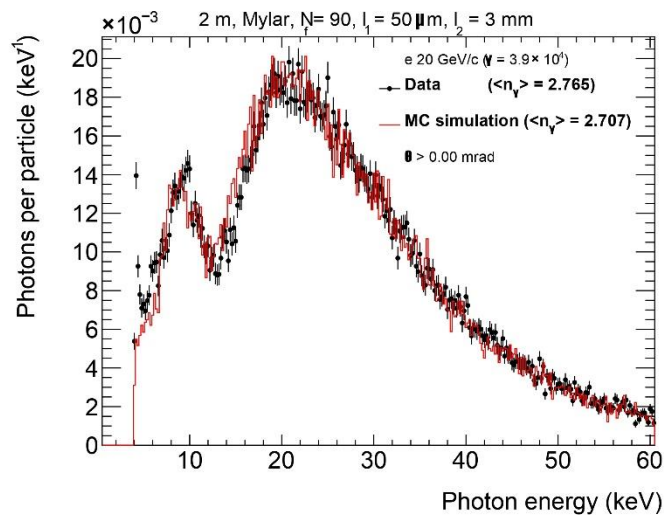
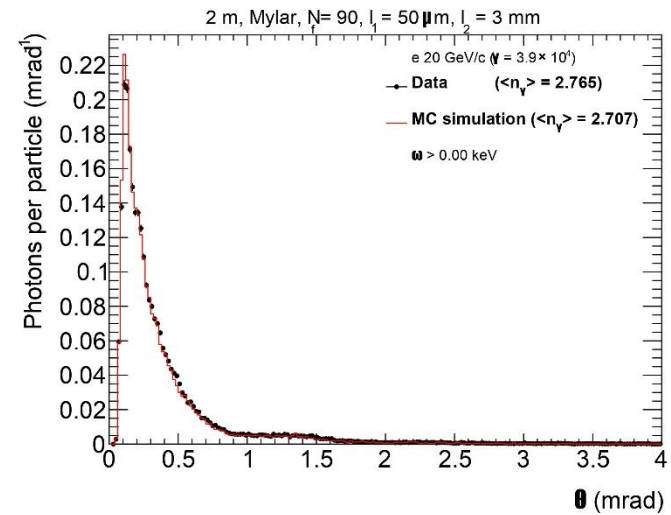
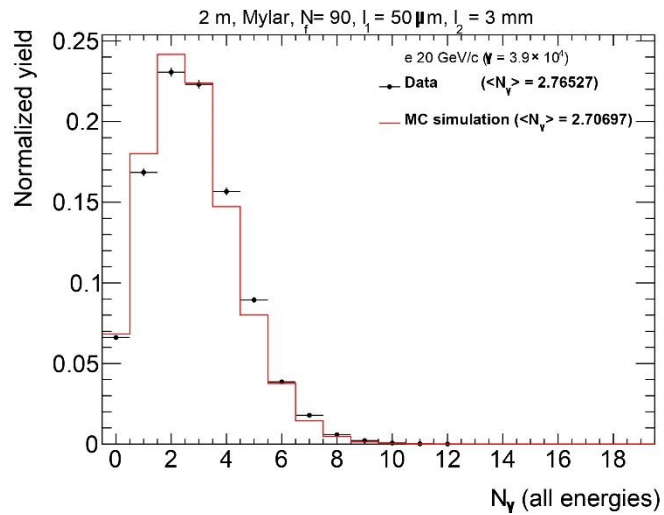
Результаты моделирования

Радиатор из Майлара с числом пленок 90, толщиной 50 мкм и расстоянием между ними 3 мм



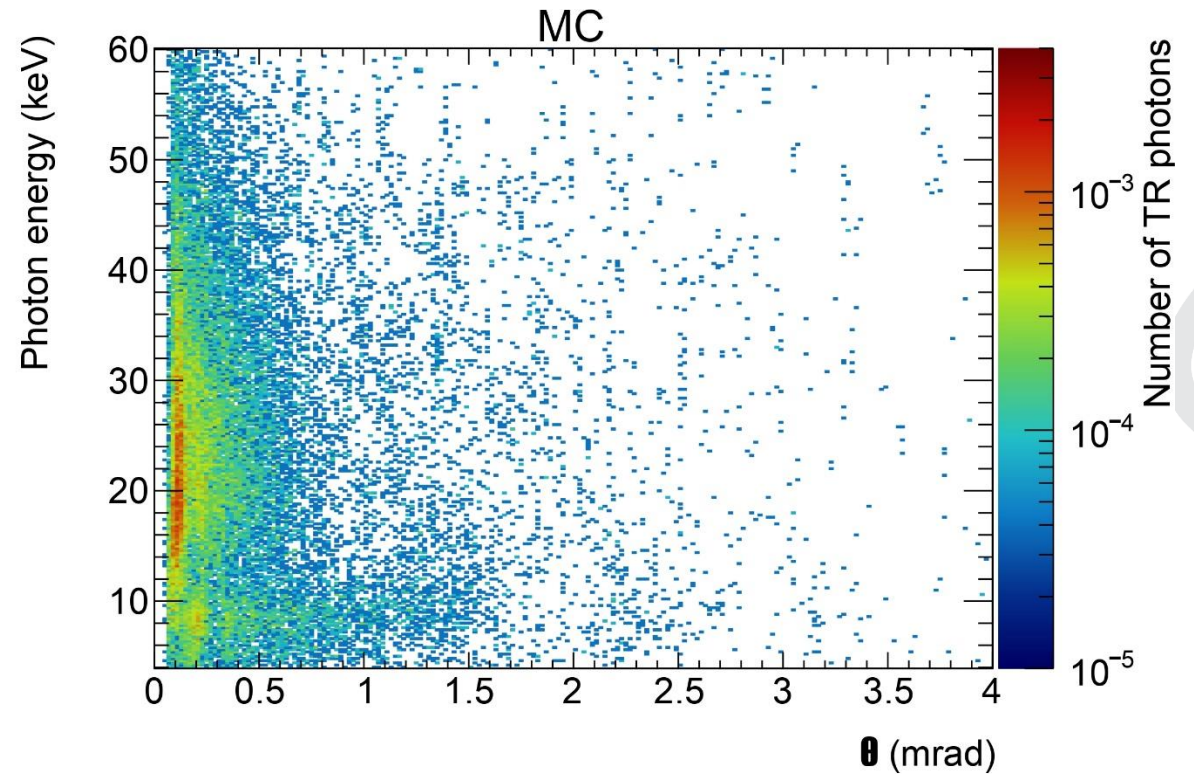
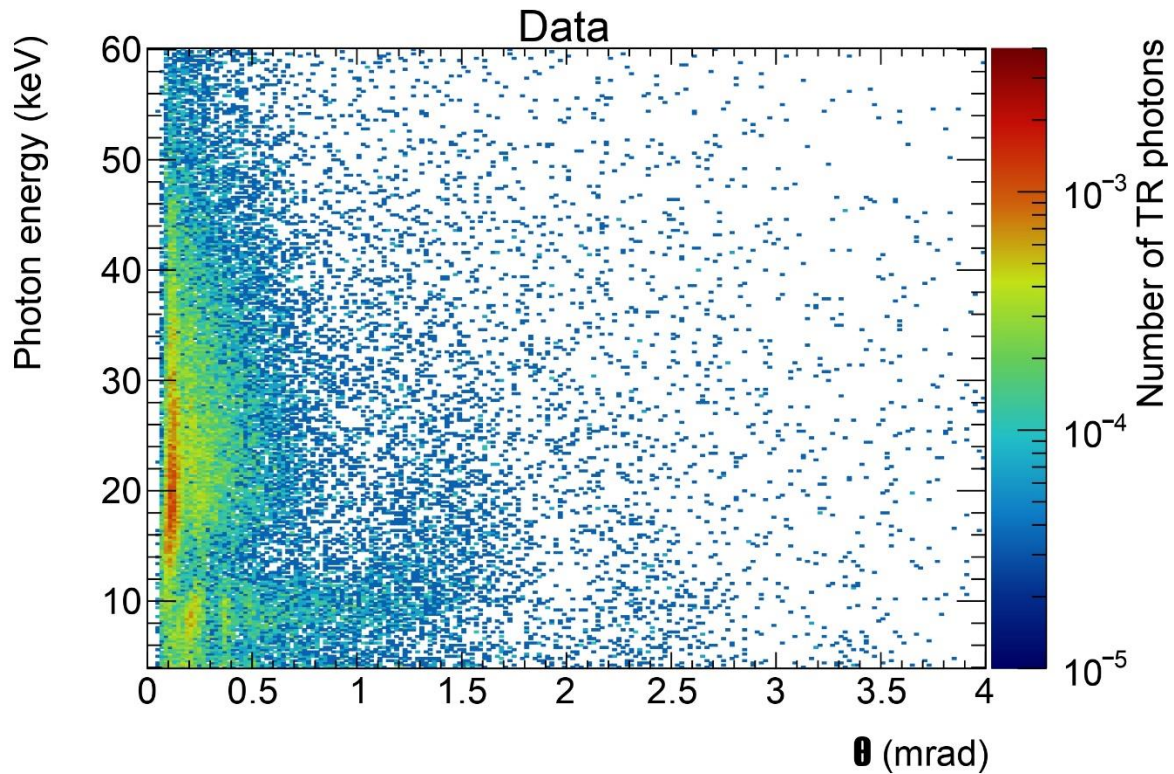
Результаты моделирования

