



Уточнённая Geant4-модель детектора BBC эксперимента SPD

Подготовил: Завидов Е.Н.
Научный руководитель: к.ф.-м.н., доц. Солдатов Е. Ю.



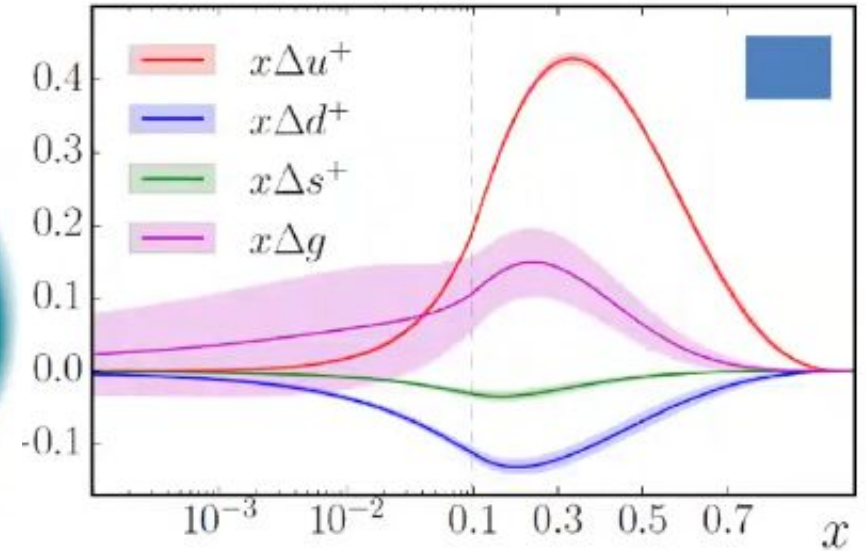
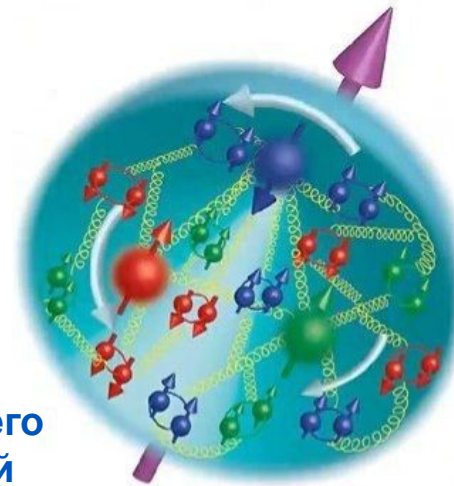
Спиновый кризис



Эксперимент EMC,
CERN 1988



Вклад кварков в спин протона составляет примерно 30% от общего спина, что противоречит наивной кварковой модели



JAM Collaboration, PRD (2016).

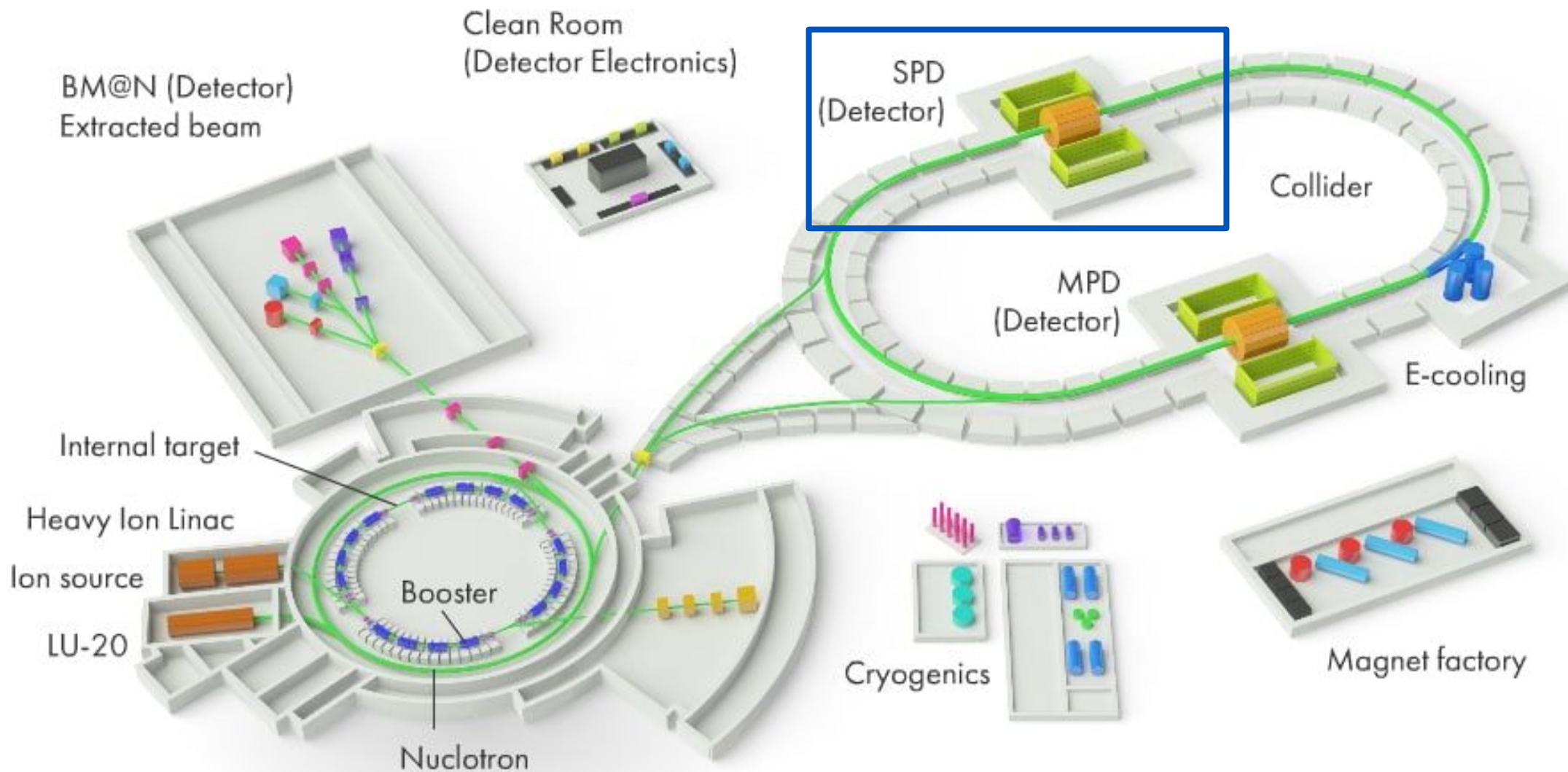
Относительные вклады кварков и глюонов в спин протона

$$J = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta G + L_q + L_g$$

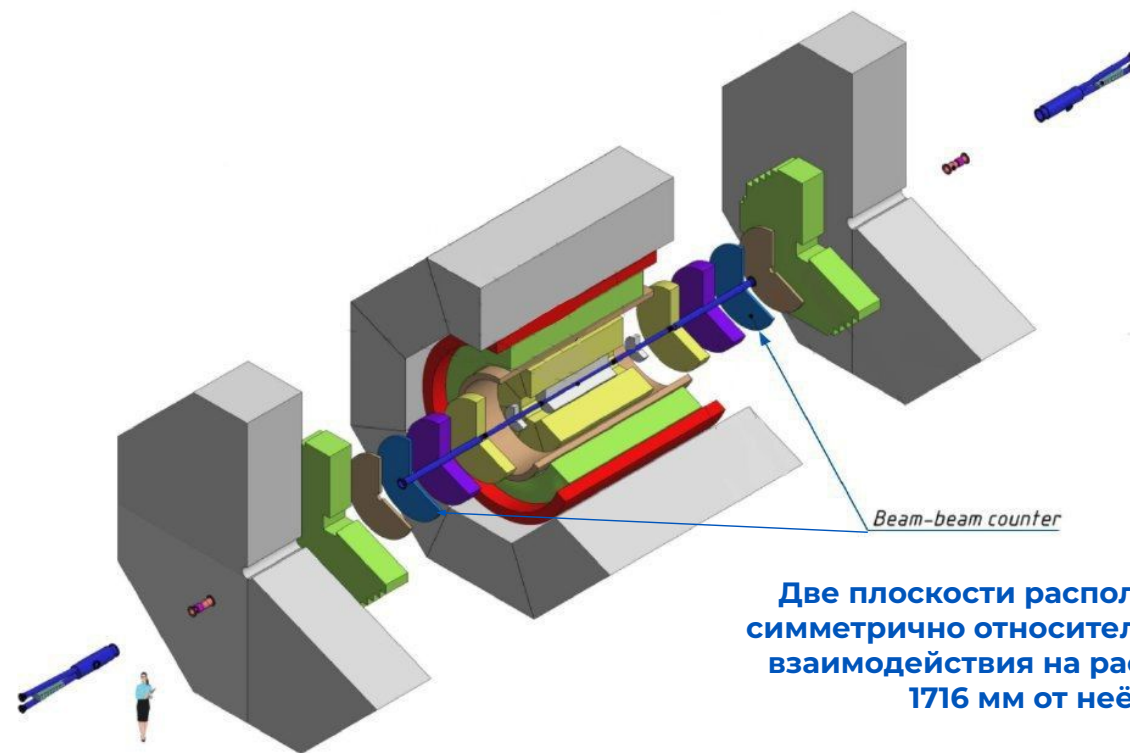
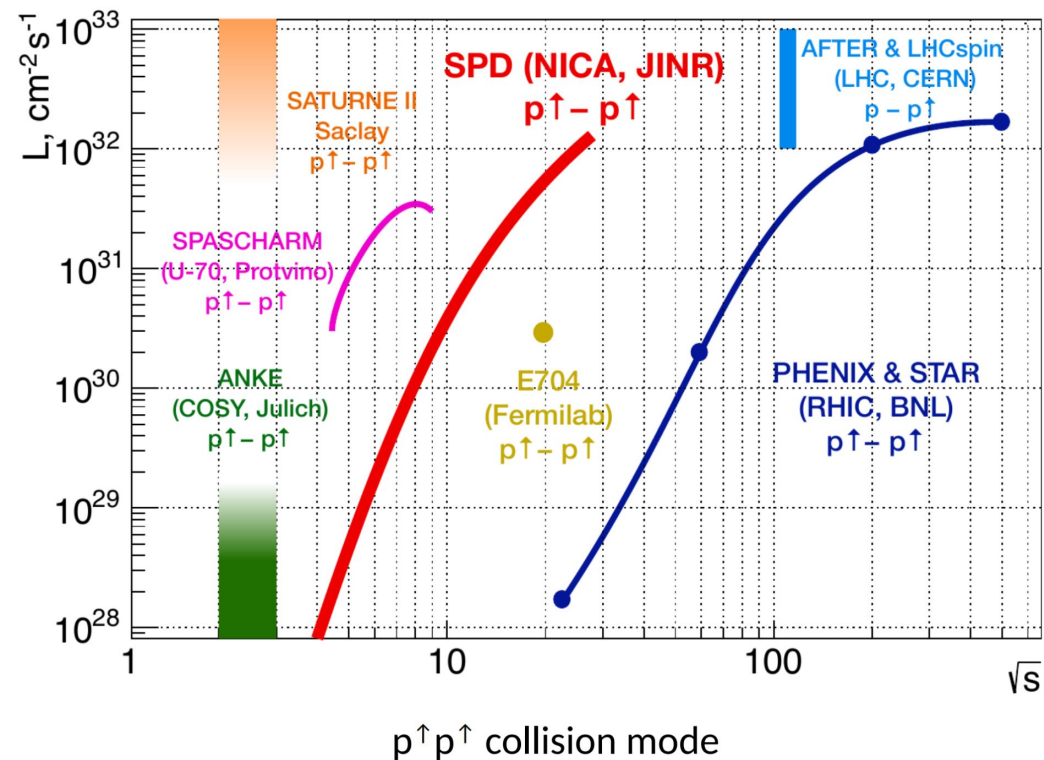
~30% ~10-20% ? ?

Вклад орбитальных моментов движения партонов в спин протона ещё не учтён

Эксперимент SPD



Эксперимент SPD и детектор BBC

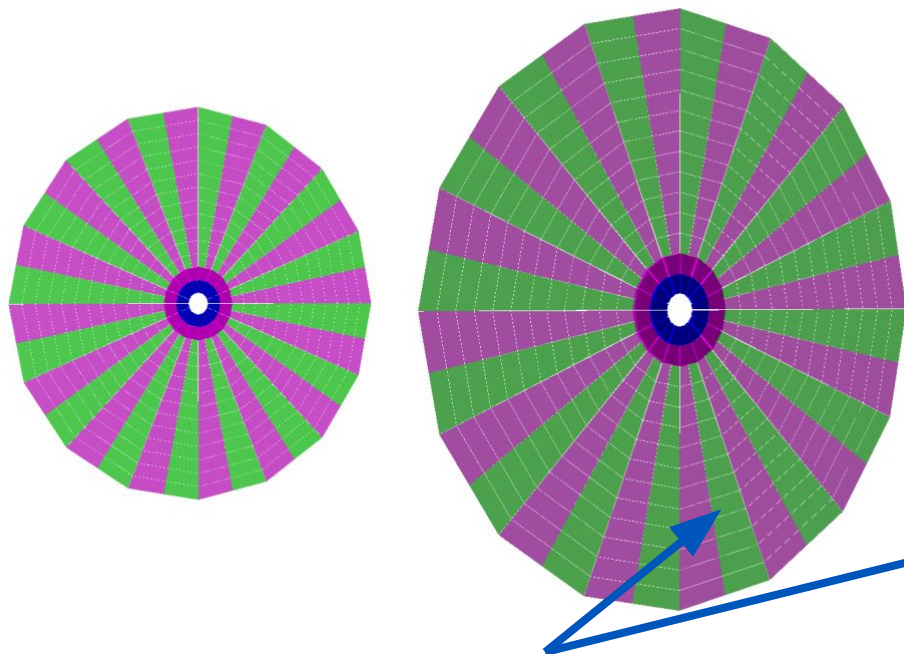


Сравнение SPD с другими экспериментами

SPD и BBC

Устройство ВВС и его модель

Существующая модель



- 1) Нет углублений для оптоволоконна;
- 2) Нет точной настройки материалов.

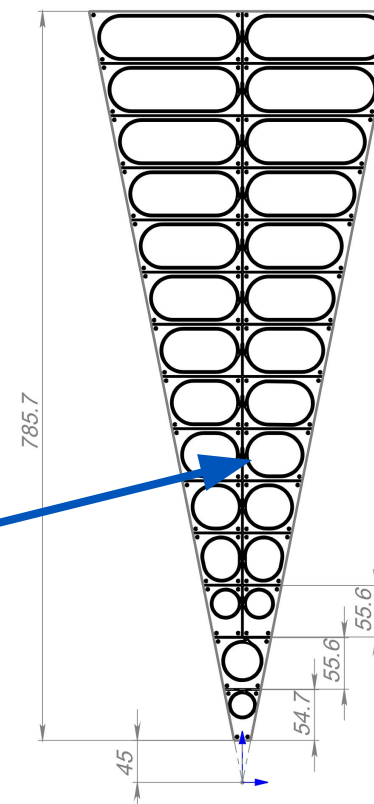
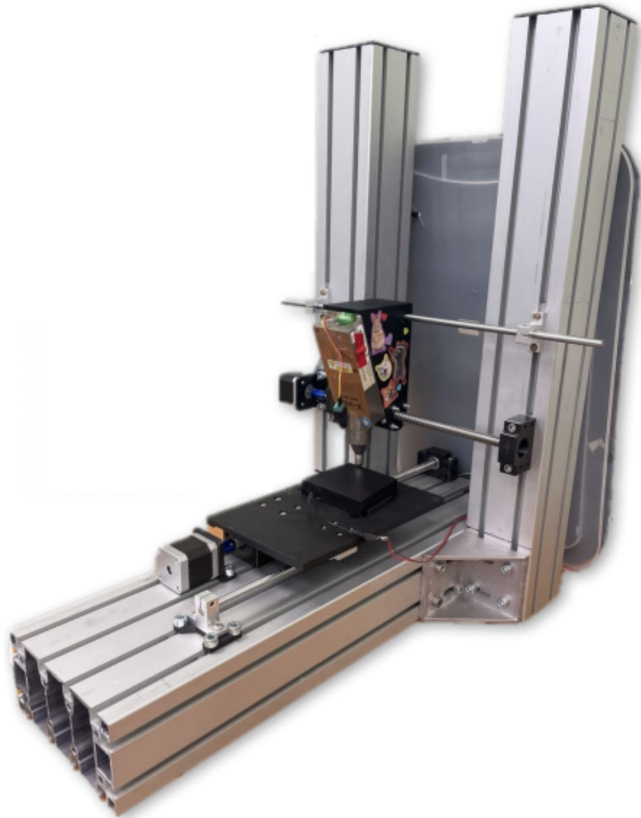


Чертёж сектора

Цель работы:

