



# Разработка и исследование мюонного детектора на коллайдере СЕРС: сборка тестовых стендов для проверки сцинтилляционных стрипов и фотодетекторов SiPM

Аспирант: Гиня Э.

Научный руководитель: Наумов П.Ю.

Организация: ОИЯИ

Год: 2026

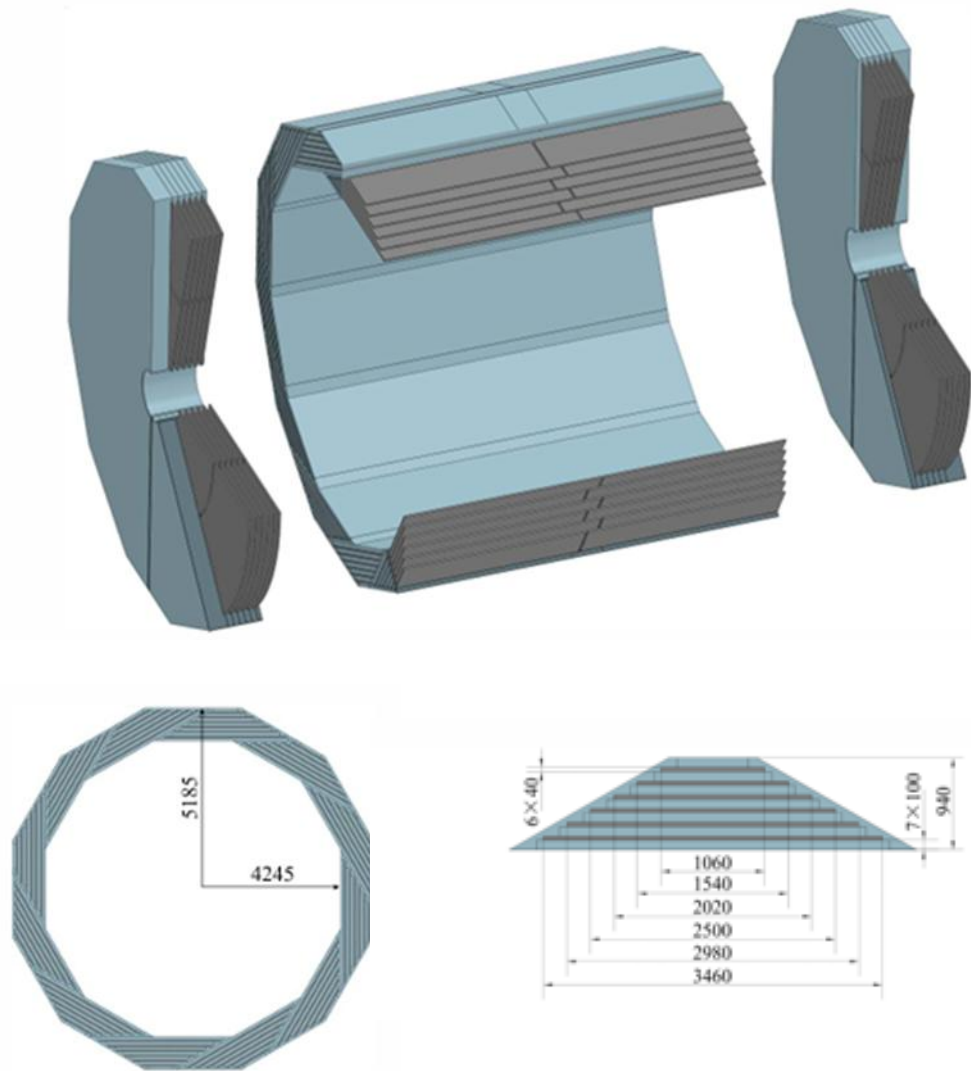
# Актуальность работы



Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems



Joint Institute for  
Nuclear Research



Современные физические эксперименты в области высоких энергий и ускорительной физики требуют создания высокоэффективных и прецизионных сцинтилляционных детекторов. Одним из ключевых факторов их работы является эффективность сбора и транспортировки сцинтилляционного света к фотодетекторам.

Оптические характеристики сцинтилляционных стрипов, включая длину затухания света, качество отражающих покрытий и свойства спектросмещающих волокон, напрямую определяют пространственное и энергетическое разрешение детектирующих систем.