Радиатор из Майлара с числом пленок 90, толщиной 50 мкм и расстоянием между ними 3 мм



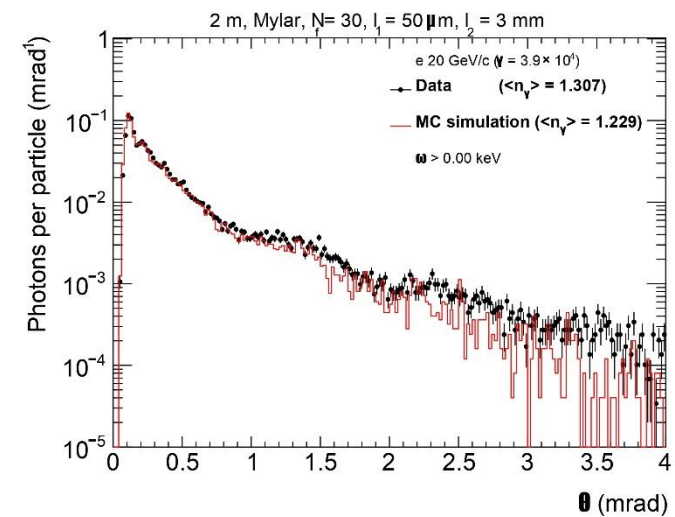
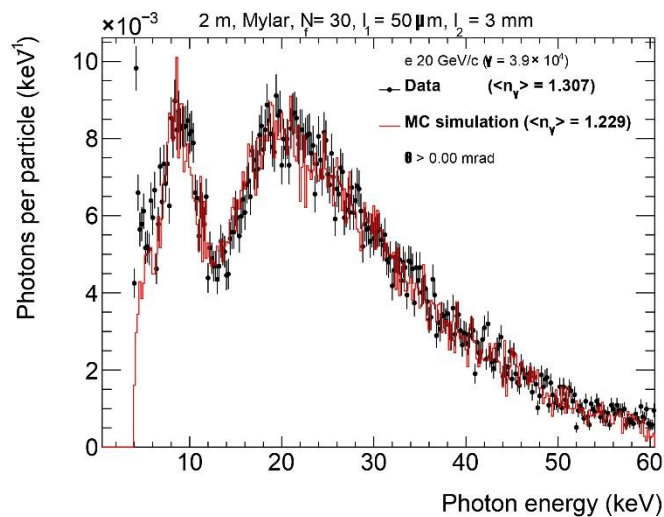
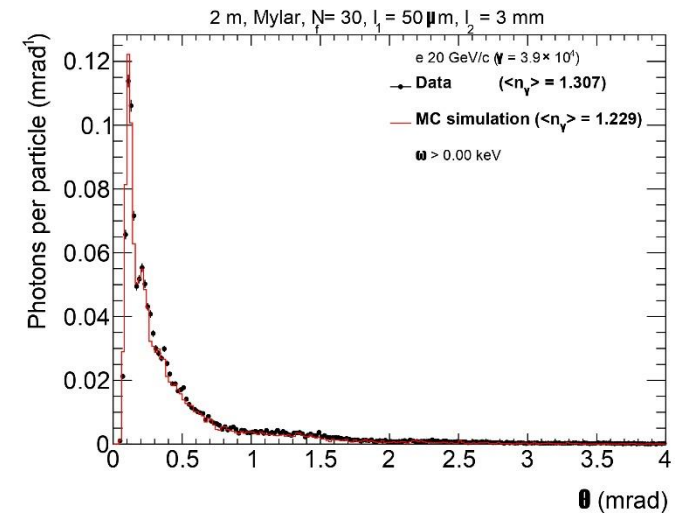
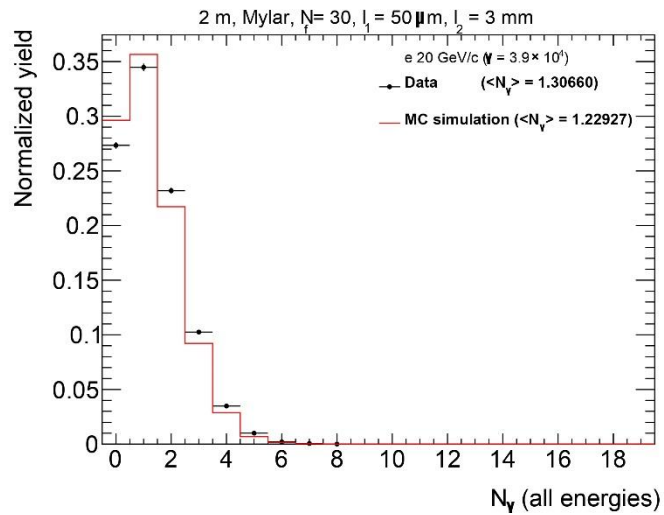
Результаты моделирования

Радиатор из Майлара с числом пленок 30, толщиной 50 мкм и расстоянием между ними 3 мм