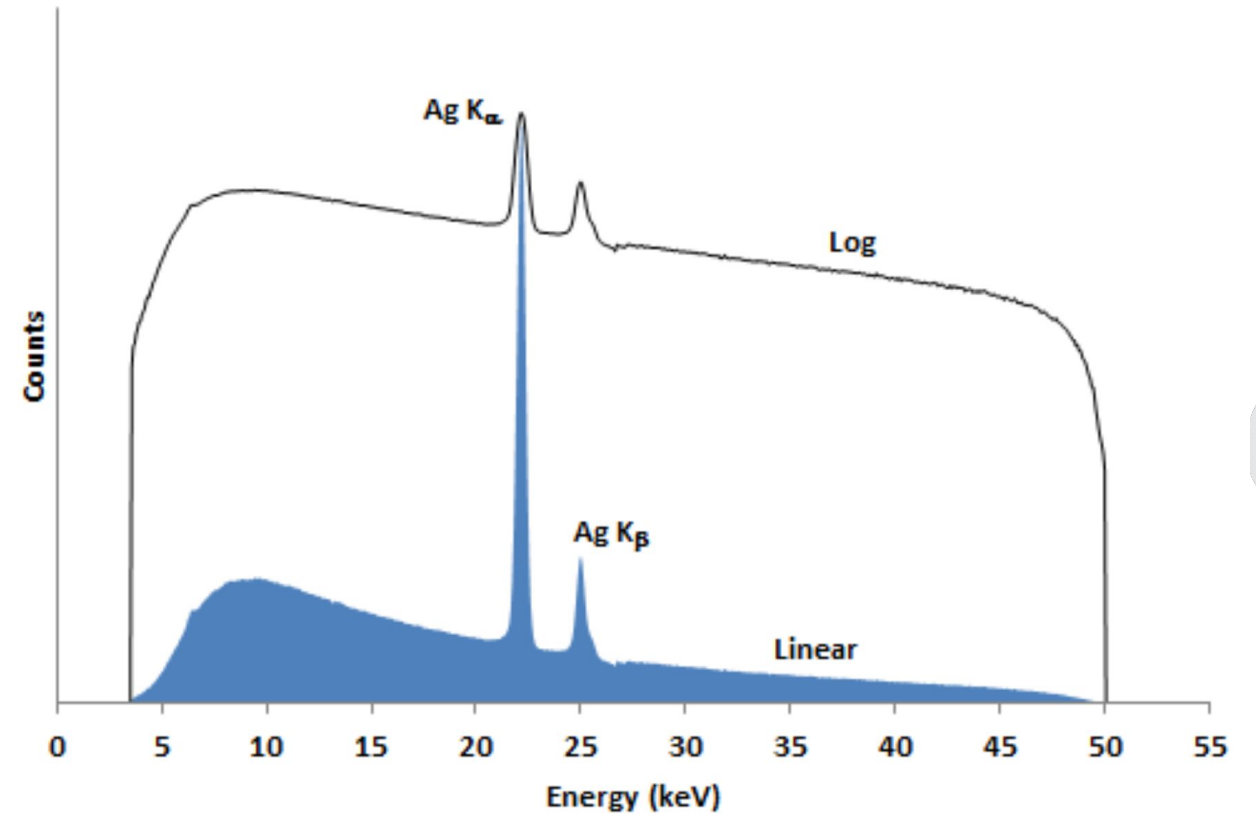
Создание уточнённой Geant4-модели детектора ВВС эксперимента SPD

Сравнение модели и эксперимента: конфигурация экспериментальной установки



Экспериментальная установка по облучению
сцинтилляционной пластины (тайла)
рентгеновским излучением

Mini-X Silver (Ag) X-Ray Tube Output Spectrum

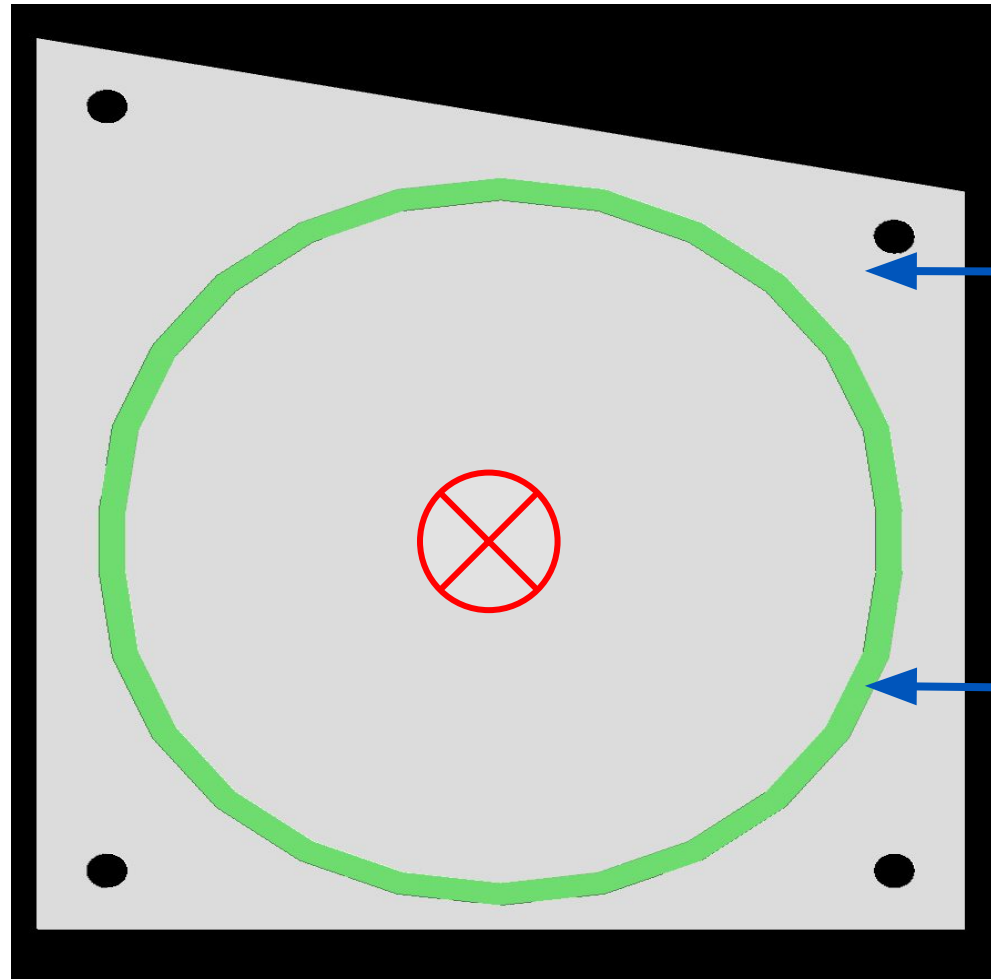


Спектр рентгеновской трубки

Сравнение модели и эксперимента: конфигурация модели



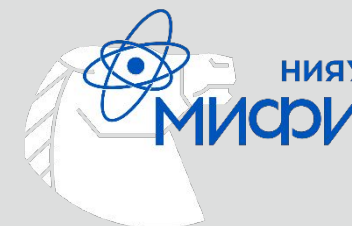
⊗ - направление прилёта
рентгеновского
излучения



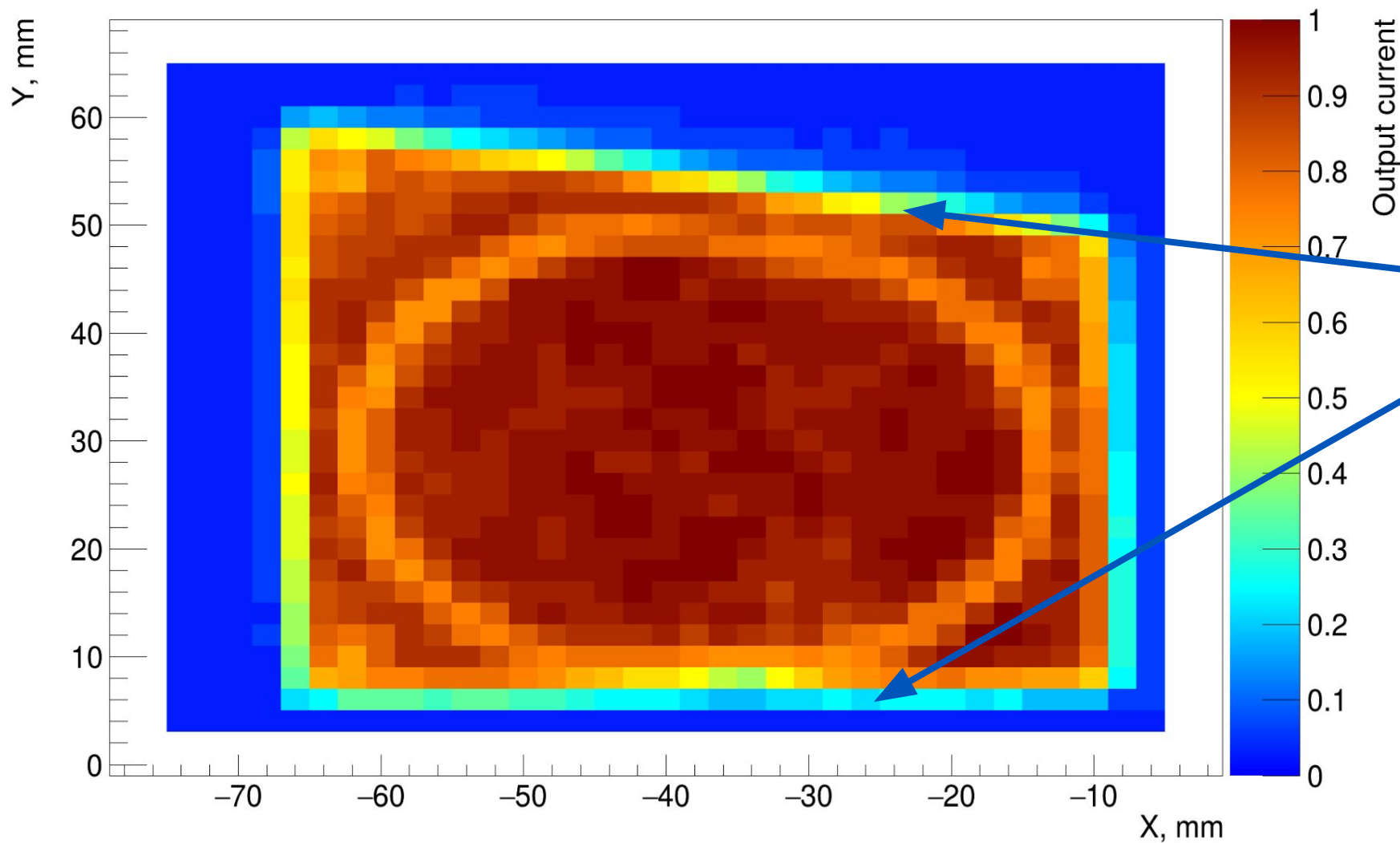
← сцинтиллятор

← счётчик
фотонов

Экспериментальные данные



Normalized output current depending on hit position

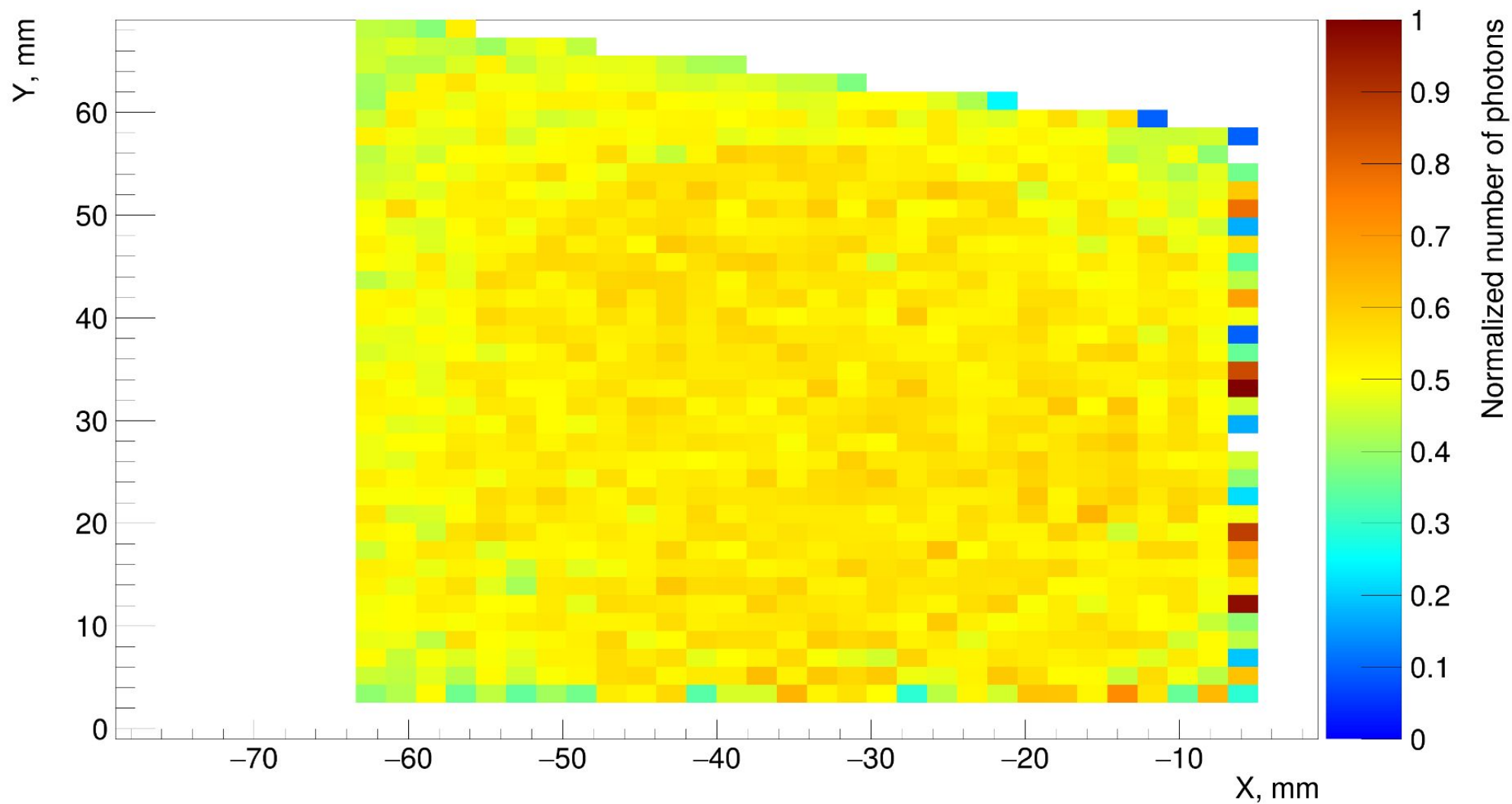


**неоднородности,
вызванные разбросом
угла разлёта
рентгеновских
фотонов**

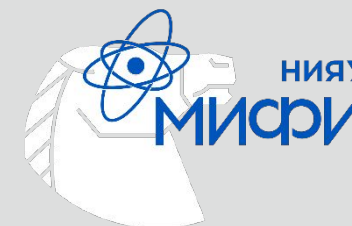
Данные симуляции: модель с пропускающими стенками