В связи с этим особую актуальность приобретает комплексное экспериментальное исследование процессов генерации и переноса сцинтилляционного излучения, а также разработка адекватных математических моделей, позволяющих точно описывать отклик детекторов и использовать их в численных симуляциях современных установок (в том числе в Geant4).

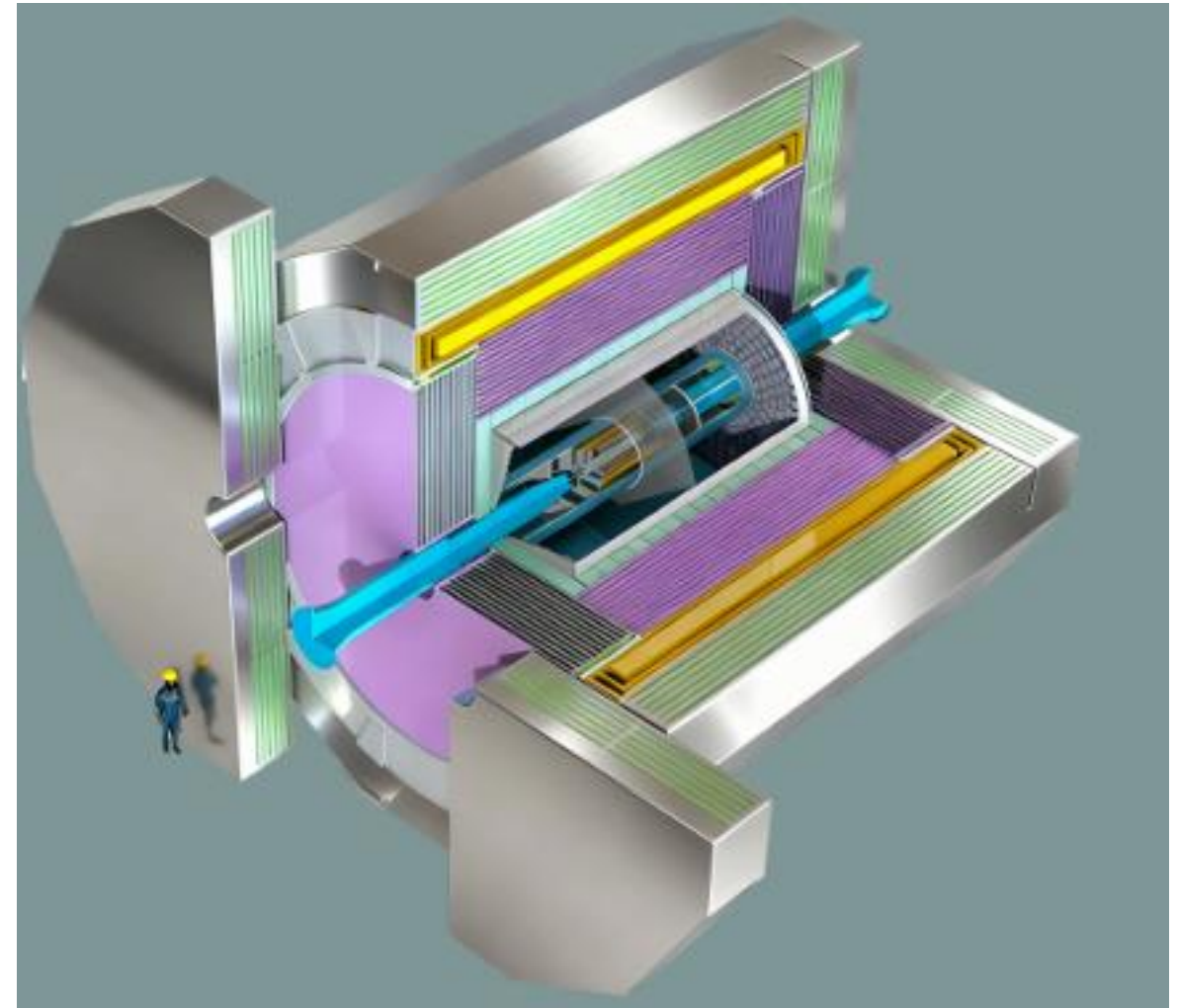
Мюонная система является ключевым элементом детекторов физики высоких энергий, обеспечивая эффективную идентификацию мюонов и подавление фоновых событий.