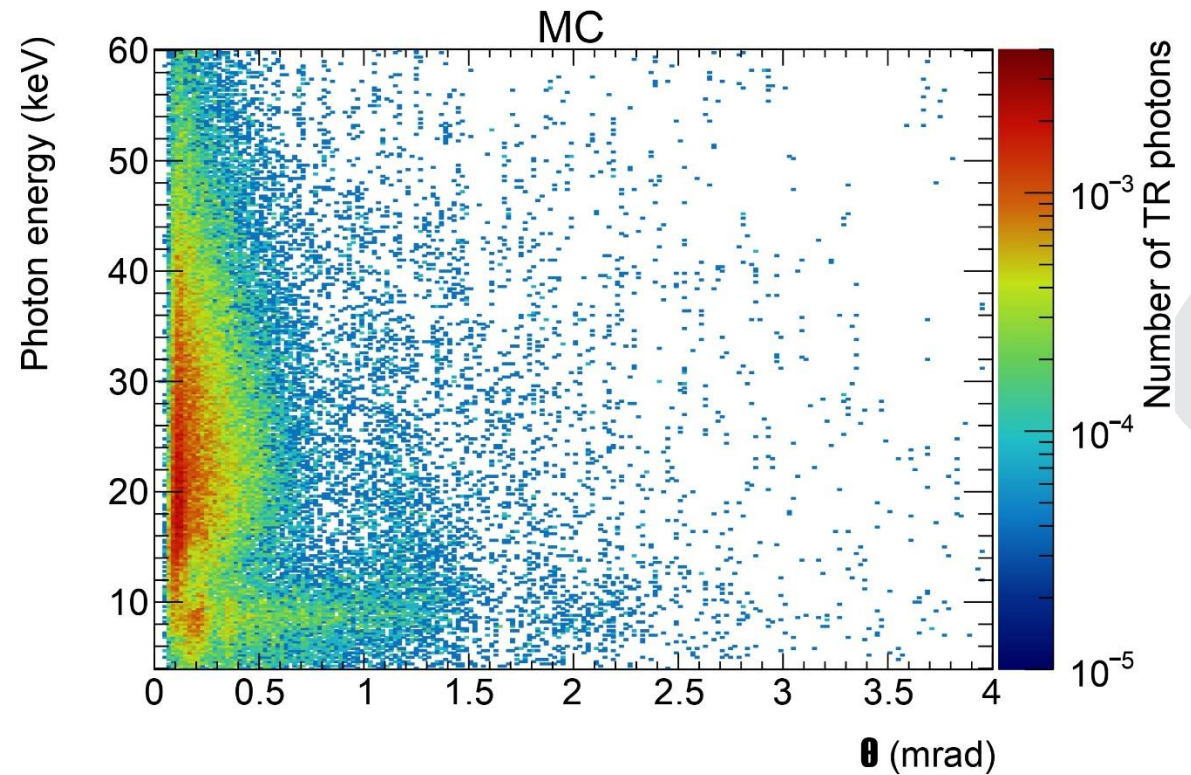
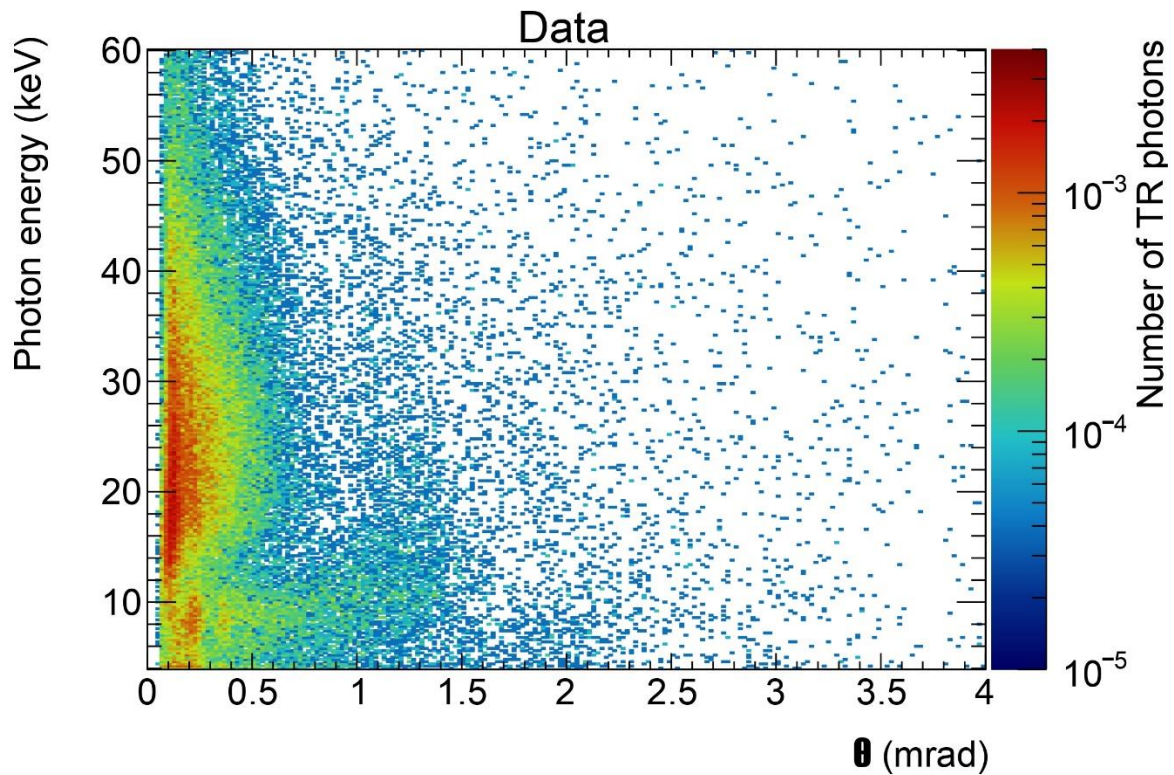
Результаты моделирования

Радиатор из Майлара с числом пленок 30, толщиной 50 мкм и расстоянием между ними 3 мм



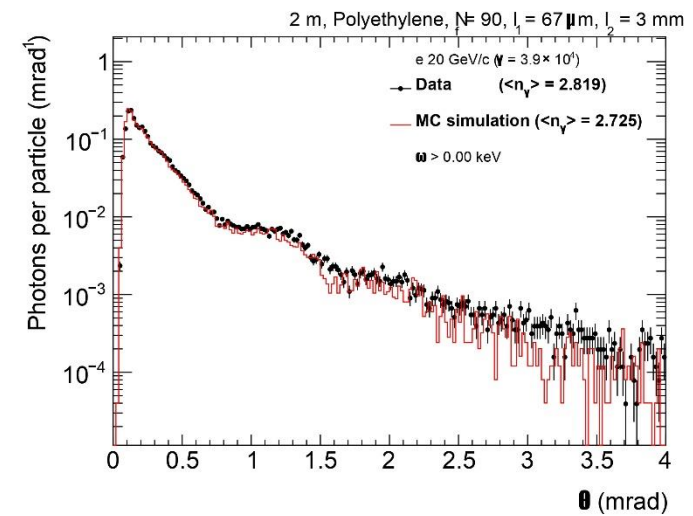
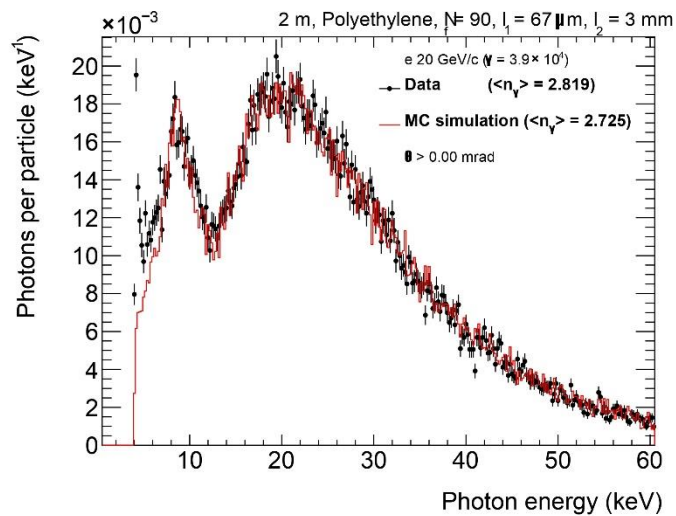
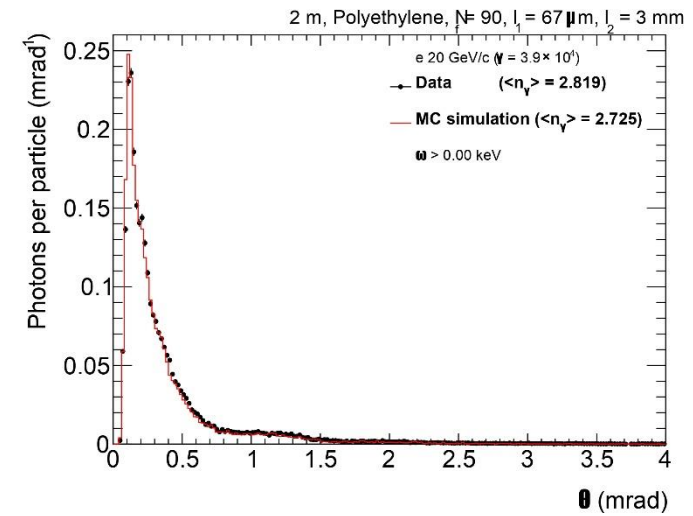
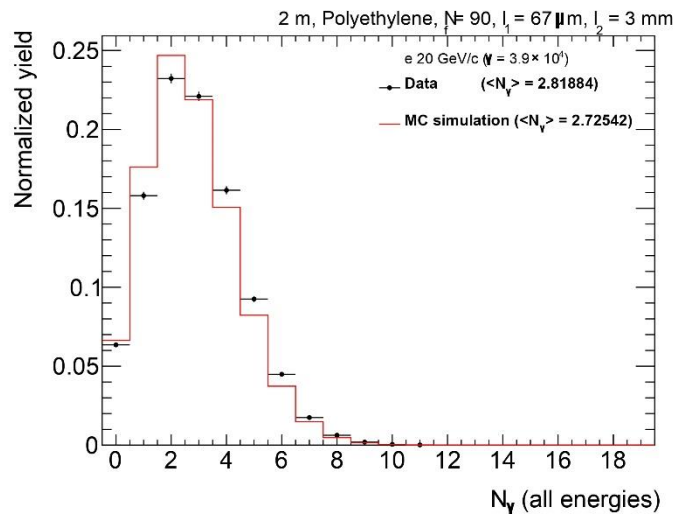
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 90, толщиной 67 мкм и расстоянием между ними 3 мм