Registered photons



Сравнение симуляции и модели



simulation / experiment

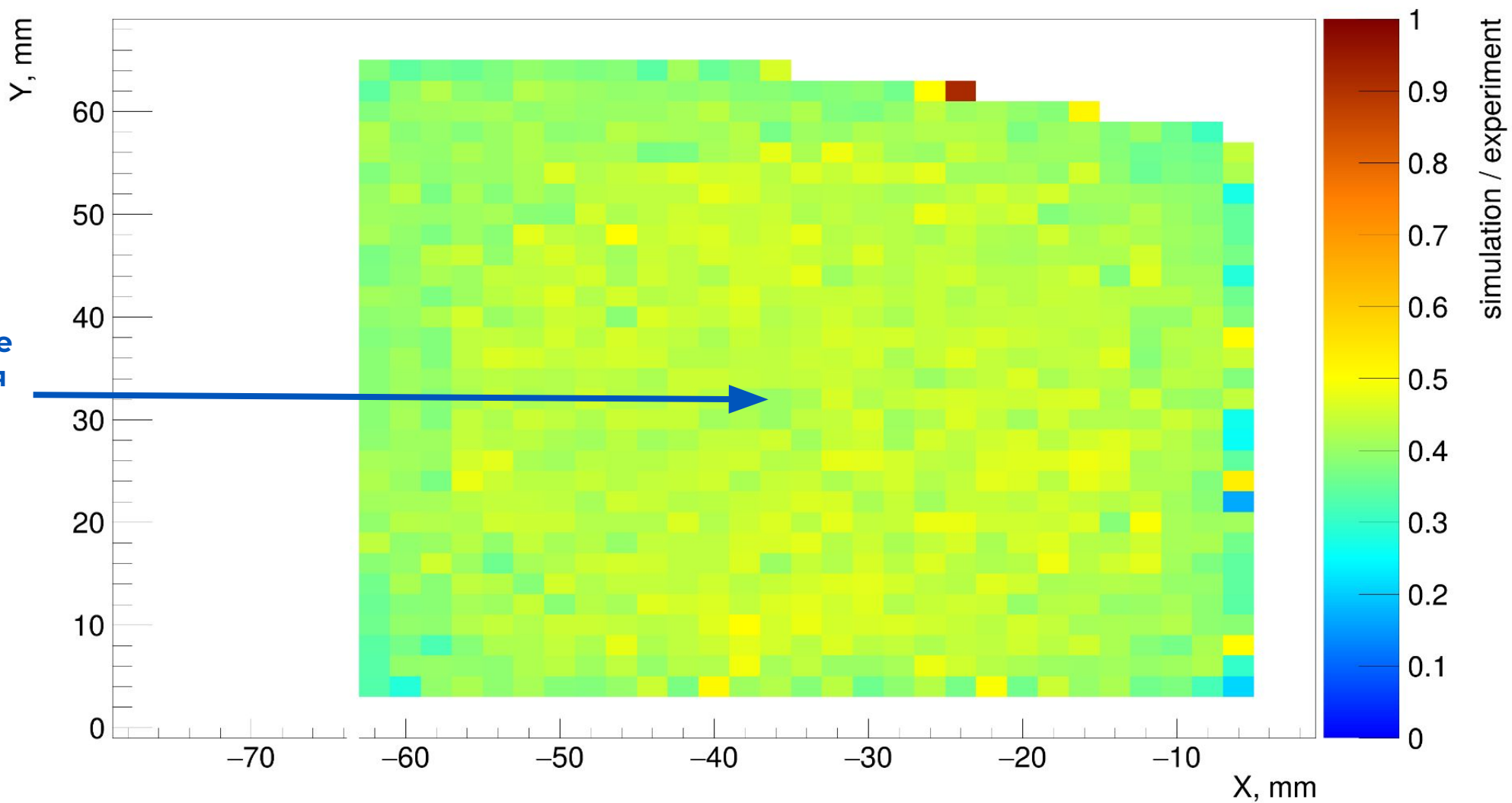


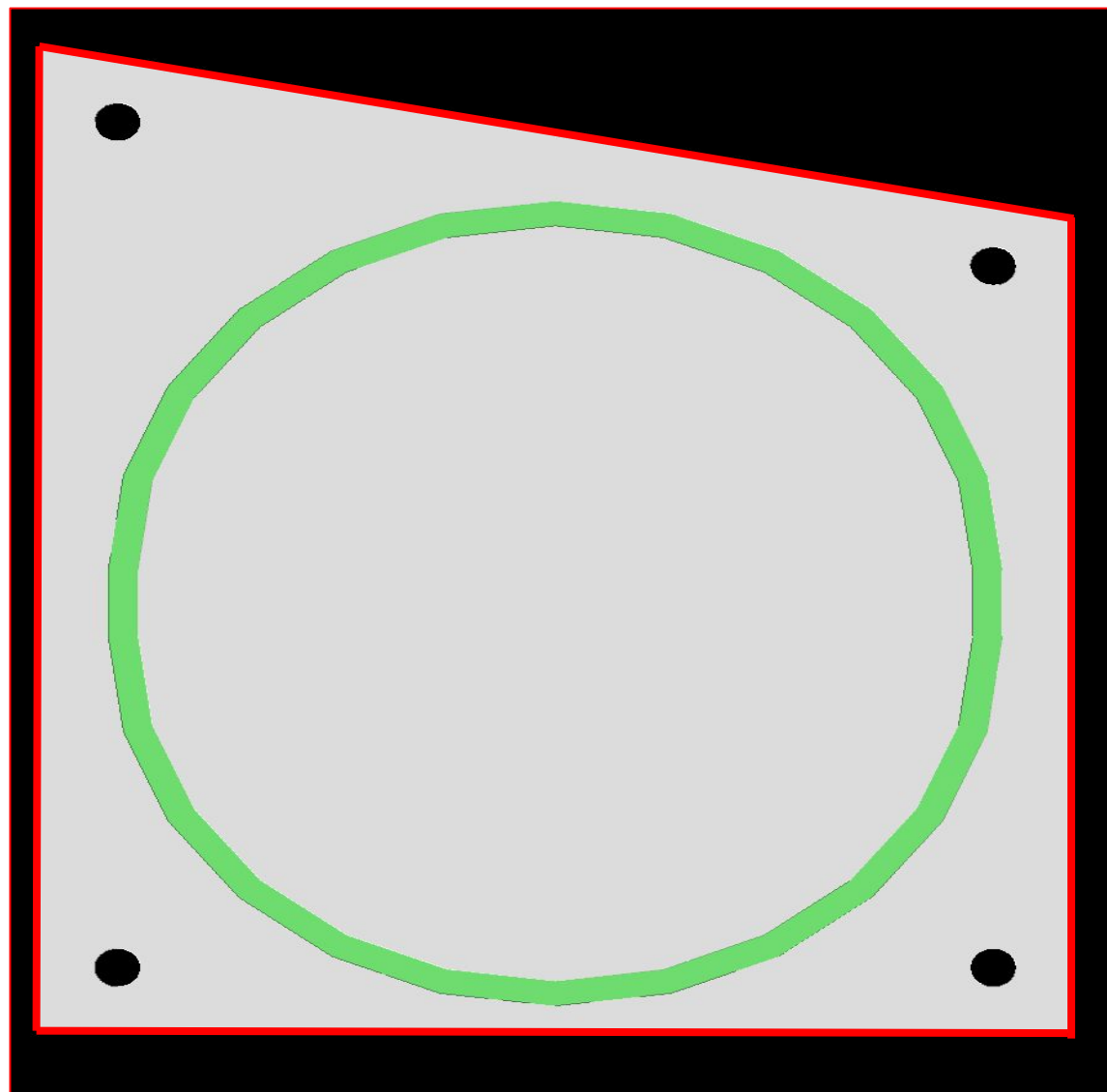


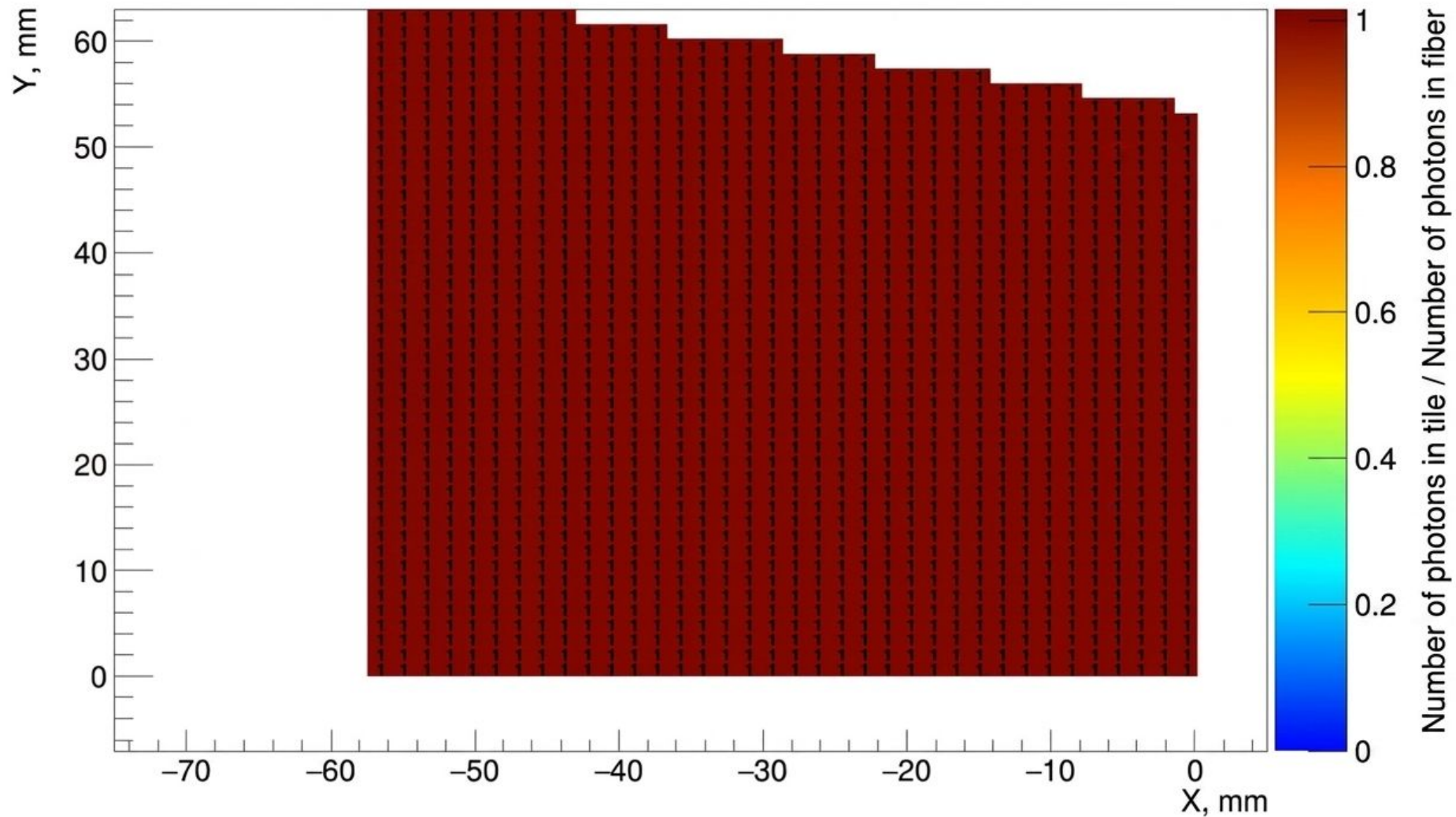
Схема модели с зеркальными стенками

-  полное отражение
-  полное пропускание

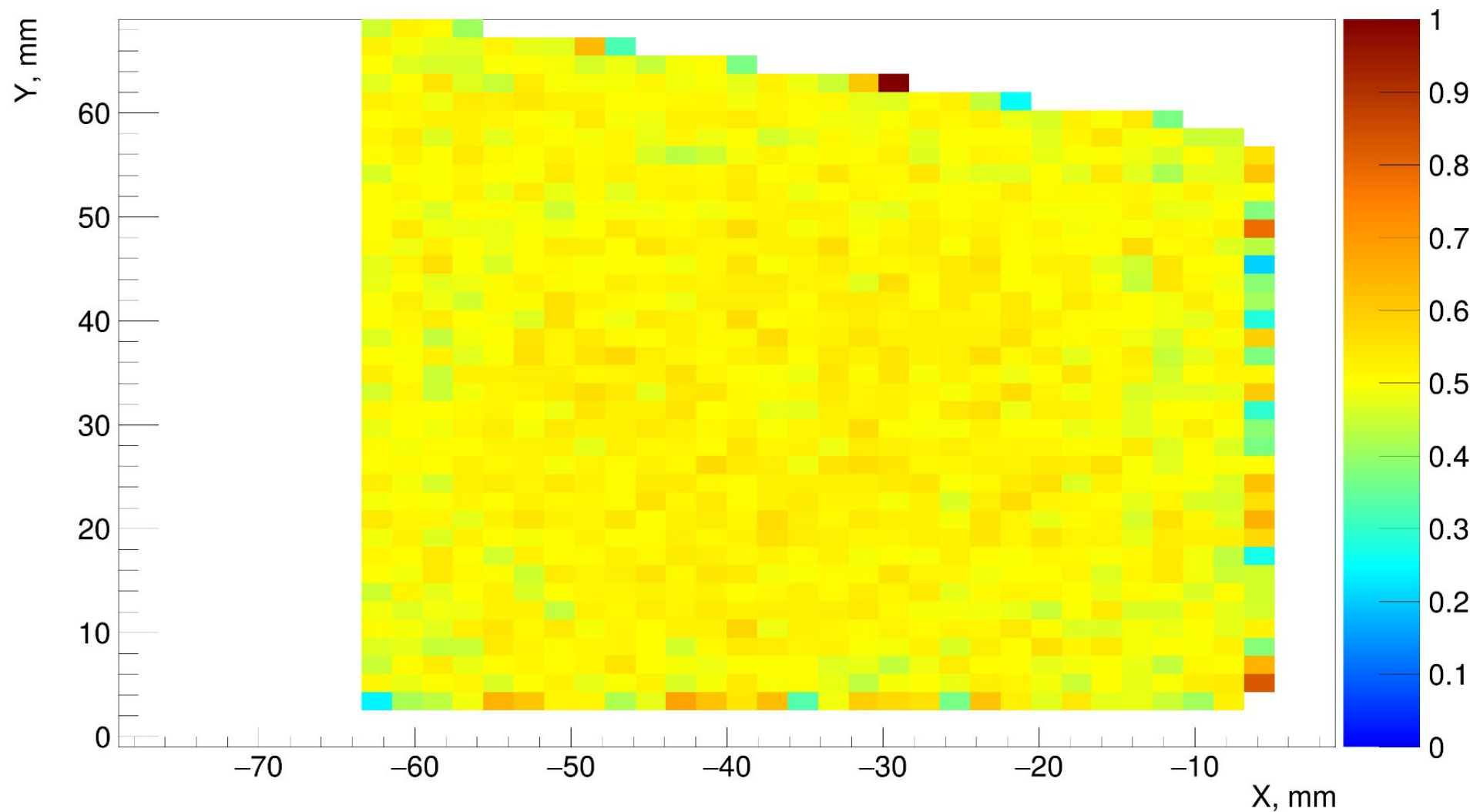


Проверка светосбора

Number of photons in tile / Number of photons in fiber



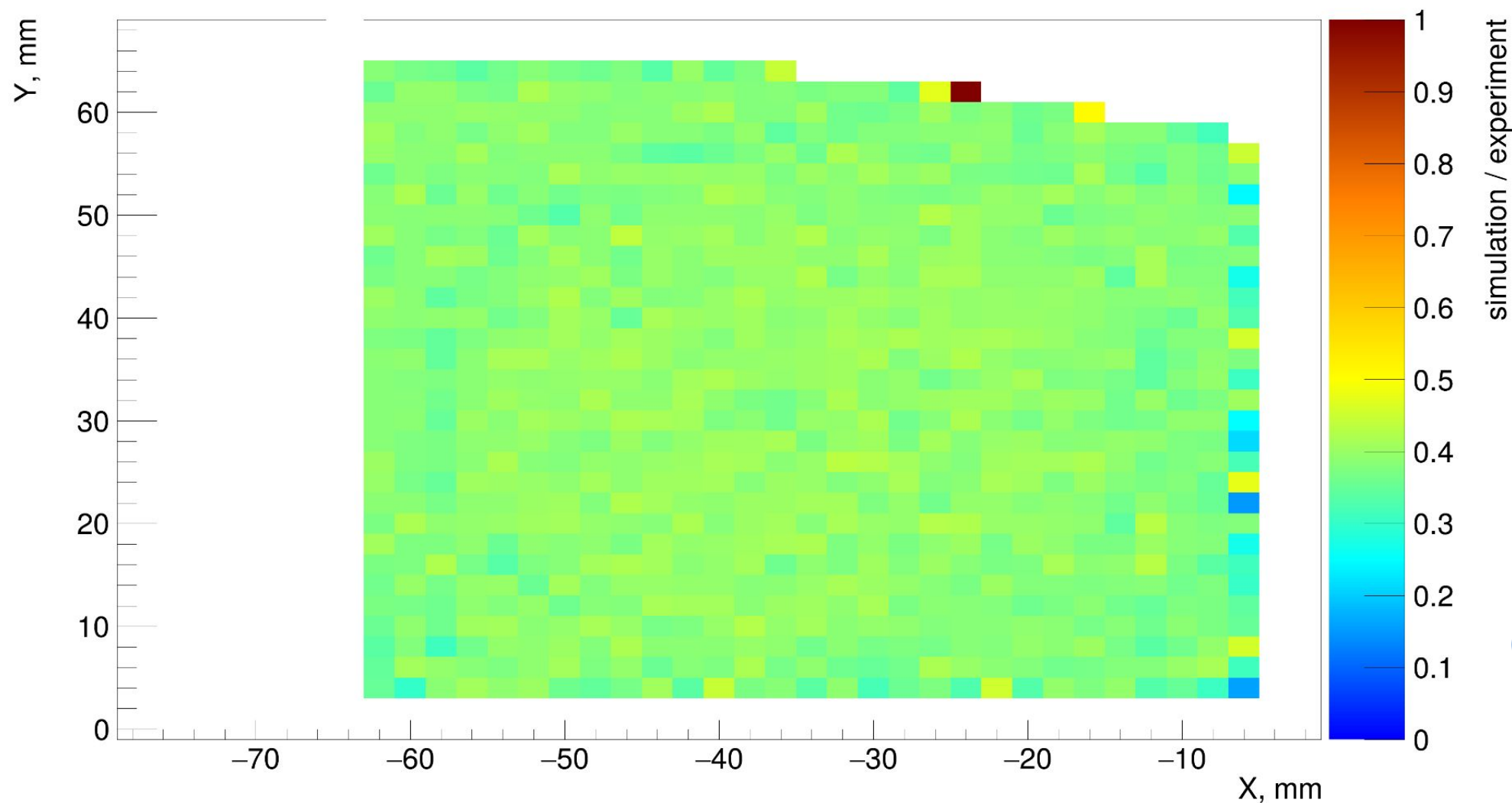
Registered photons



Normalized number of photons
Однородный отклик по
всей поверхности
(исключая граничные
эффекты)