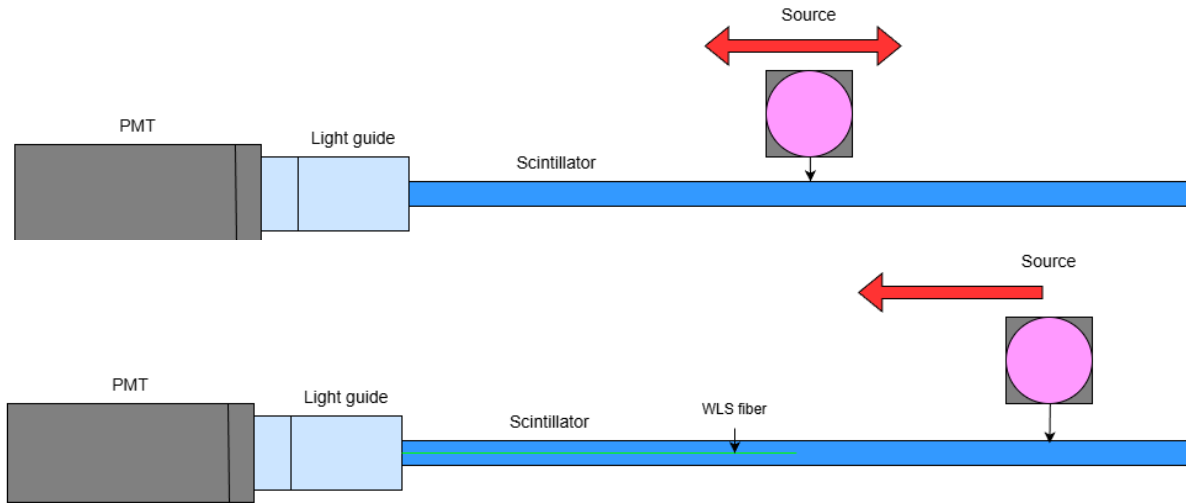
В проекте электрон-позитронного коллайдера СЕРС рассматривается применение сцинтилляционных детекторов со спектросмещающим волокном (WLS), позволяющих повысить эффективность светосбора и упростить систему считывания.

# Цель работы

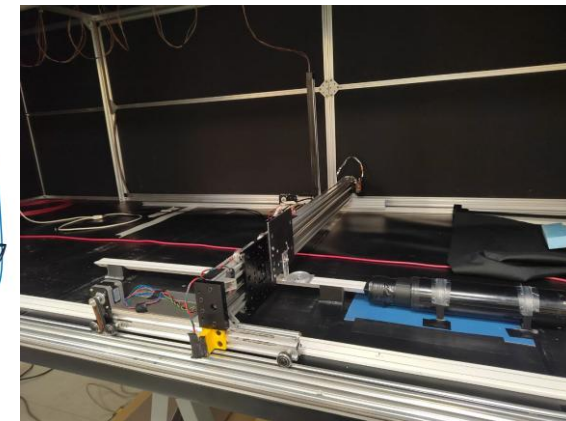
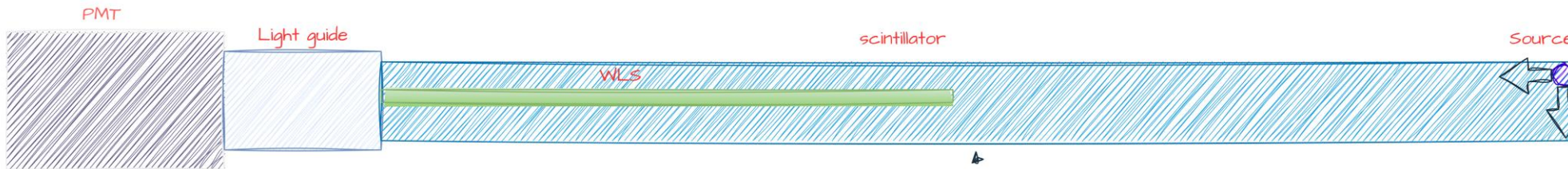


- **Цель работы:**  
Комплексное экспериментальное и теоретическое исследование процессов генерации и переноса сцинтилляционного света в стриповых детекторах для получения прецизионных параметров, необходимых для их численного моделирования.
- **План работы:**
  1. разработка и модернизация экспериментального стенда продольного сканирования сцинтилляционных образцов;
  2. измерение длины затухания света в сцинтилляционных стрипах различных типов;
  3. исследование оптических характеристик спектросмещающих (WLS) волокон;
  4. сравнительный анализ сцинтилляторов; разных технологий изготовления и обработки поверхности
  5. разработка математической модели переноса оптического излучения в стрипе сцинтиллятора, методом Монте-Карло;
  6. реализация и анализ модели сцинтилляционного детектора в пакете Geant4 для проверки энерговыделения мюонов попадающих в детектор под разными углами;
  7. сопоставление экспериментальных и расчетных результатов.