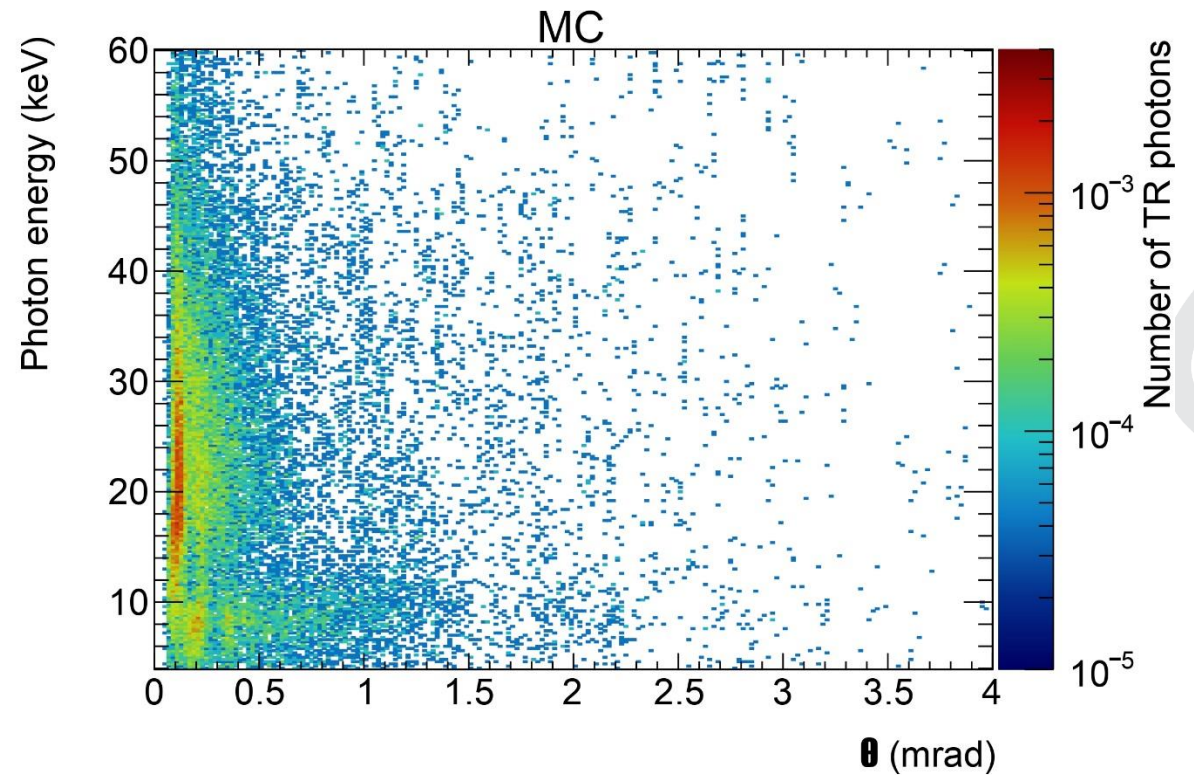
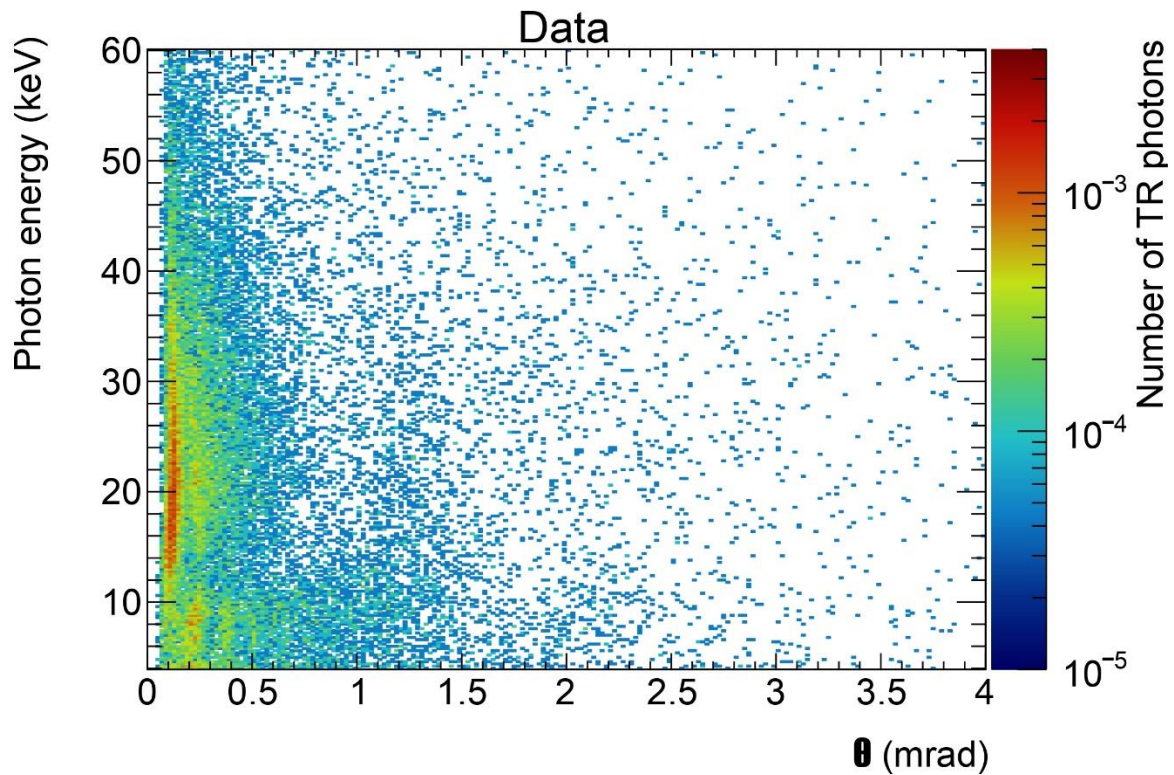
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 90, толщиной 67 мкм и расстоянием между ними 3 мм



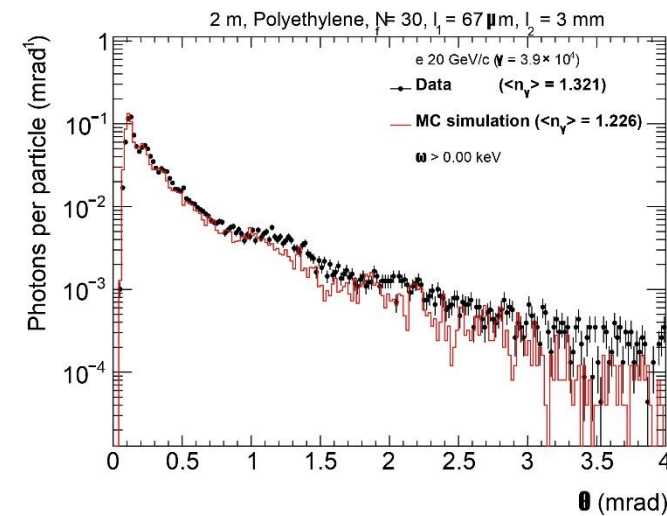
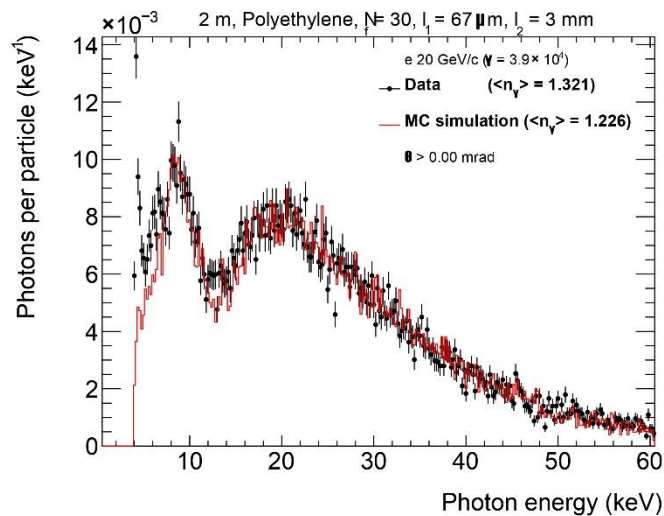
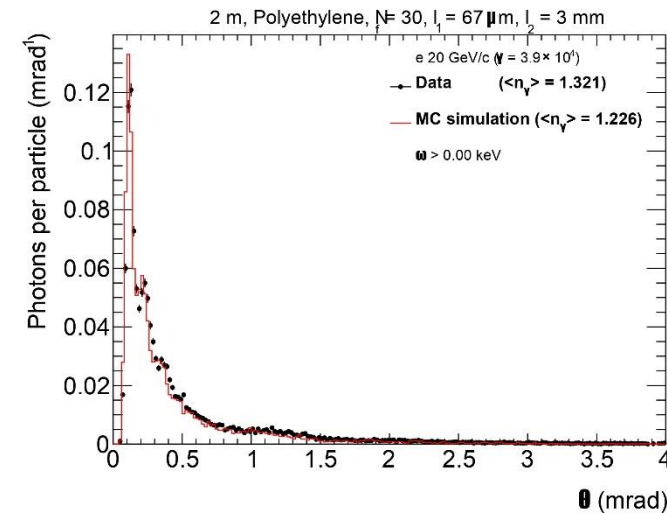
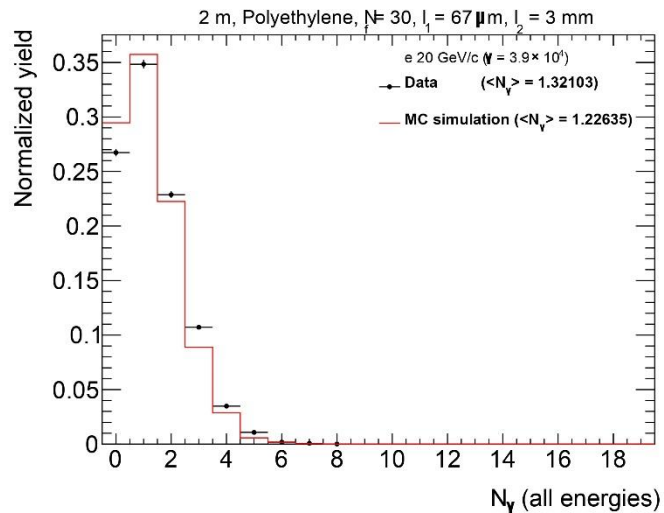
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 30, толщиной 67 мкм и расстоянием между ними 3 мм