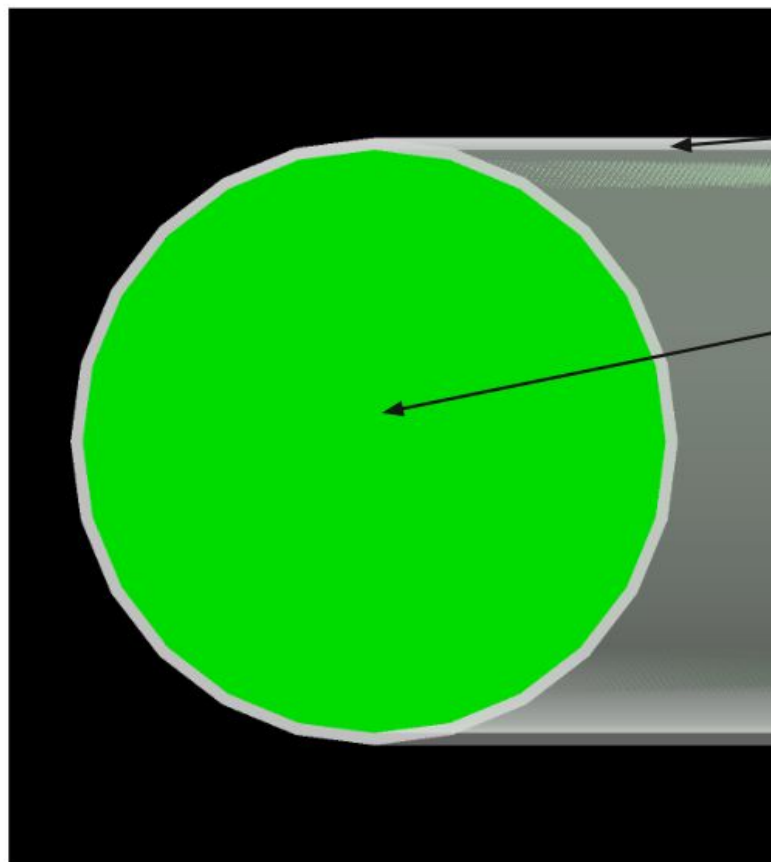
Сравнение эксперимента и модели

simulation / experiment

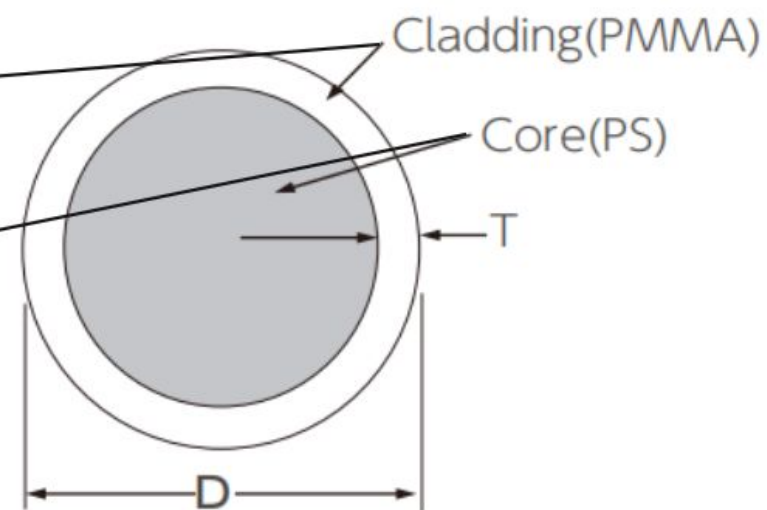


Отношение отклика модели и реального тайла равномерно по всей поверхности сцинтиллятора (исключая граничные эффекты)

Geant4 Модель



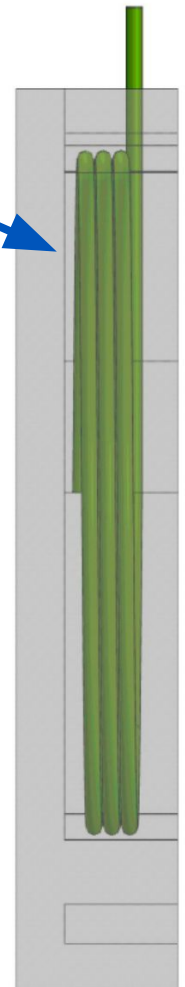
Структура из спецификации



Cladding Thickness¹⁾: $T=2\%$ of D
Numerical Aperture: $NA=0.55$
Trapping Efficiency : 3.1%

Недостатки прямого моделирования

- 1) Оптическое волокно укладывается в канавку в тайле тремя витками. «Пружинная» структура данной укладки не имеет отражения в стандартных примитивах Geant4.
- 2) CADMesh использует формат .stl. Для описания трёхмерных объектов этот формат использует тесселяцию (разбиение сложной поверхности на множество мелких, простых геометрических фигур - обычно треугольников). Точность такого отображения объекта ограничена качеством его разбиения, что вызывает линейные и угловые отклонения от истинной геометрии.
- 3) Помимо отклонений от истинной геометрии из-за тесселяции возникают неточности в описании распространения фотонов по волокну, из-за чего становится невозможным учесть потери на изгибах, которые для самых близких к центру колеса тайлов составляют примерно 10%.

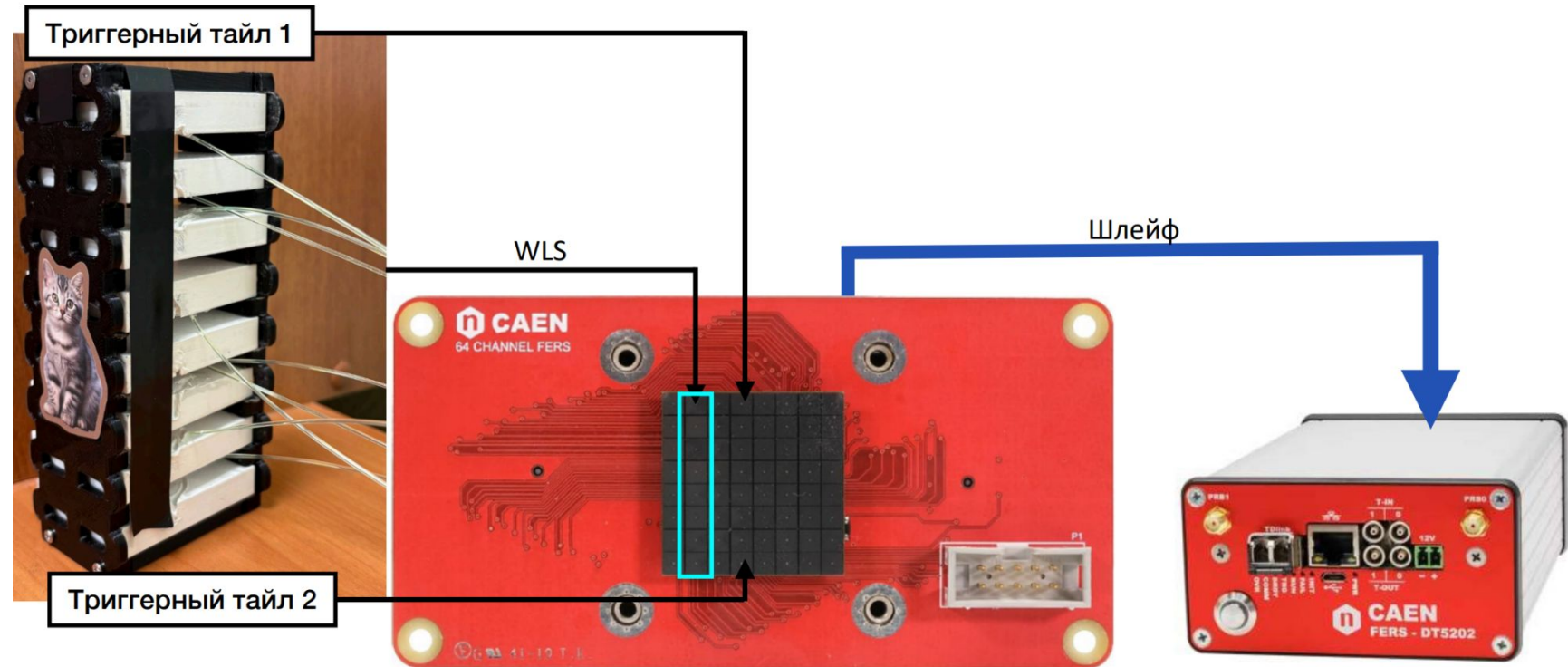


Этапы параметризации оптоволоконна

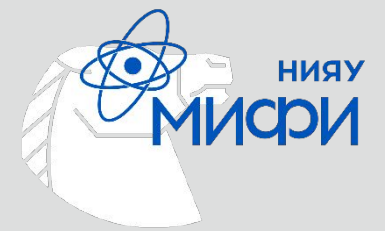
- 1) Моделирование собирания рождённых от сцинтилляционной вспышки фотонов (выполняется непосредственно с помощью Geant4);
- 2) Оценка количества захваченных фотонов на основе спектра поглощения оптоволоконна и параметра эффективности захвата;
- 3) Разыгрывание с помощью функции распределения эмиссионного спектра волокна;
- 4) Учёт потерь на длине волокна и изгибах;
- 5) Учёт потерь при переходе фотонов из оптоволоконна в воздух (потери на отражение Френеля);
- 6) Оценка количества фотоэлектронов на основе PDE SiPM.

Конфигурация экспериментальной установки

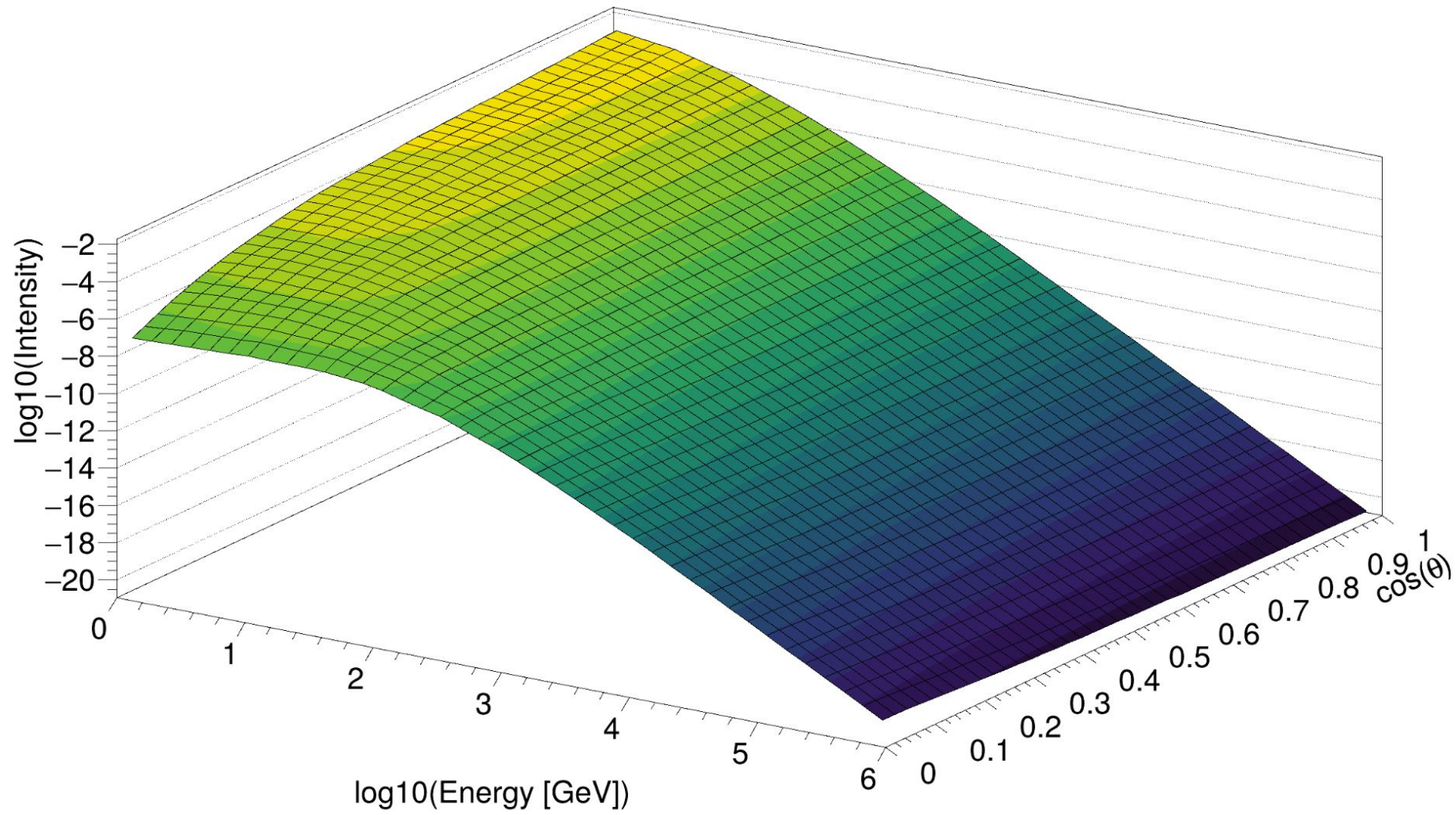
Телескоп состоит из восьми тайлов пятого ряда. Сбор света с рабочего вещества детектора происходит с помощью волокна SG VCF-92.



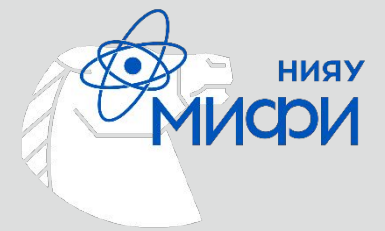
Распределение мюонов по энергии и зенитному углу



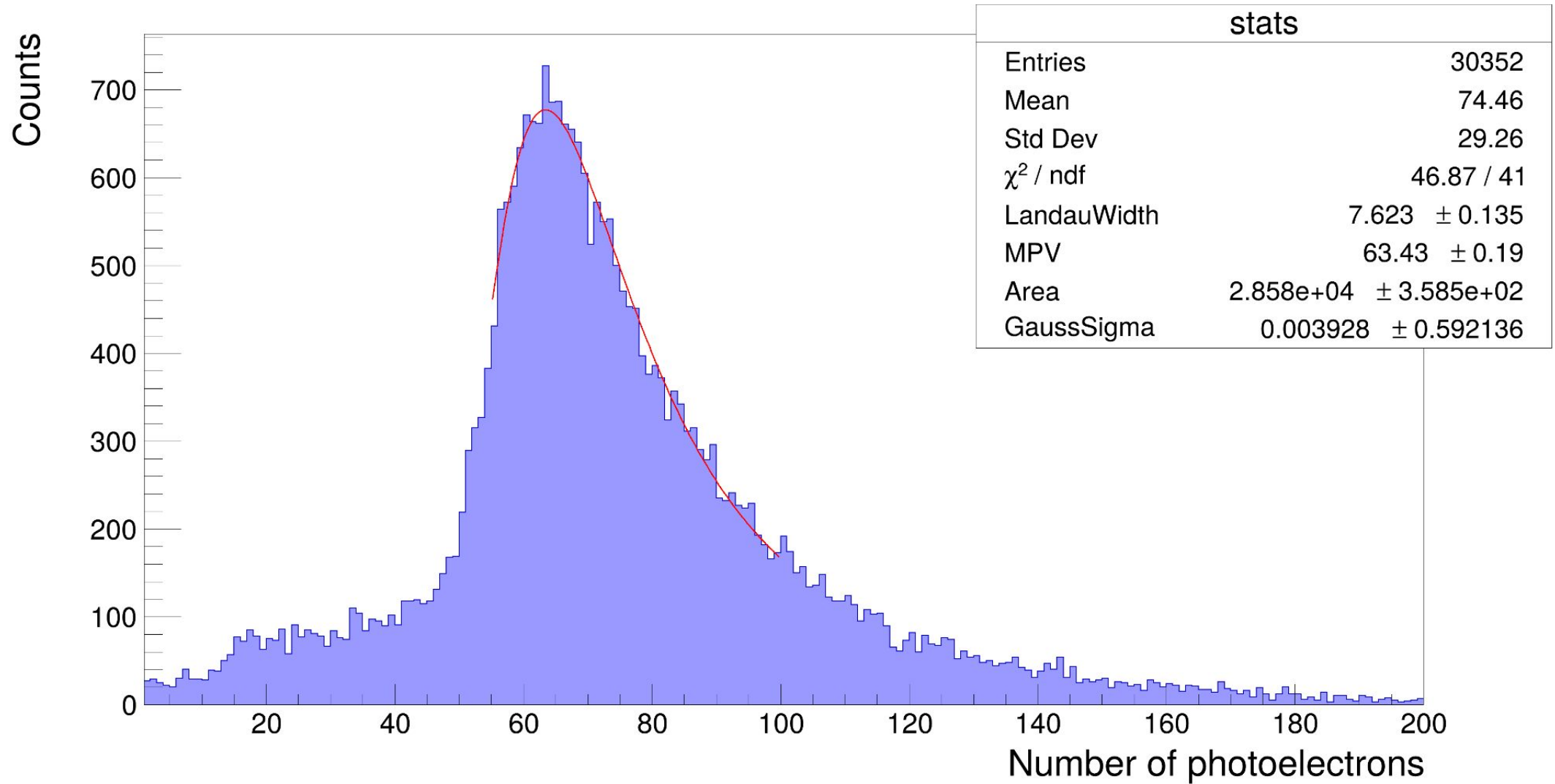
Muon Intensity (Lipari, 1993)