Экспериментальная установка предназначена для исследования оптических характеристик сцинтилляционного стрипа и спектросмещающего волокна. На данной установке были измерены образцы сцинтилляционных стрипов с интегрированным WLS-волокном. В ходе измерений планируется изучение длины затухания света в сцинтилляторе, а также расстояния захвата сцинтилляционного света спектросмещающим волокном. Полученные экспериментальные данные были использованы для проверки и уточнения результатов численного моделирования.



# Образцы



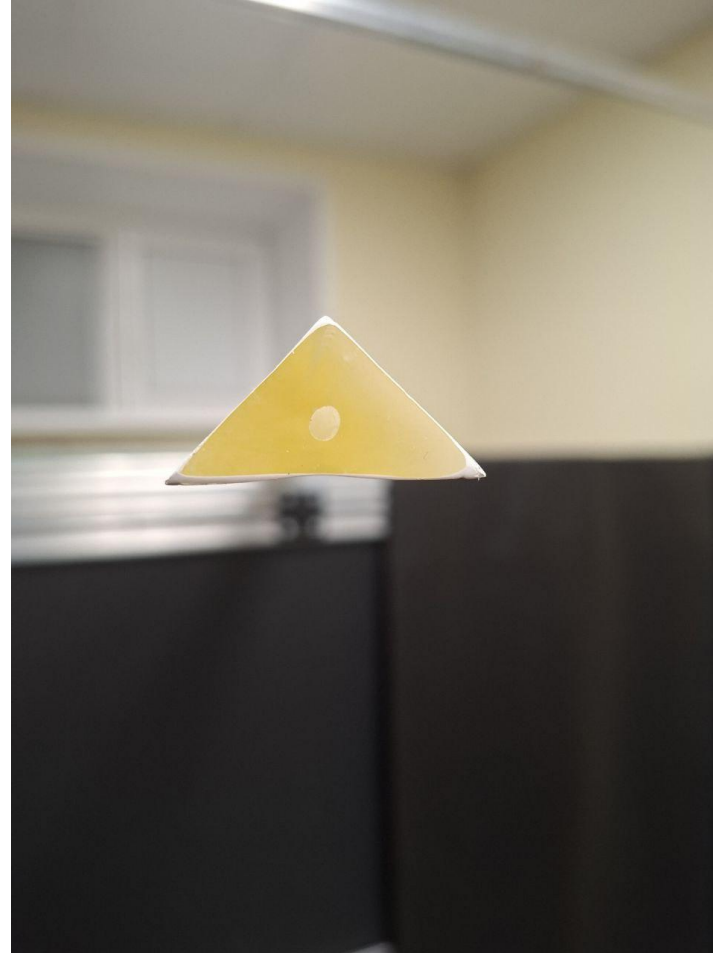
Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems