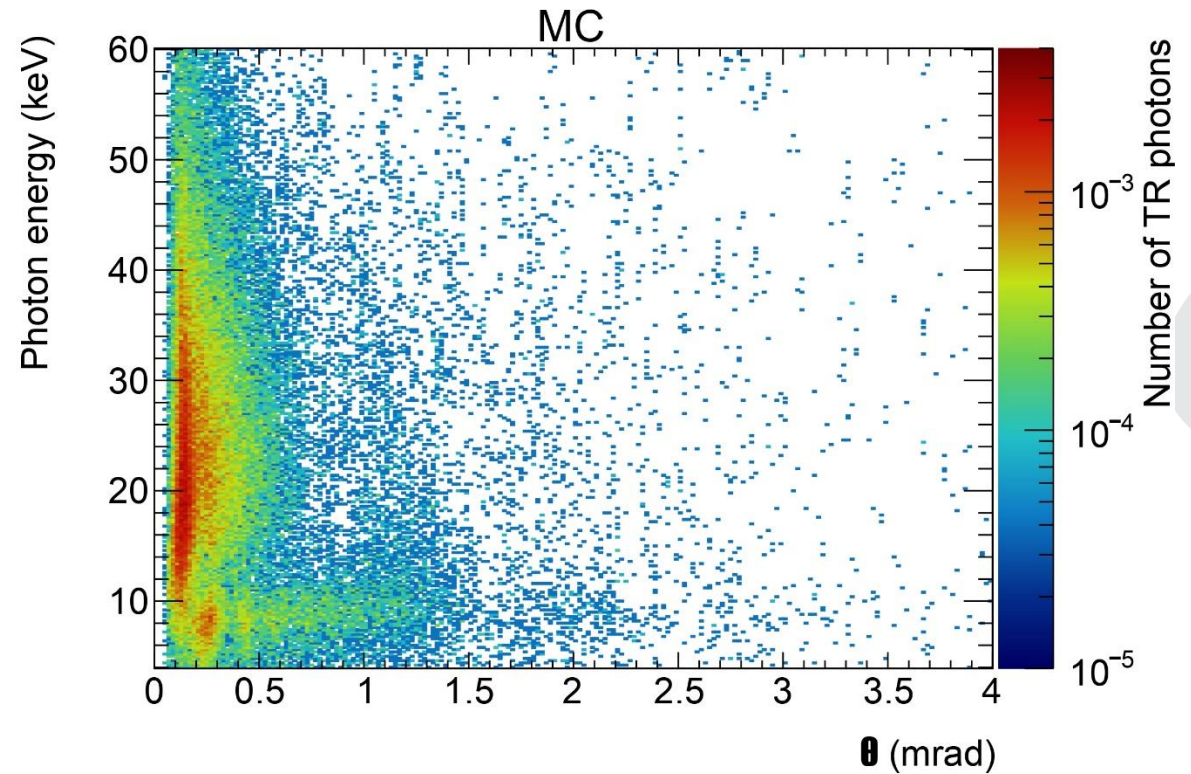
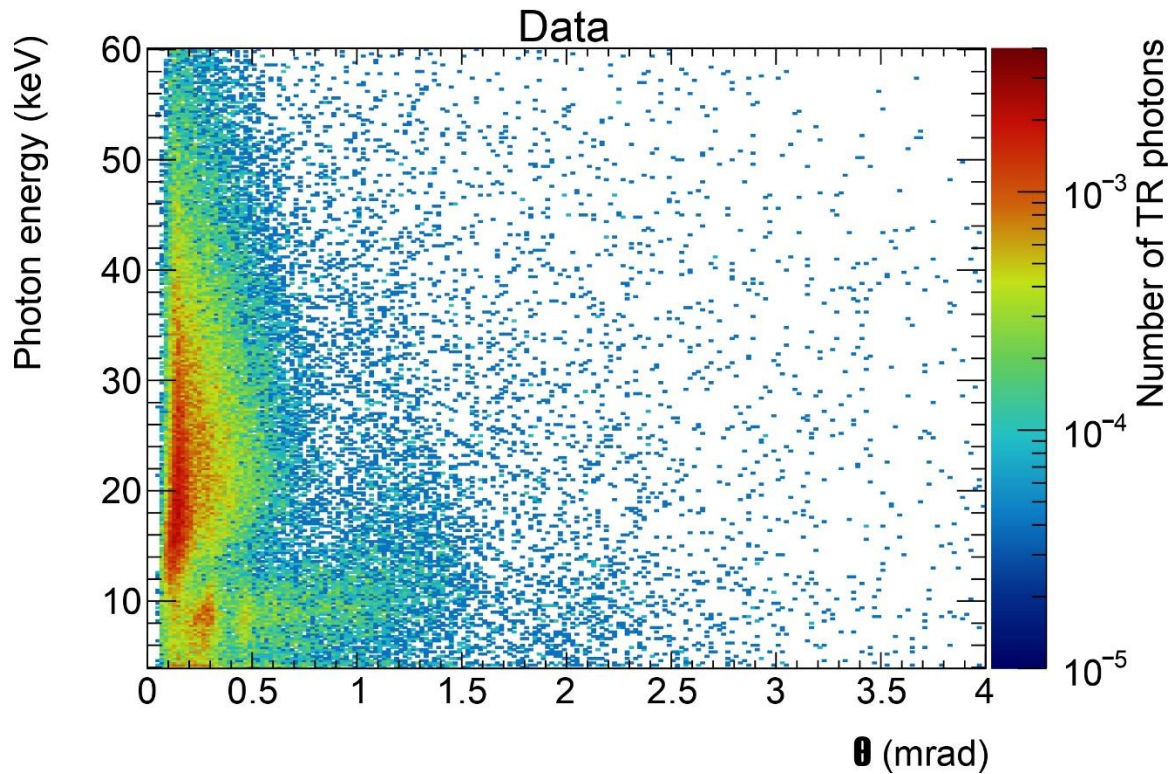
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 30, толщиной 67 мкм и расстоянием между ними 3 мм