Спектр фотоэлектронов: данные модели



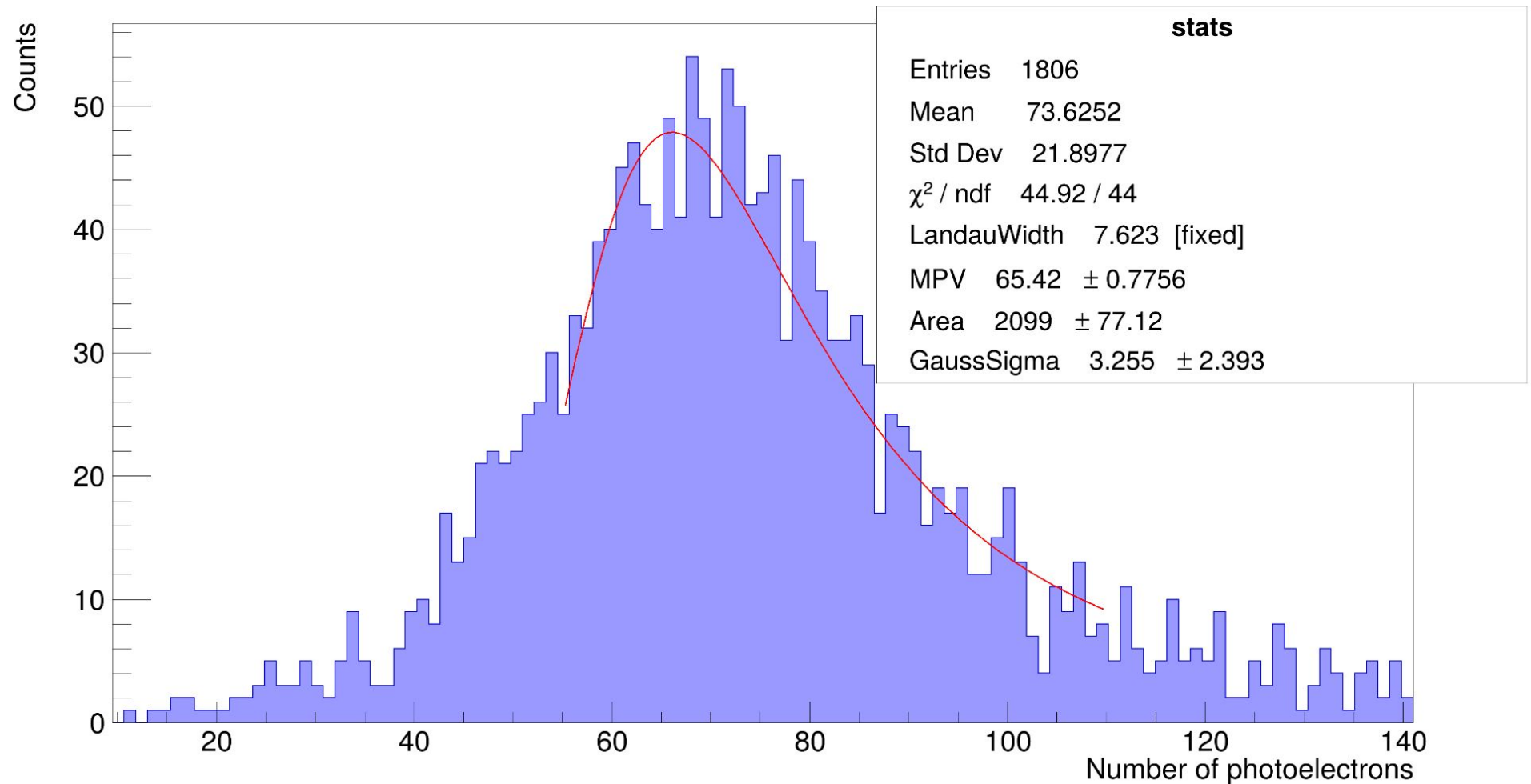
Photoelectrons spectrum (simulation)



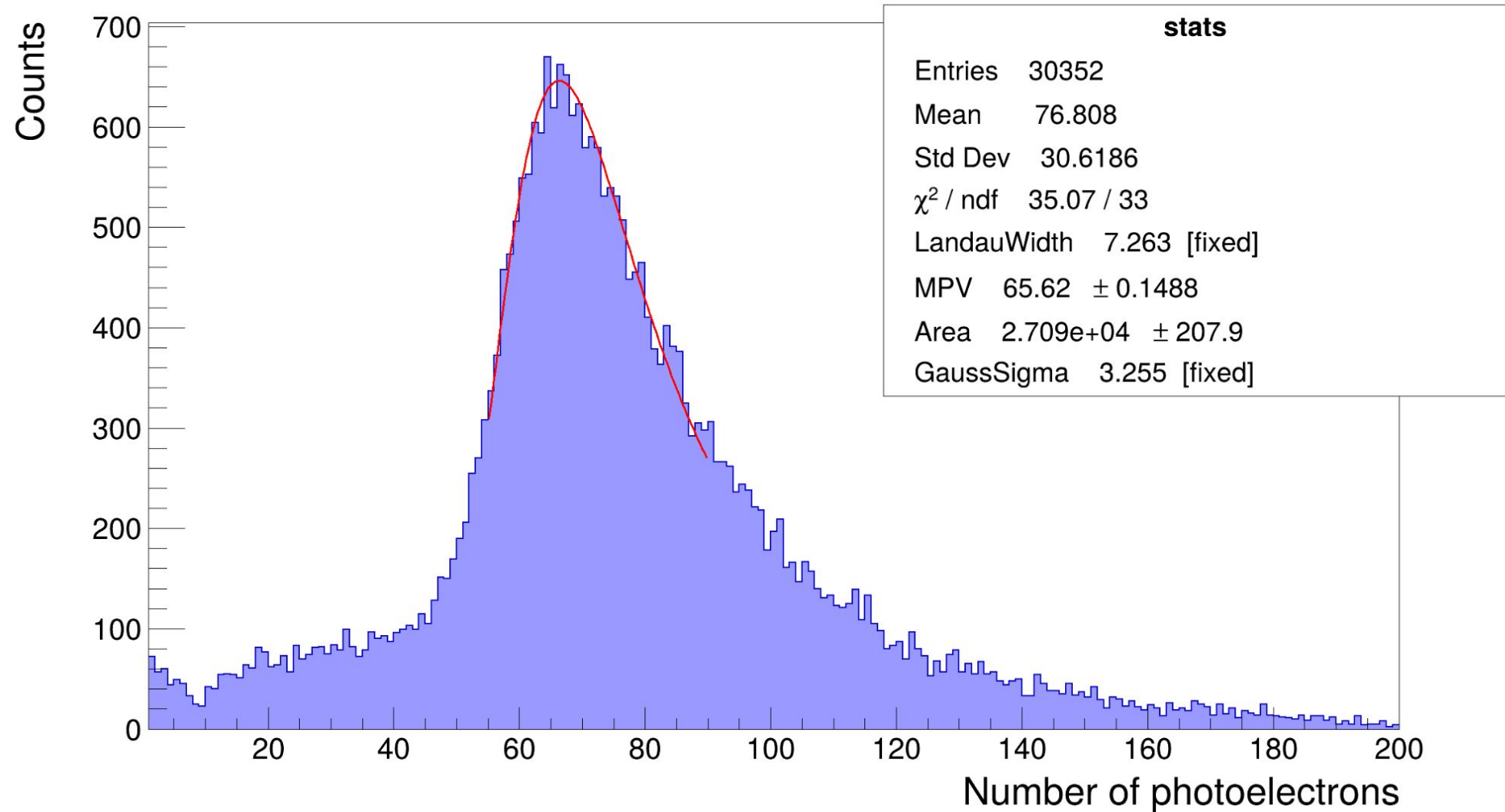
Спектр фотоэлектронов: данные эксперимента



Photoelectrons spectrum (experiment)



Photoelectrons spectrum (simulation)



Результатами работы являются:

- 1) Геометрическая модель детектора ВВС «нулевой» фазы;
- 2) Настройки материалов и поверхностей детектора, позволяющие получать достаточную степень согласия симуляции и эксперимента;
- 3) Разработанный метод параметризации оптоволоконна на основе экспериментальных данных;
- 4) На основе полученной параметризации рассчитано значение параметра ширины распределения Ландау свёртки распределений Ландау и Гаусса для взаимодействия космических мюонов со сцинтилляционной пластиной: (7.62 ± 0.14) фотоэлектронов.



Спасибо за внимание

08.06.2026

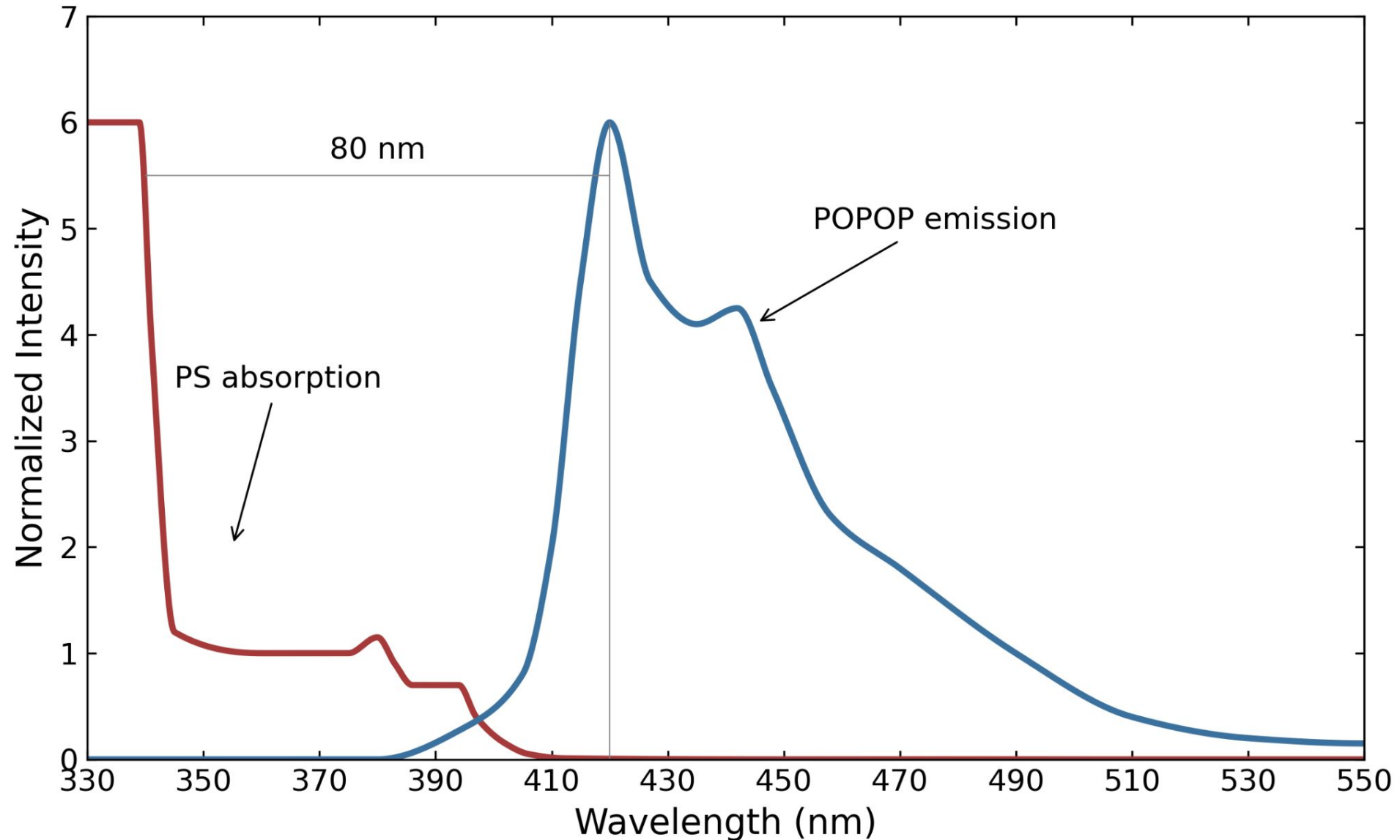
Параметры материала сцинтиллятора

Название параметра в Geant4	Описание	Значение
DENSITY	Плотность вещества	$1.05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
RINDEX	Показатель преломления	1.64
SCINTILLATIONYIELD	Световыход	$12000 \frac{1}{\text{МэВ}}$
SCINTILLATIONYIELD1	Доля быстрой компоненты в световыходе	1.0
SCINTILLATION-TIMECONSTANT1	Время высвечивания быстрой компоненты сцинтилляционной вспышки	2.4 нс
SCINTILLATION-COMPONENT1	Спектр излучения быстрой компоненты	Задан двумя массивами (энергия фотонов - интенсивность)
ABSLENGTH	Спектр поглощения	Задан двумя массивами
RESOLUTIONSCALE	Размытие разрешения	1.0

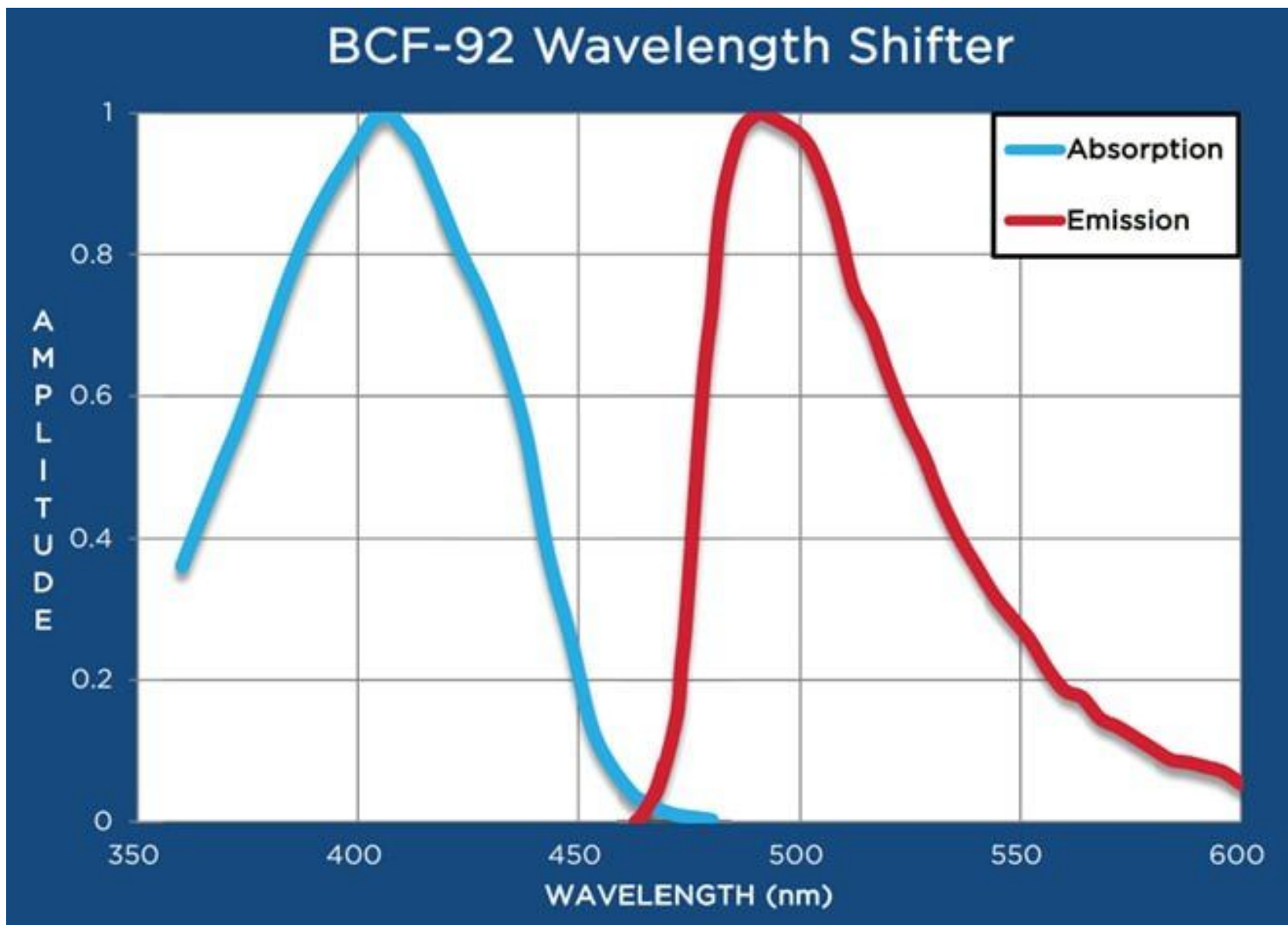
Scintillation mixture:

- polystyrene Styrolution 124N – 98.0-98.5%
- p-Terphenyl (CAS 92-94-4) – 1.5-2.0%
- POPOP (CAS 1806-34-4) – 0.01-0.04%