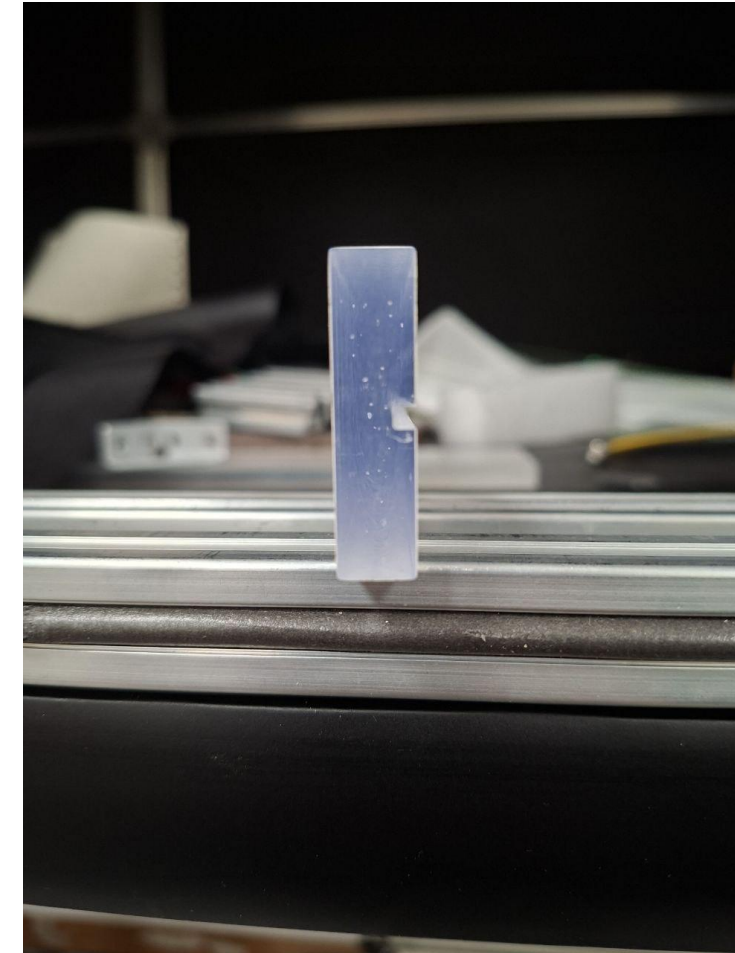
Joint Institute for  
Nuclear Research



Китайский полистирол  
(покрашен белой краской,  
обмотан фольгой и изолентой)



Треугольный стрип,  
полистирол (коэкструзия)