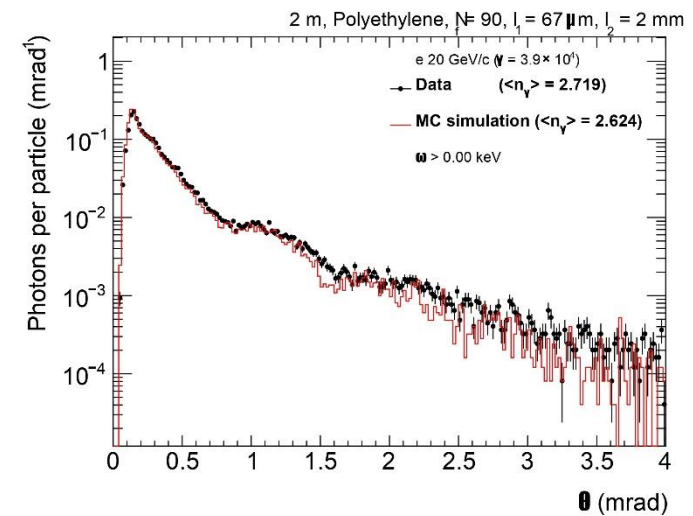
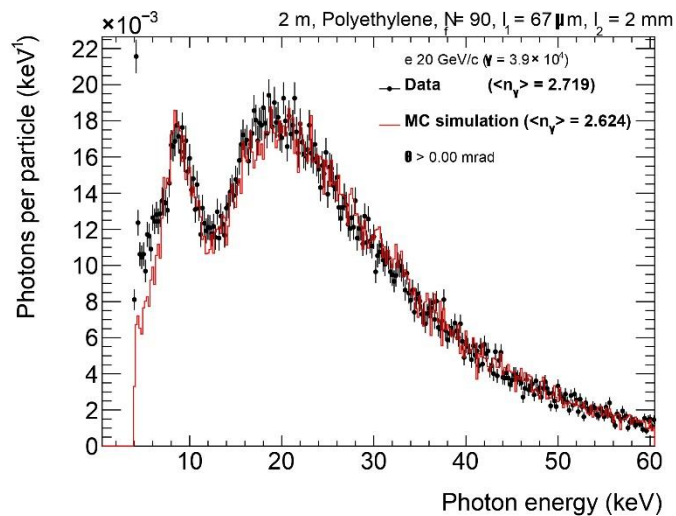
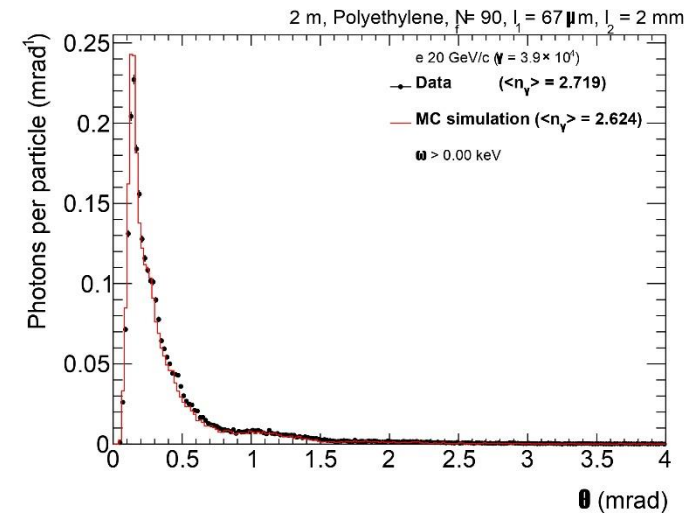
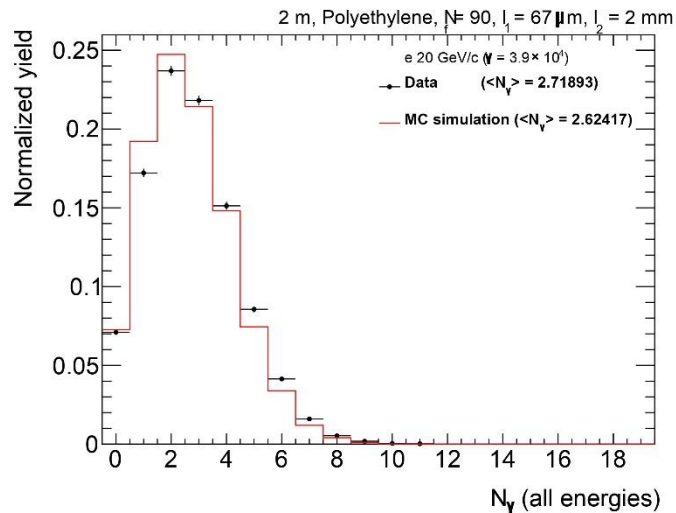
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 90, толщиной 67 мкм и расстоянием между ними 2 мм



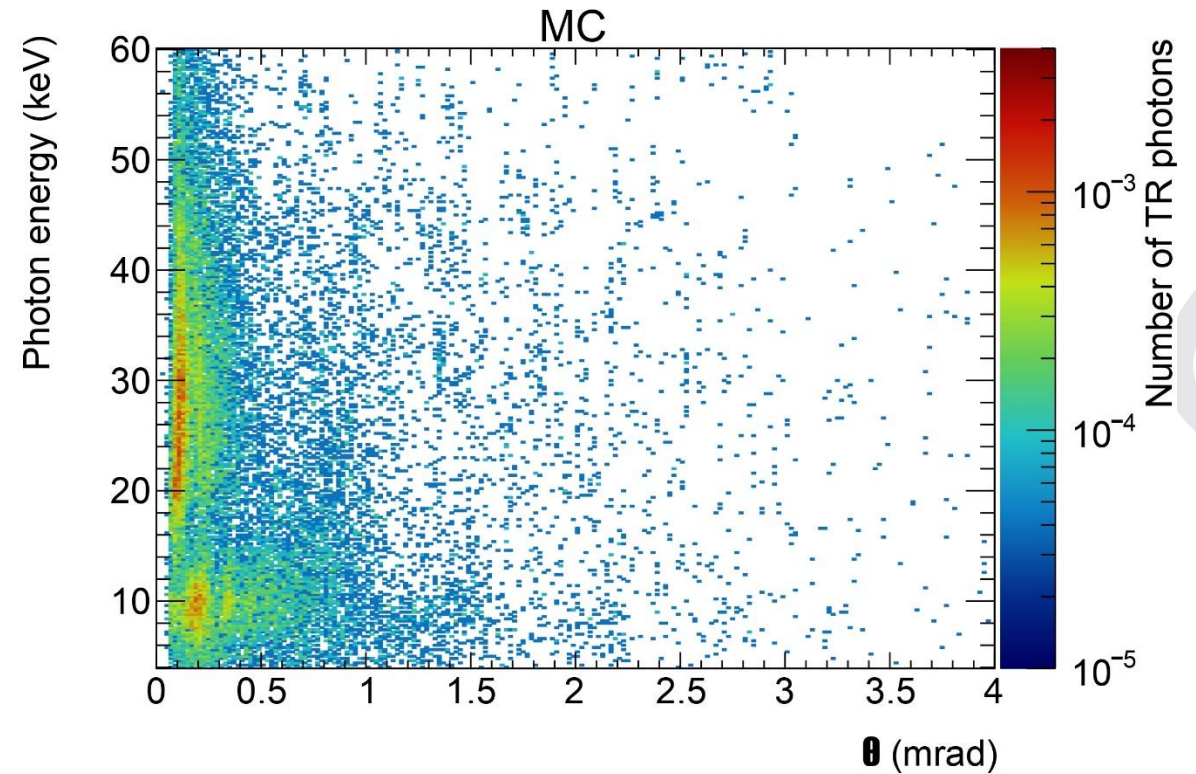
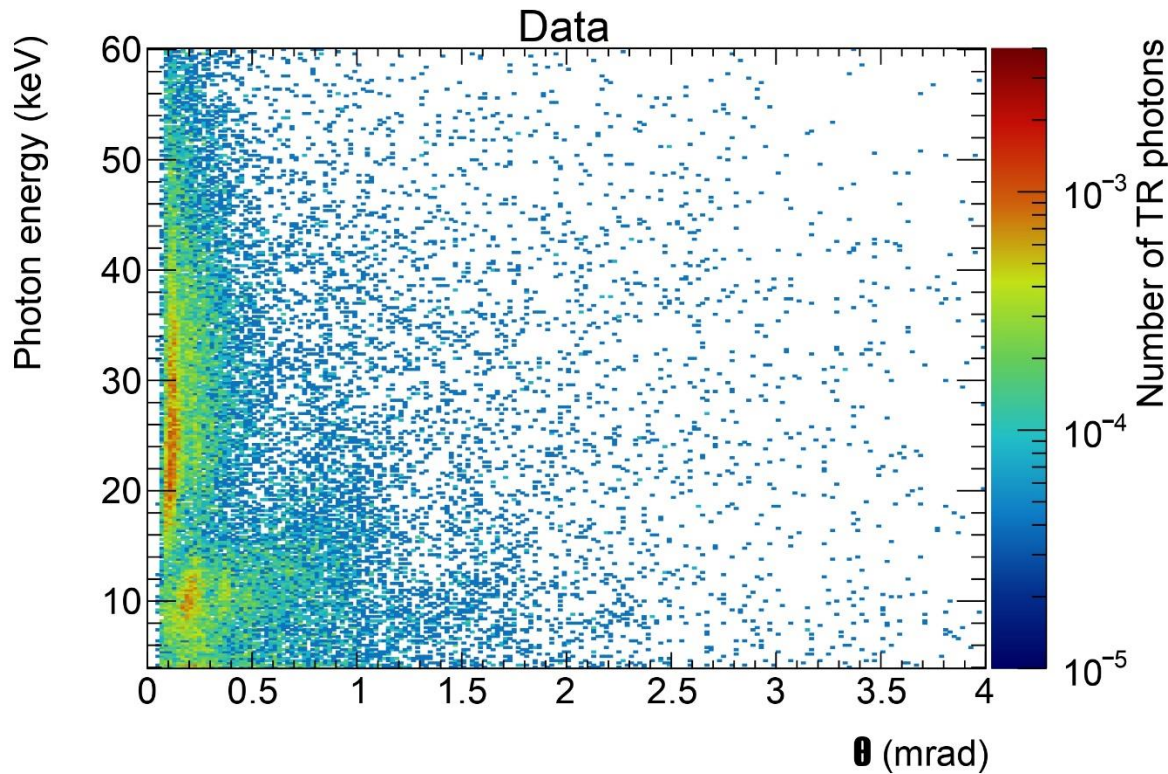
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 90, толщиной 67 мкм и расстоянием между ними 2 мм