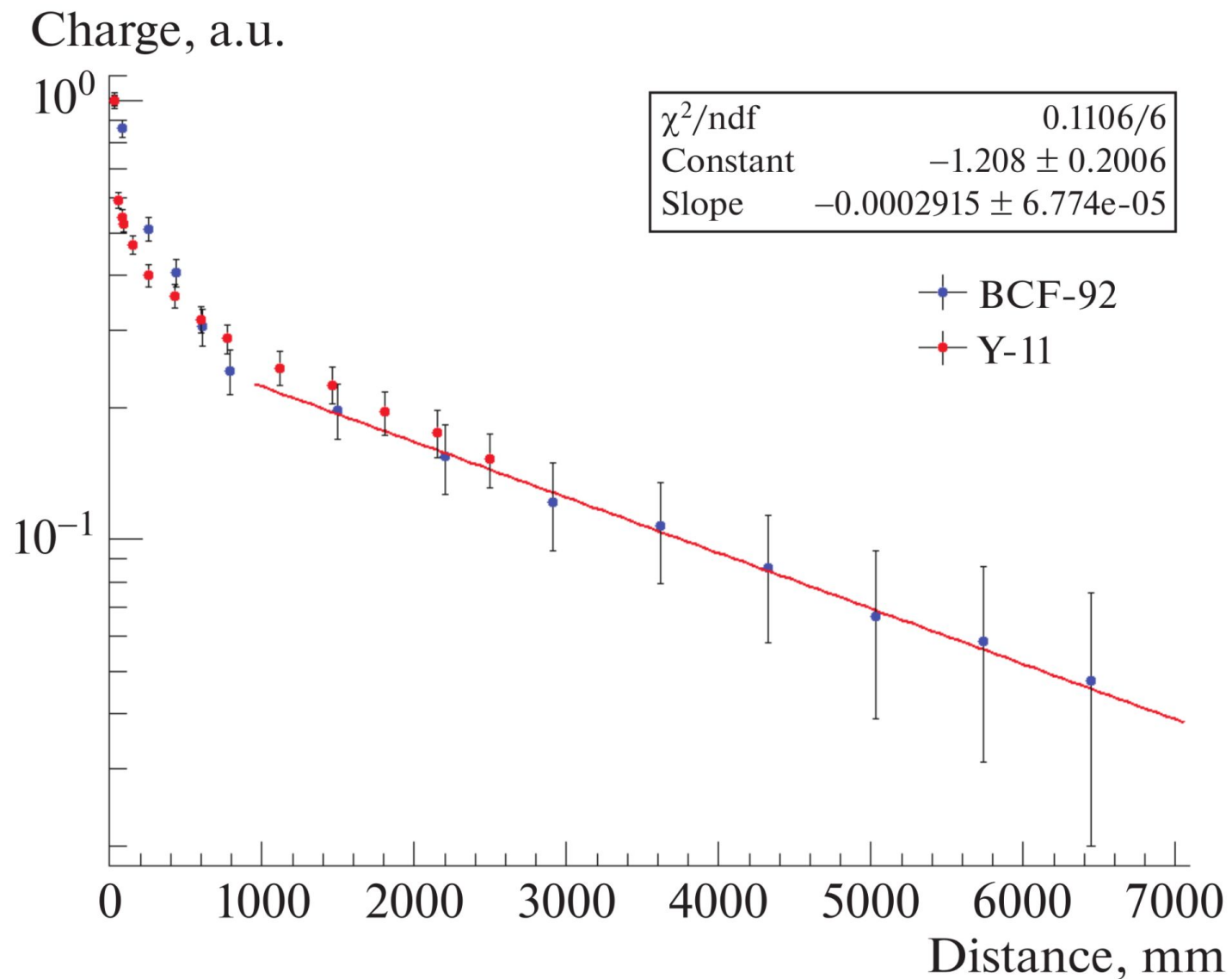
Спектр излучения и поглощения сцинтиллятора



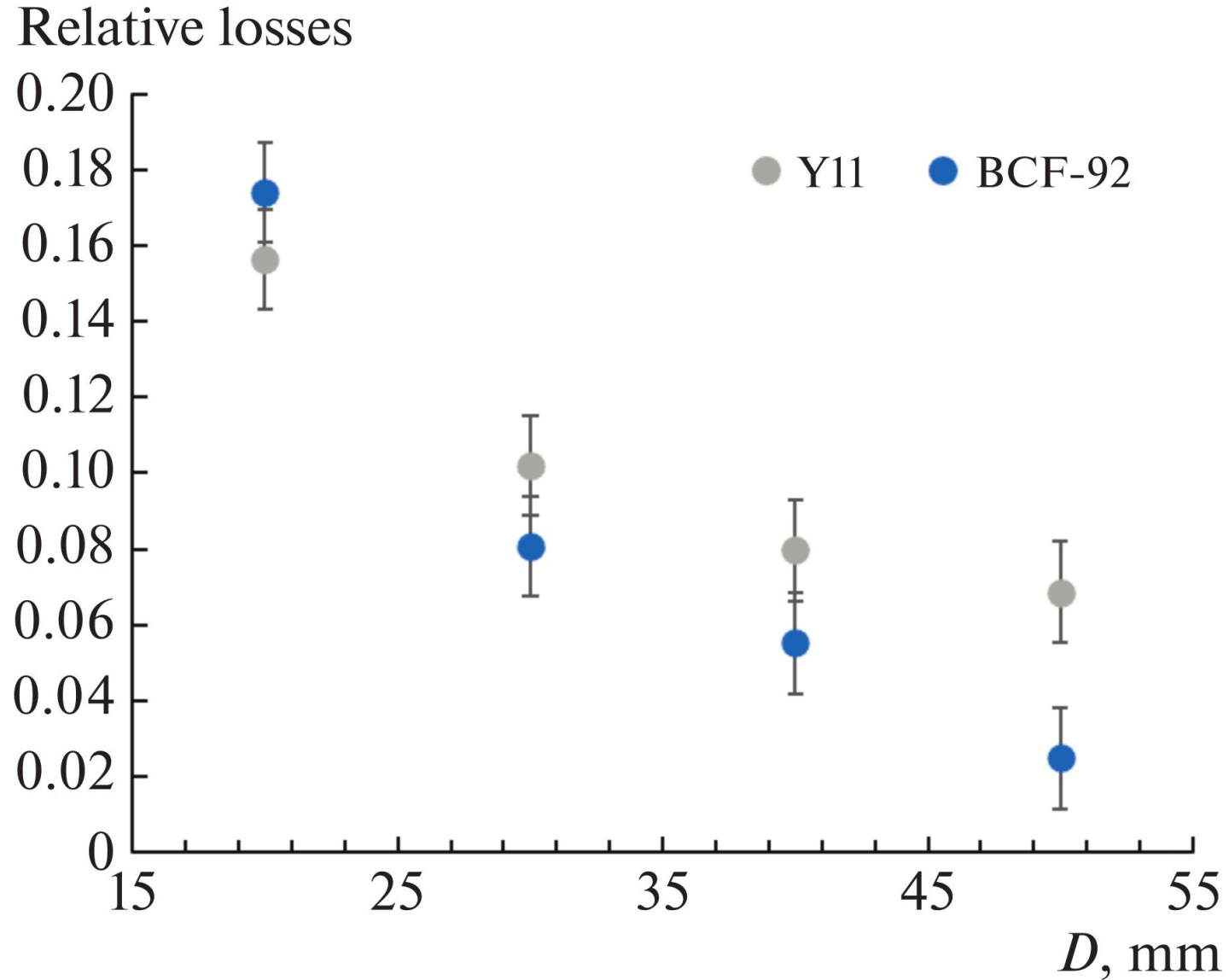
Спектр излучения и поглощения оптоволокна

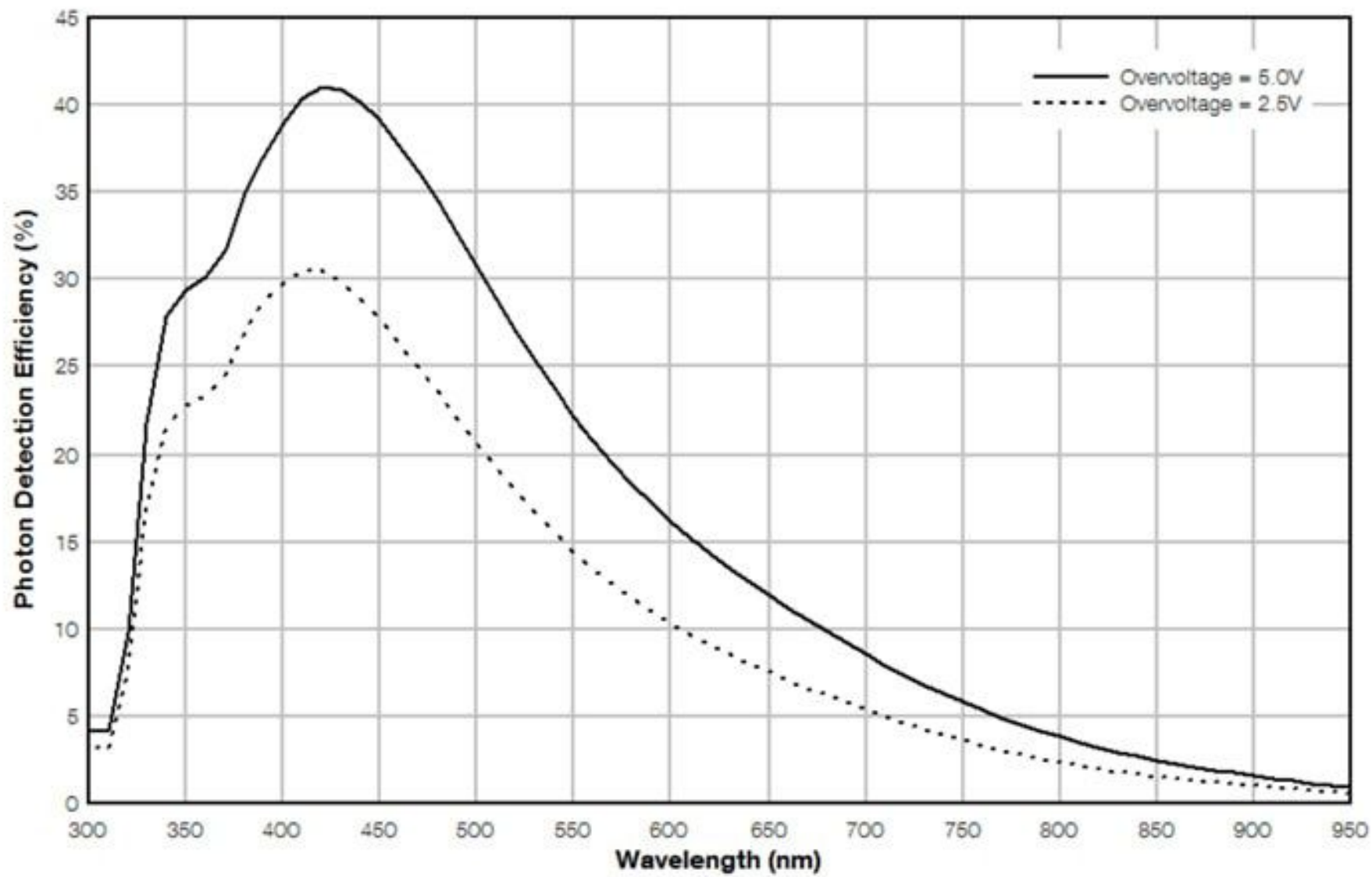


Светопотери на длине оптоволокна

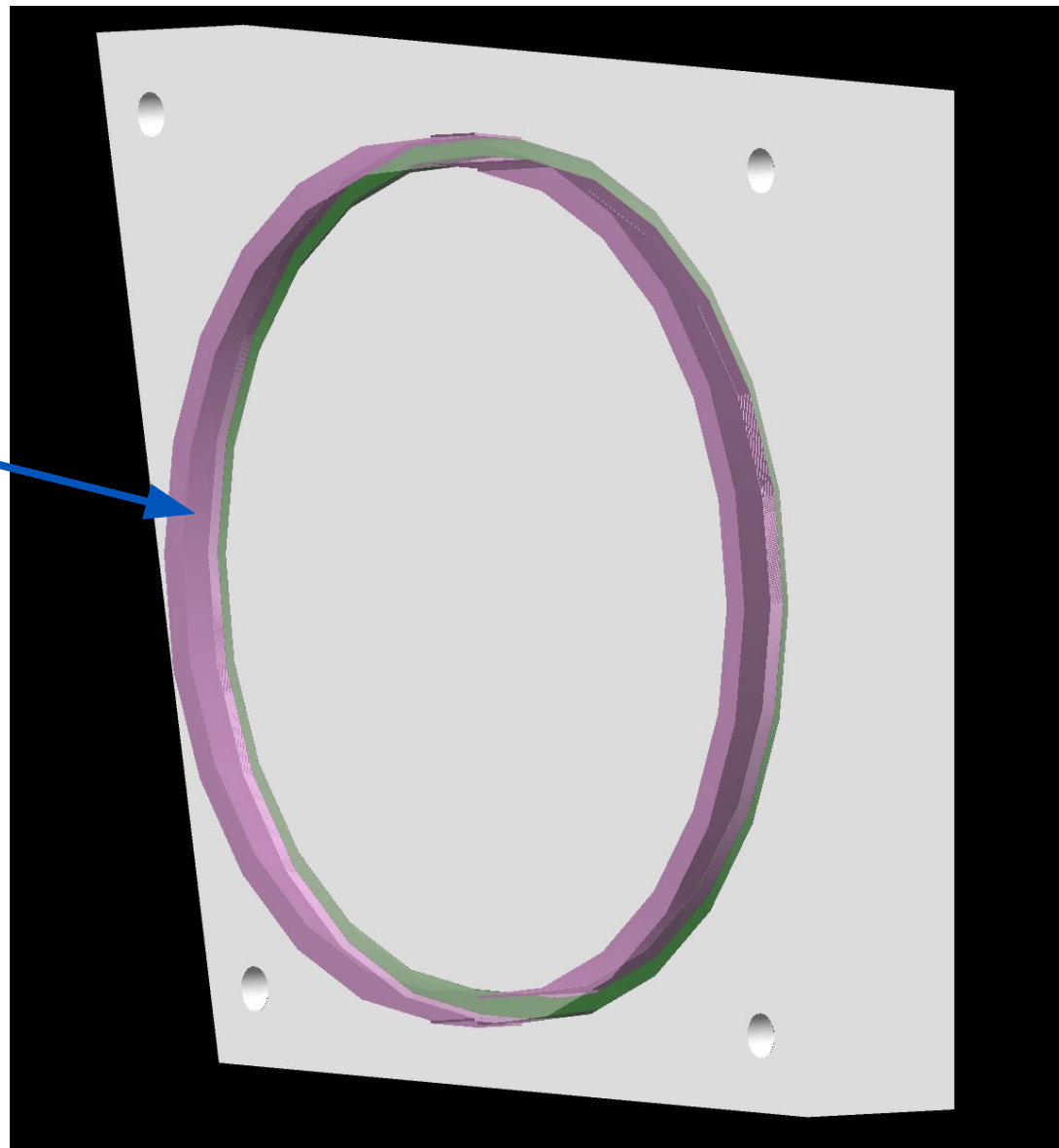


Светопотери на изгибах оптоволокна

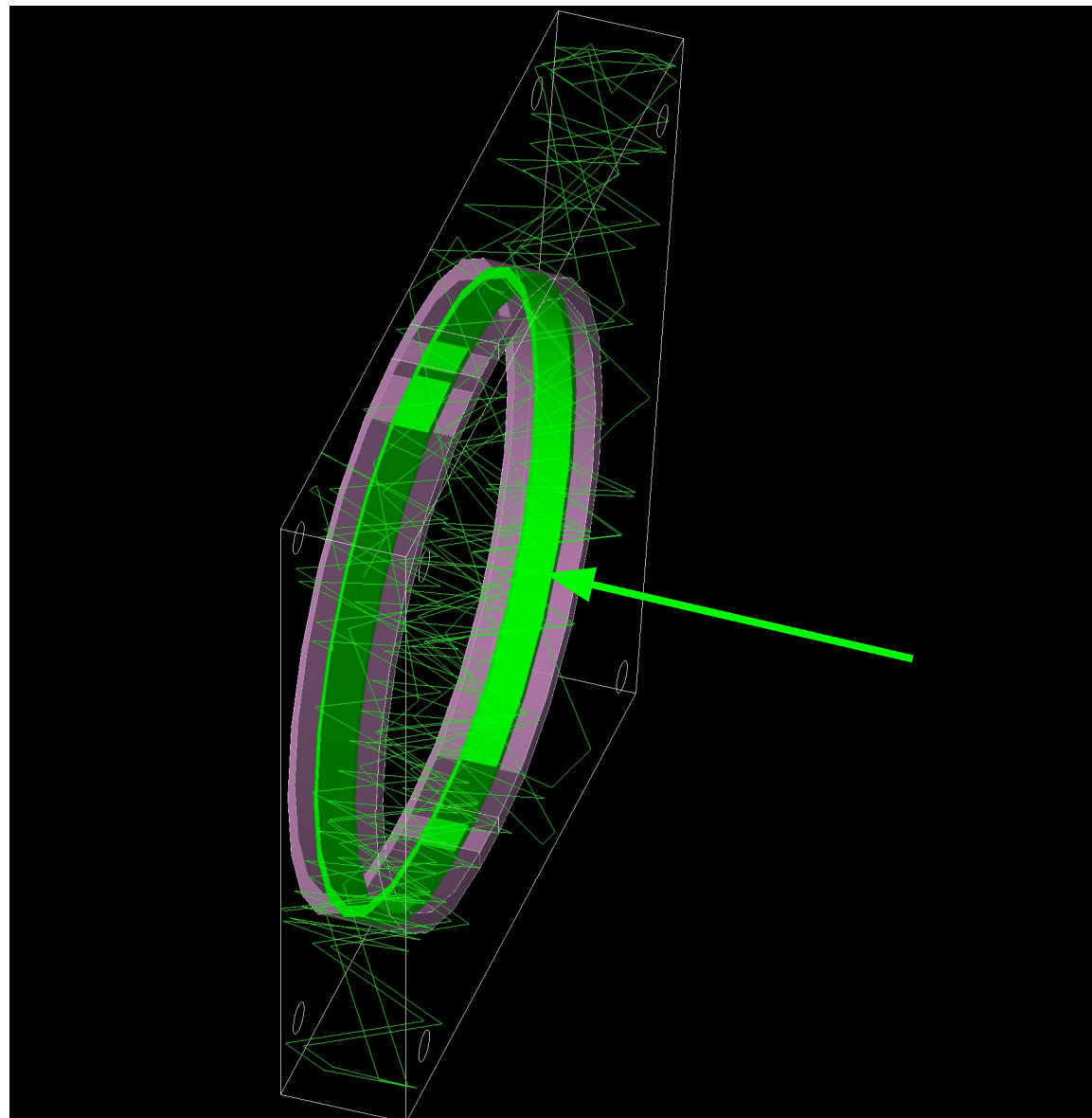




Канавка заполнена
материалом, оптические
параметры которого
идентичны сцинтиллятору,
однако отключено
высвечивание