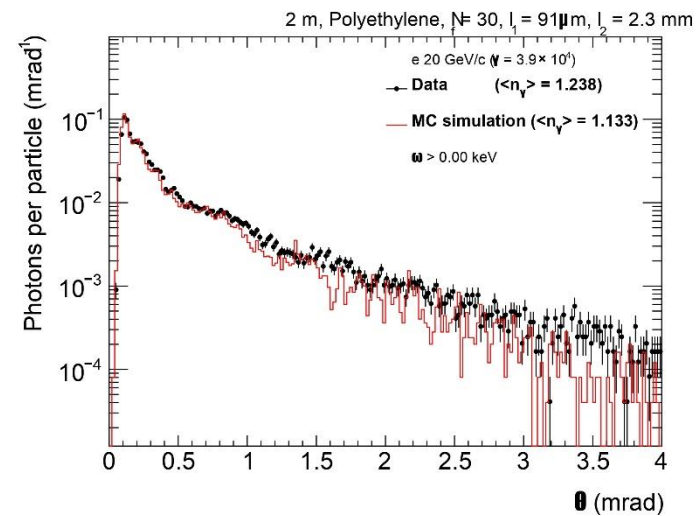
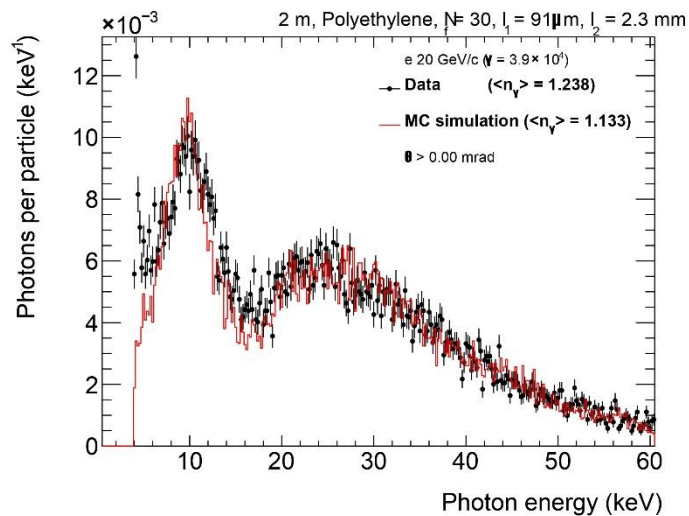
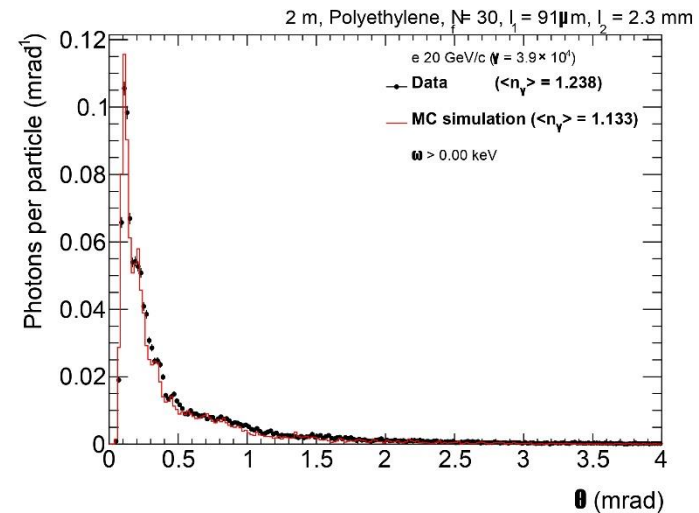
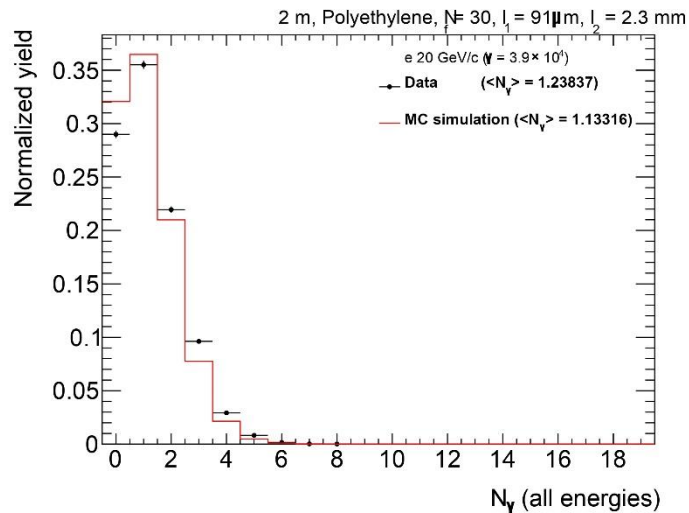
Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 30, толщиной 91 мкм и расстоянием между ними 2,3 мм



Результаты моделирования

Радиатор из полиэтилена с числом пленок 30, толщиной 91 мкм и расстоянием между ними 2,3 мм



Анализ полученных распределений

1. Увеличение толщины одной пленки в радиаторе приводит к получению более жесткого энергетического спектра квантов переходного излучения.
2. Наличие большего количества пленок в радиаторе приводит к генерации большего числа квантов переходного излучения.

Полученные результаты согласуются с теорией переходного излучения и подтверждают корректность её применения

Количество пикселей в кластере, из которых был получен сигнал при попадании первичной частицы или кванта переходного излучения в детектор, остается практически постоянным при изменении параметров радиатора.

Заключение

1. Проведен обзор экспериментов по тестированию детектора переходного излучения на основе арсенида галлия.
2. Описаны основные физические процессы, происходящие в радиаторе и детекторе.
3. Создана и описана геометрическая модель экспериментальной установки с помощью пакета моделирования Geant4.
4. Обработаны данные моделирования и получены распределения по энергии, углу и числу квантов переходного излучения. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных со смоделированными.

Хорошее согласие смоделированных с экспериментальными данными дает возможность использовать данную модель для дальнейших расчетов и других экспериментов.



МИФИ

Национальный
исследовательский
ядерный университет

Спасибо за внимание

Спектрально-угловое распределение

$$\frac{d^2W(\omega, \theta)}{d\omega d\theta} = \frac{e^2 \omega^2 \theta^3}{c 8\pi c^2} |Z_m - Z_{vac}|^2 \times \\ \times \left[(1 - Q^{1/2})^2 + 4Q^{1/2} \sin^2 \left(\operatorname{Re} \frac{a}{Z_m} \right) \right] F_M(\omega, \theta)$$

$$Z_{vac} = \frac{4c}{\omega \left(\frac{1}{\gamma^2} + \theta^2 \right)}, \quad Z_m = \frac{4c}{\omega \left(\frac{1}{\gamma^2} + \theta^2 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right)}$$

$$F_M(\omega, \theta) = \frac{(1 - Q^{M/2})^2 + 4Q^{M/2} \sin^2 \left(M \operatorname{Re} \left(\frac{a}{Z_m} + \frac{b}{Z_{vac}} \right) \right)}{(1 - Q^{1/2})^2 + 4Q^{1/2} \sin^2 \left(\operatorname{Re} \left(\frac{a}{Z_m} + \frac{b}{Z_{vac}} \right) \right)}$$

$$Q = \exp \left[\frac{6\omega a \frac{\omega_p^2}{\omega^4}}{c} \right]$$



Энергетическое распределение

$$\frac{dW(\omega)}{d\omega} = \frac{e^2 \omega M_{eff}}{4c^2(a+b)} \times \sum_n \theta_n^2 |Z_{vac} - Z_m|^2 \left((1 - Q^{1/2})^2 + 4Q^{1/2} \sin^2 \left[\operatorname{Re} \frac{a}{Z_m} \right] \right) \Big|_{\theta=\theta_n}$$

$$M_{eff} = \frac{1 - Q^M}{1 - Q}, \quad \theta_n^2 = \frac{4\pi c(n-d)}{\omega(a+b)}, \quad d = C - \operatorname{floor}(C),$$

$$C = \frac{\omega(a+b)}{4\pi c} \left[\left(1 - \frac{2\omega_p^2}{\omega^3} \right) \frac{a}{a+b} + \gamma^{-2} \right]$$



Угловое распределение

$$\frac{dN(\theta)}{d\theta} = \alpha \frac{\theta^3 M}{2c^2} \sum_r |Z_m - Z_{vac}|^2 \sin^2 \left(\operatorname{Re} \frac{a}{Z_m} \right) \frac{\omega_1^3}{|A\omega_1^2 - B|} \Big|_{\omega=\omega_1} +$$
$$+ \alpha \frac{\theta^3 M}{2c^2} \sum_r |Z_m - Z_{vac}|^2 \sin^2 \left(\operatorname{Re} \frac{a}{Z_m} \right) \frac{\omega_2^3}{|A\omega_2^2 - B|} \Big|_{\omega=\omega_2}$$

$$A = \frac{(a+b)(\theta^2 + \gamma^{-2})}{4c}, \quad B = \frac{a\omega_p^2}{4c}, \quad \omega_{1,2} = \frac{\pi r \pm \sqrt{(\pi r)^2 - 4AB}}{2A}$$



Диффузия заряда в объеме детектора

Дисперсия распределения Гаусса, описывающего диффузию:

1. Теоретическая формула

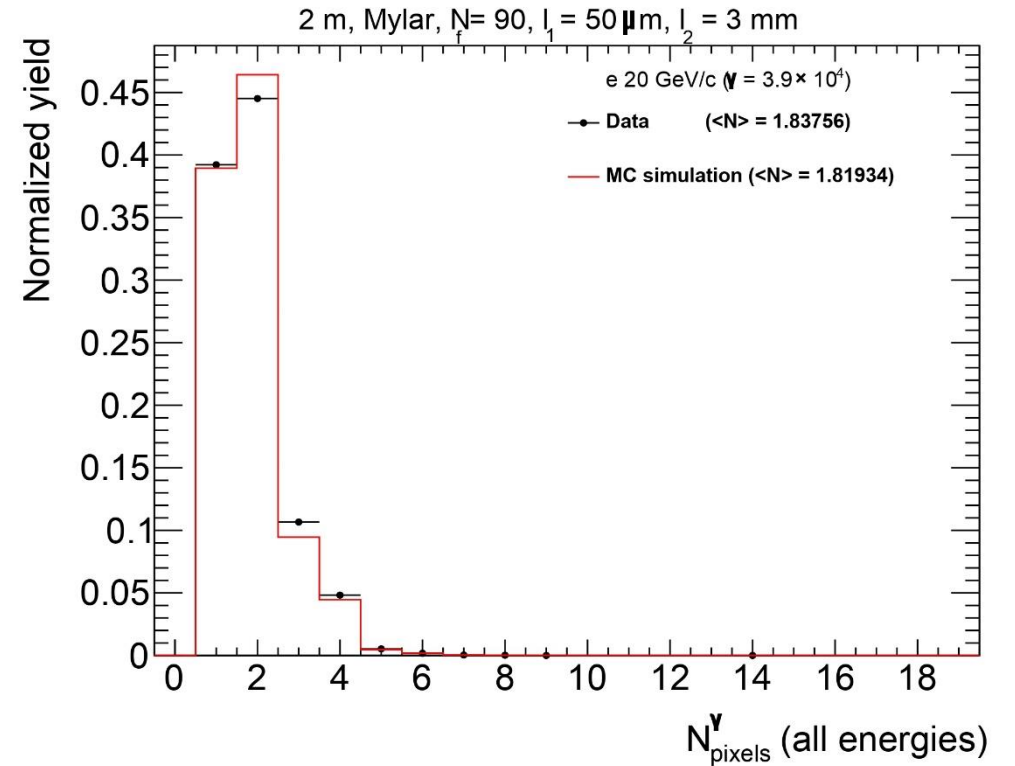
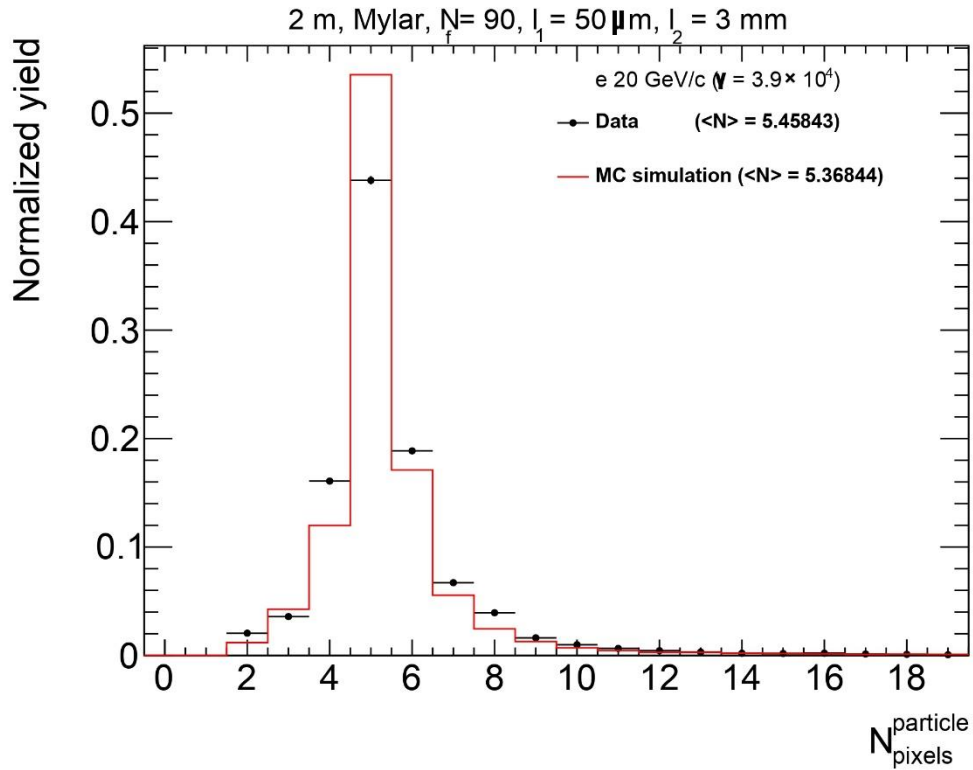
$$\sigma_x = \sqrt{\frac{2kTx}{eE}}$$

2. Эмпирическая формула

$$\sigma = 0,023 \cdot l + 0,002 \quad (mm)$$



Диффузия заряда в объеме детектора



Метод центра тяжести

$$x_{\text{gravity}} = 2,41 \cdot \text{shin}(0,12 \cdot x_{\text{true}} - 9,5 \cdot 10^{-4}) + 0,01$$