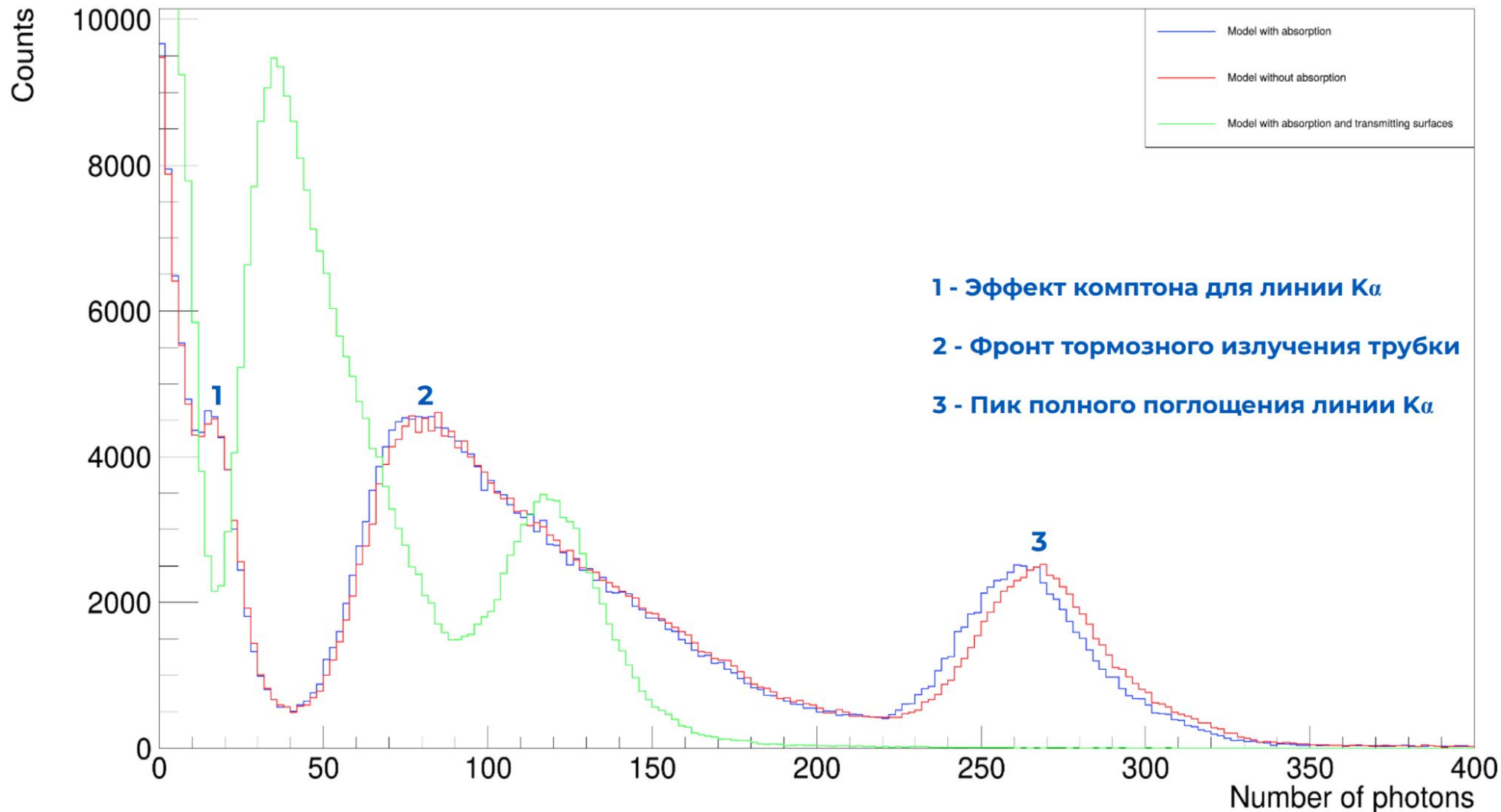


Пример работы модели



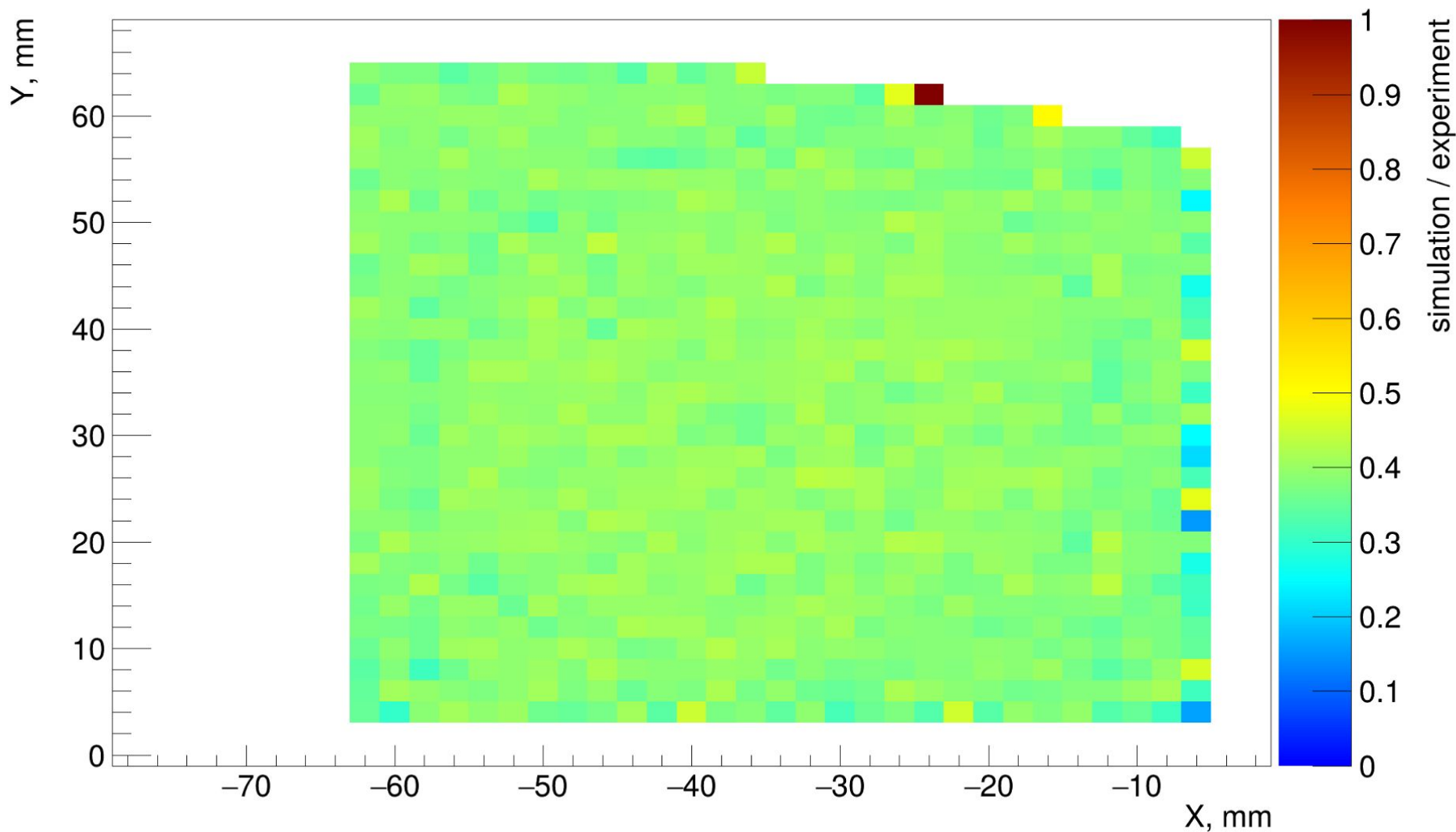
Сравнение трёх конфигураций модели

Number of registered photons

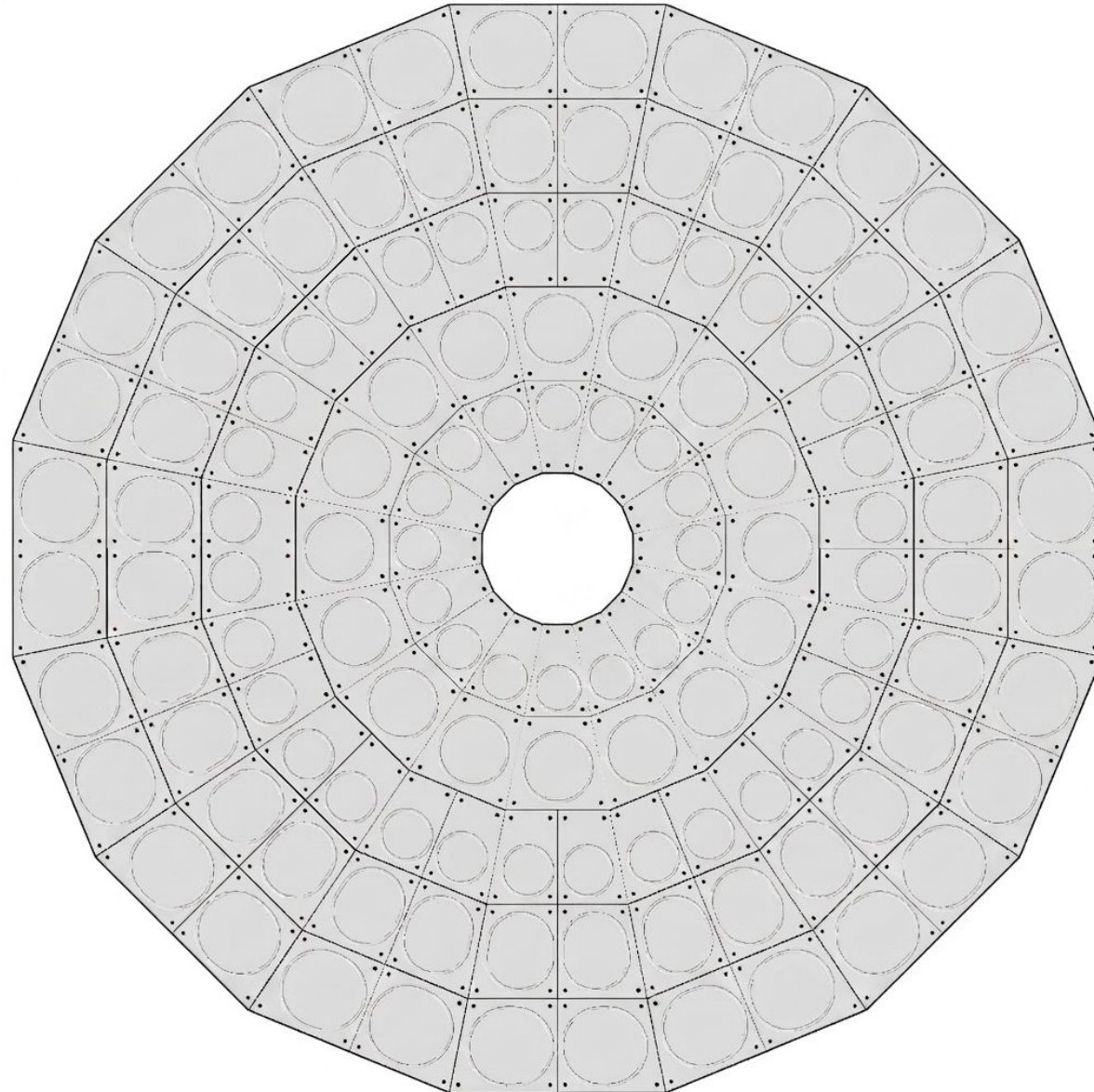


Сравнение данных эксперимента и модели при настроенном поглощении сцинтиллятора

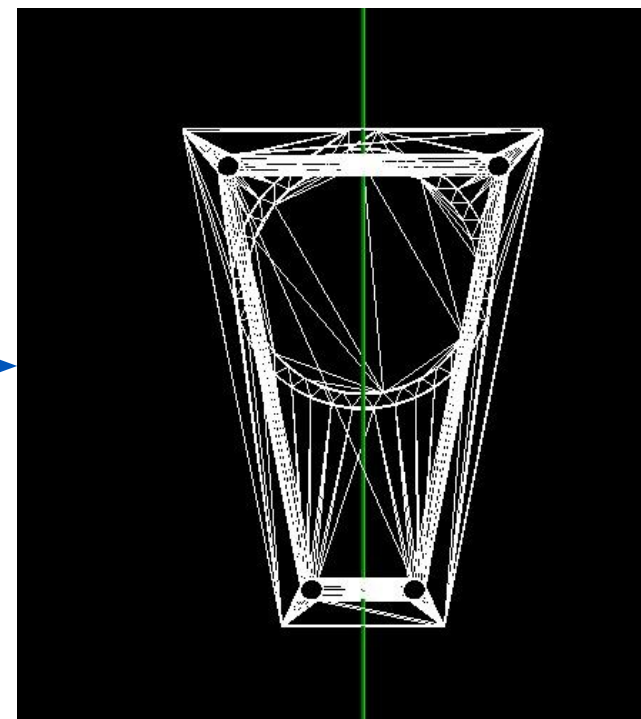
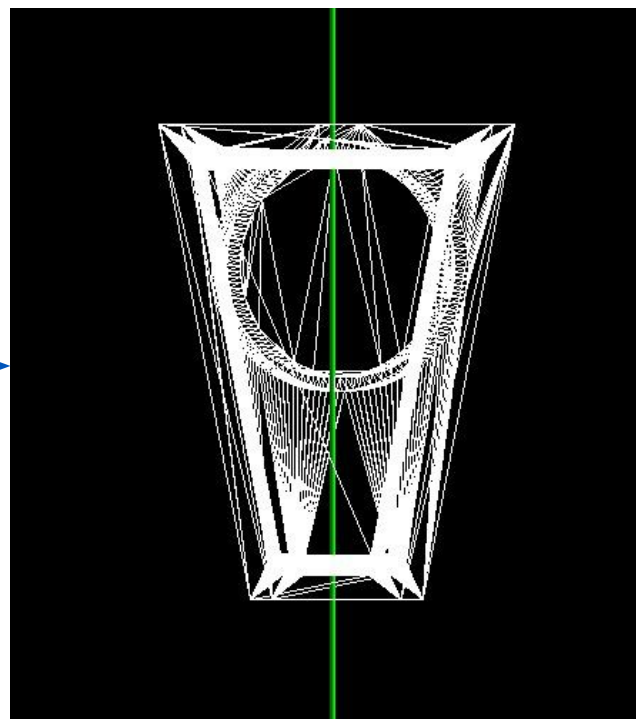
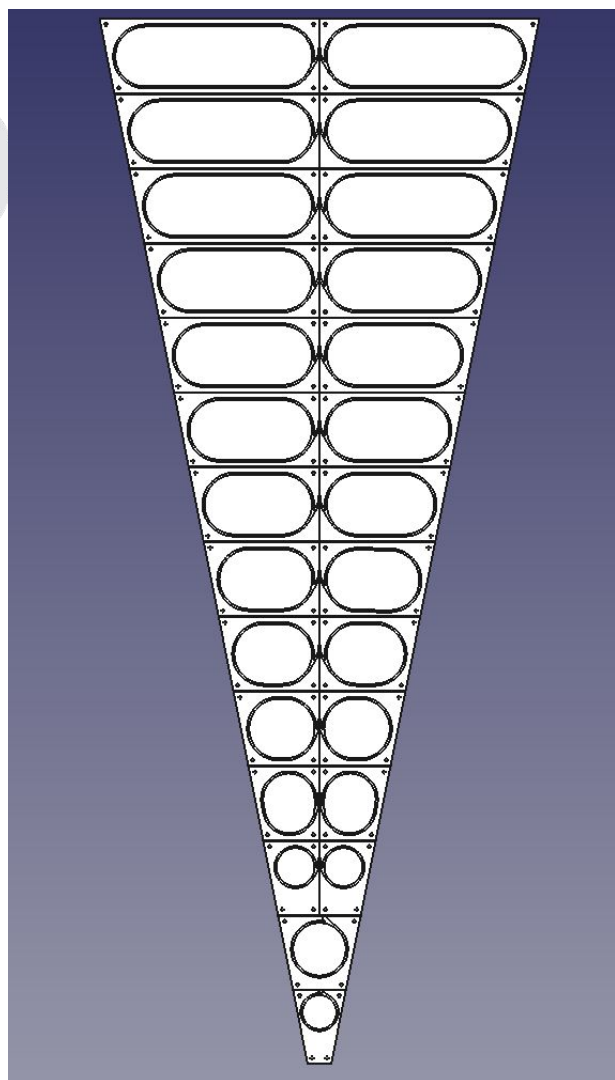
simulation / experiment



Geant4 модель детектора ВВС: «нулевая» фаза

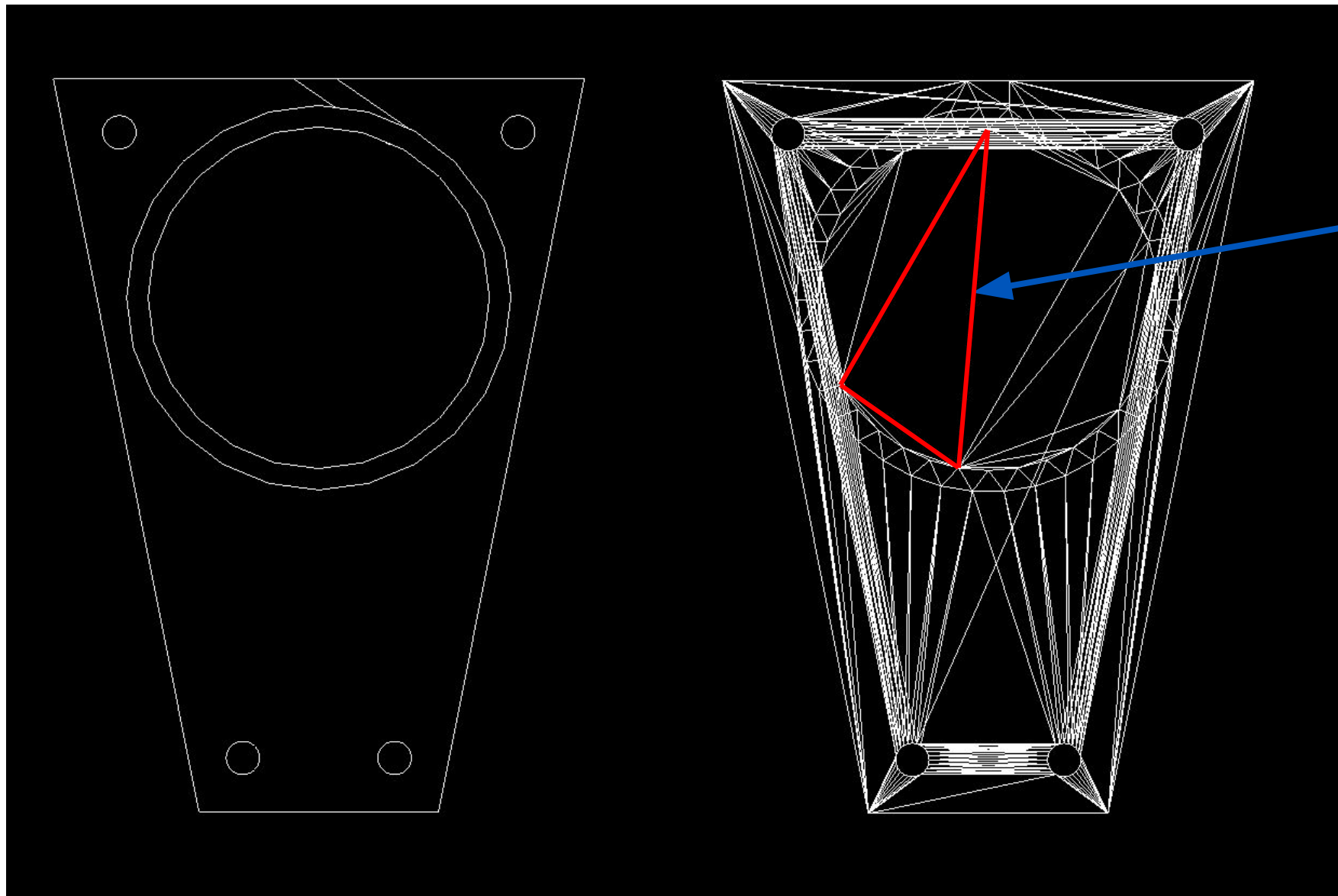


Пакет CADMesh



Сравнение моделей тайлов: Geant4 vs CAD

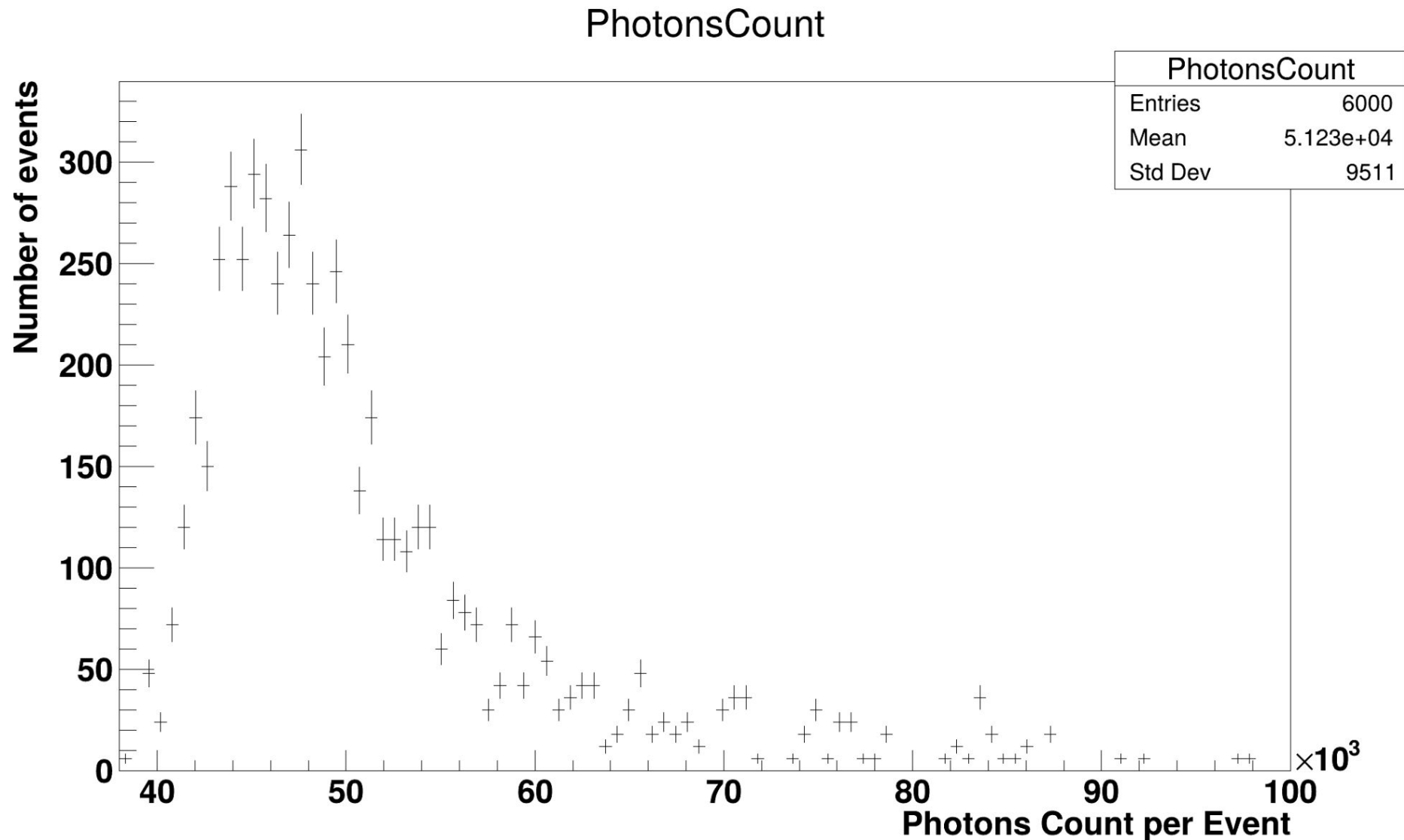
Примитивы
Geant4



тесселяция

CAD

Сравнение моделей: количество фотонов Geant4 примитивы, протоны с $T = 300$ МэВ



Сравнение моделей: количество фотонов CADMesh, протоны с $T = 300$ МэВ

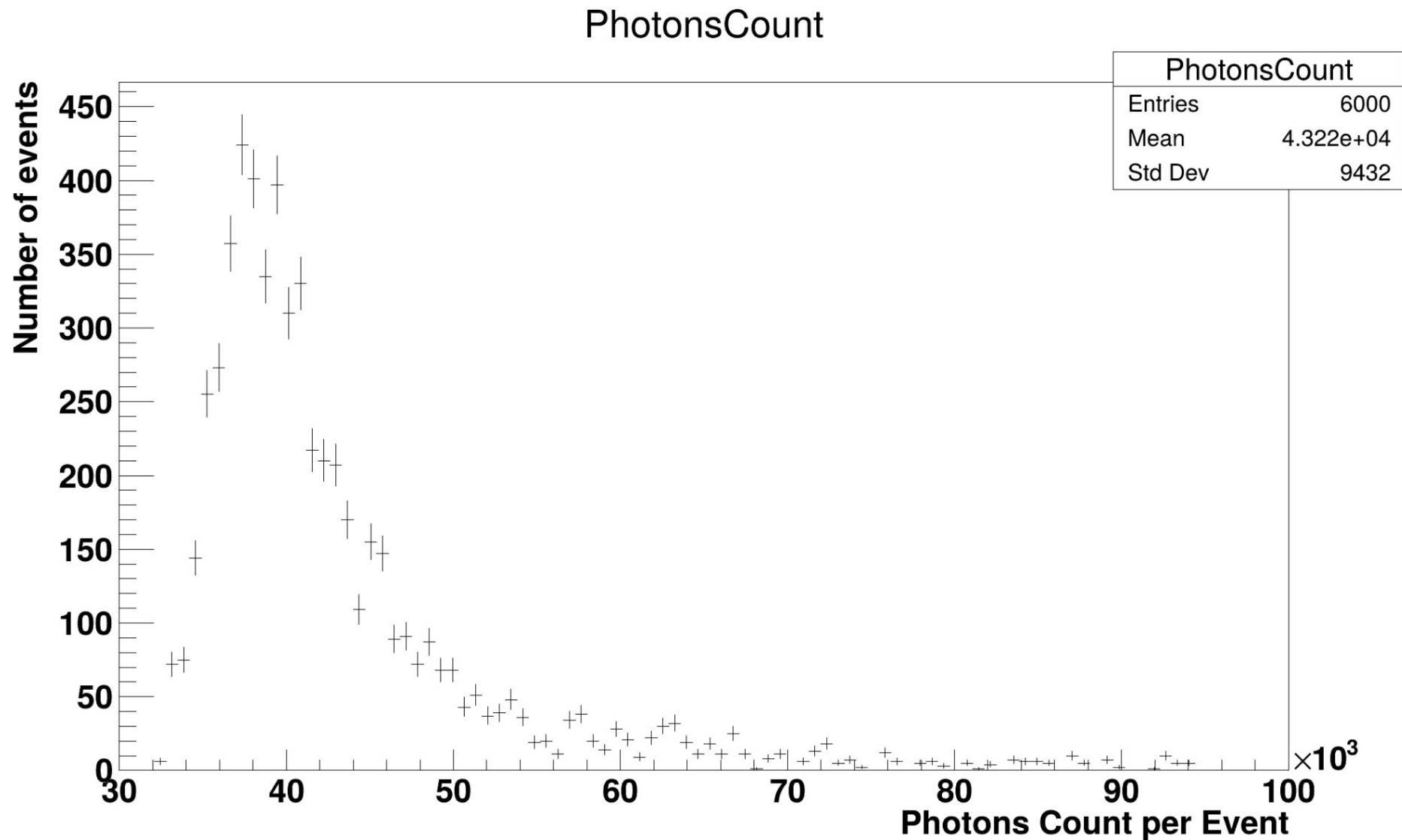


Таблица энергий и зенитных углов мюонов

Muon Energy GeV	Intensity [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV}^{-1}$]							
	$\cos\theta$							
	1	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.0
1.0	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$4.04 \cdot 10^{-4}$	$1.19 \cdot 10^{-4}$	$3.62 \cdot 10^{-5}$	$9.00 \cdot 10^{-6}$	$1.08 \cdot 10^{-6}$	$2.37 \cdot 10^{-7}$	$5.15 \cdot 10^{-8}$
3.16	$8.16 \cdot 10^{-4}$	$2.80 \cdot 10^{-4}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$4.42 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-5}$	$1.88 \cdot 10^{-6}$	$4.23 \cdot 10^{-7}$	$6.45 \cdot 10^{-8}$
10.0	$1.10 \cdot 10^{-4}$	$6.78 \cdot 10^{-5}$	$3.95 \cdot 10^{-5}$	$2.37 \cdot 10^{-5}$	$1.05 \cdot 10^{-5}$	$2.28 \cdot 10^{-6}$	$6.16 \cdot 10^{-7}$	$8.88 \cdot 10^{-8}$
31.6	$6.80 \cdot 10^{-6}$	$6.09 \cdot 10^{-6}$	$5.07 \cdot 10^{-6}$	$4.11 \cdot 10^{-6}$	$2.80 \cdot 10^{-6}$	$1.17 \cdot 10^{-6}$	$4.75 \cdot 10^{-7}$	$9.54 \cdot 10^{-8}$
100	$2.48 \cdot 10^{-7}$	$2.81 \cdot 10^{-7}$	$2.91 \cdot 10^{-7}$	$2.84 \cdot 10^{-7}$	$2.59 \cdot 10^{-7}$	$1.87 \cdot 10^{-7}$	$1.21 \cdot 10^{-7}$	$4.55 \cdot 10^{-8}$
316	$6.06 \cdot 10^{-9}$	$8.12 \cdot 10^{-9}$	$9.78 \cdot 10^{-9}$	$1.08 \cdot 10^{-8}$	$1.18 \cdot 10^{-8}$	$1.18 \cdot 10^{-8}$	$1.04 \cdot 10^{-8}$	$6.78 \cdot 10^{-9}$
1000	$1.14 \cdot 10^{-10}$	$1.69 \cdot 10^{-10}$	$2.24 \cdot 10^{-10}$	$2.67 \cdot 10^{-10}$	$3.28 \cdot 10^{-10}$	$4.02 \cdot 10^{-10}$	$4.19 \cdot 10^{-10}$	$3.69 \cdot 10^{-10}$
3160	$1.87 \cdot 10^{-12}$	$2.91 \cdot 10^{-12}$	$4.06 \cdot 10^{-12}$	$5.06 \cdot 10^{-12}$	$6.65 \cdot 10^{-12}$	$9.14 \cdot 10^{-12}$	$1.04 \cdot 10^{-11}$	$1.05 \cdot 10^{-11}$
$1.00 \cdot 10^4$	$2.81 \cdot 10^{-14}$	$4.50 \cdot 10^{-14}$	$6.47 \cdot 10^{-14}$	$8.26 \cdot 10^{-14}$	$1.13 \cdot 10^{-13}$	$1.64 \cdot 10^{-13}$	$1.95 \cdot 10^{-13}$	$2.07 \cdot 10^{-13}$
$3.16 \cdot 10^4$	$4.06 \cdot 10^{-16}$	$6.58 \cdot 10^{-16}$	$9.60 \cdot 10^{-16}$	$1.24 \cdot 10^{-15}$	$1.72 \cdot 10^{-15}$	$2.60 \cdot 10^{-15}$	$3.16 \cdot 10^{-15}$	$3.42 \cdot 10^{-15}$
$1.00 \cdot 10^5$	$5.78 \cdot 10^{-18}$	$9.41 \cdot 10^{-18}$	$1.38 \cdot 10^{-17}$	$1.79 \cdot 10^{-17}$	$2.51 \cdot 10^{-17}$	$3.85 \cdot 10^{-17}$	$4.72 \cdot 10^{-17}$	$5.16 \cdot 10^{-17}$
$3.16 \cdot 10^5$	$8.18 \cdot 10^{-20}$	$1.33 \cdot 10^{-19}$	$1.96 \cdot 10^{-19}$	$2.55 \cdot 10^{-19}$	$3.59 \cdot 10^{-19}$	$5.53 \cdot 10^{-19}$	$6.81 \cdot 10^{-19}$	$7.47 \cdot 10^{-19}$
$1.00 \cdot 10^6$	$1.16 \cdot 10^{-21}$	$1.89 \cdot 10^{-21}$	$2.78 \cdot 10^{-21}$	$3.61 \cdot 10^{-21}$	$5.08 \cdot 10^{-21}$	$7.86 \cdot 10^{-21}$	$9.68 \cdot 10^{-21}$	$1.06 \cdot 10^{-20}$

Table 3.27: Muon Intensity, $\mu^+ + \mu^-$, at sea level.
(Lipari, 1993)

Распределение частиц по псевдобыстроте в ВВС