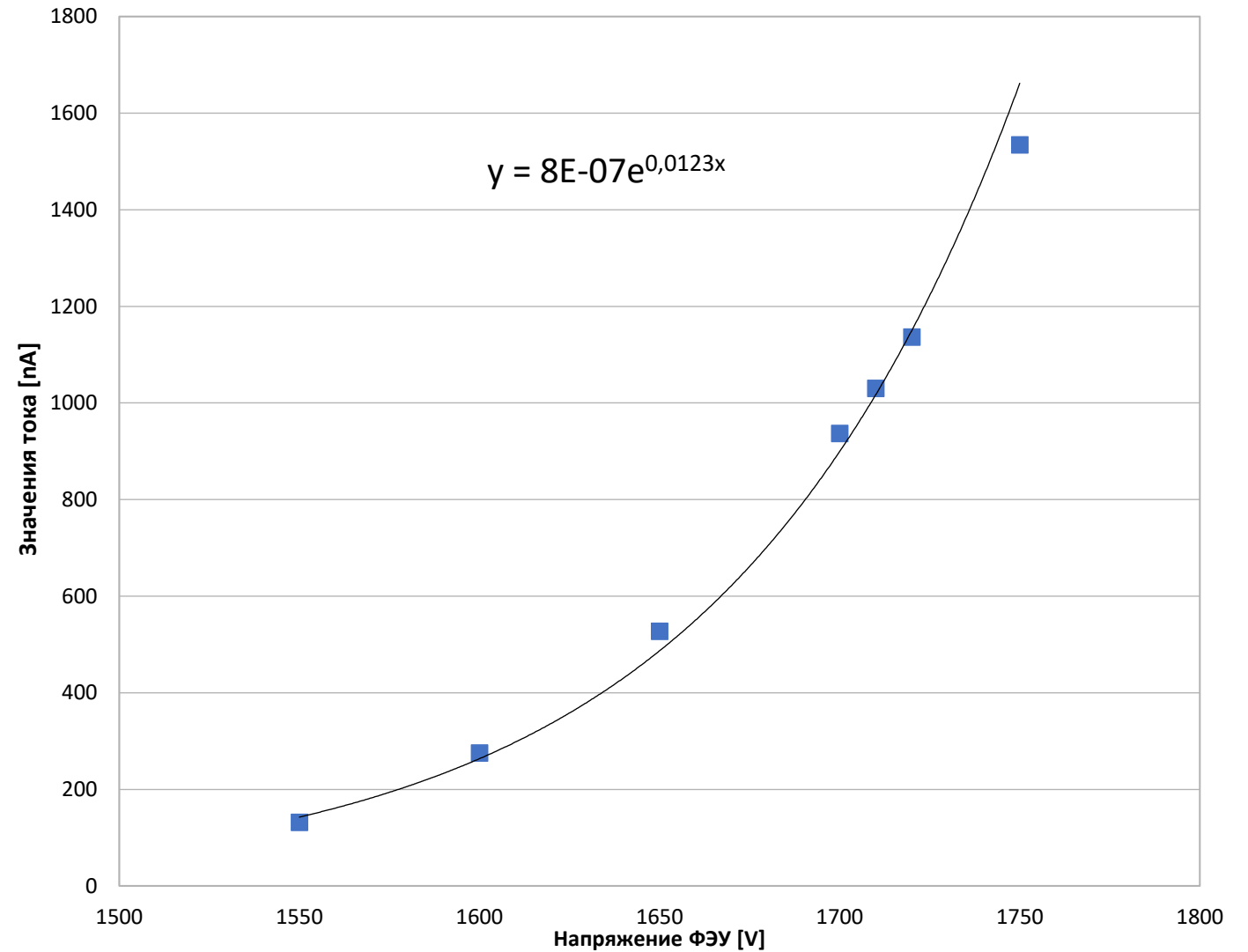


Владимирский полистирол  
(хим. Травление )

# Подбор параметров



Величина	Значение
Длина стрипов	750mm
Источник	Sr90
Напряжение	1700V
Время интегрирования (Picoammeter)	100ms
Число событий на точку	500



# Образец 1 китай

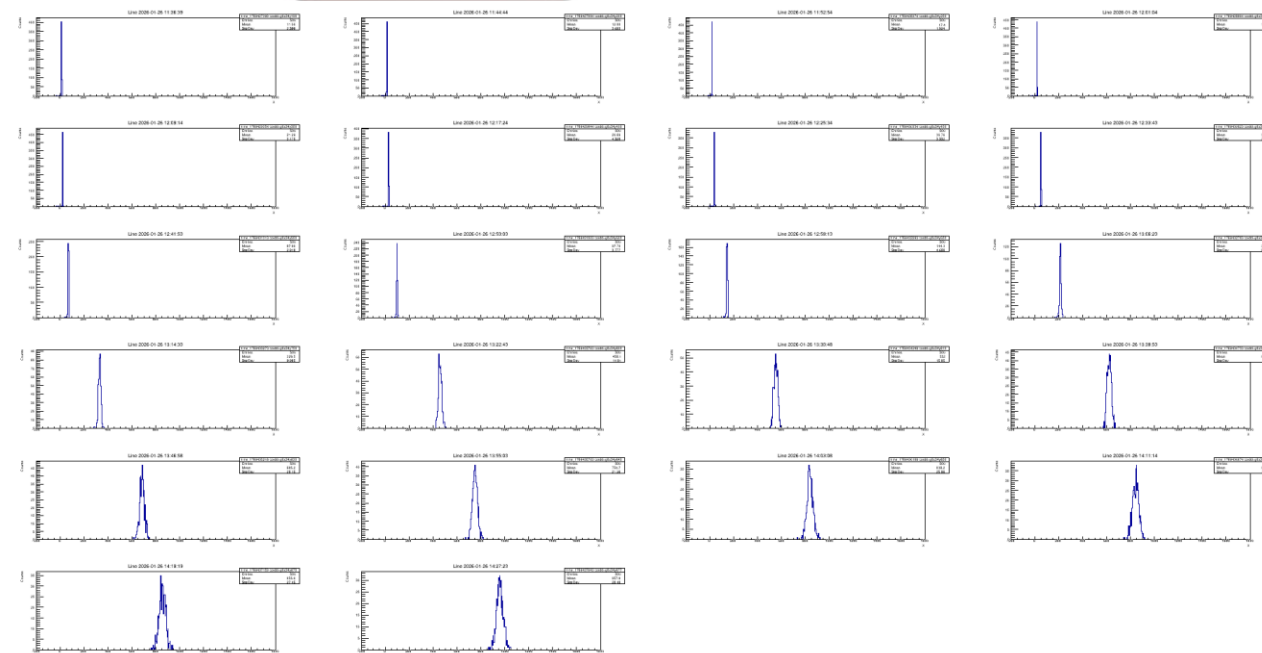
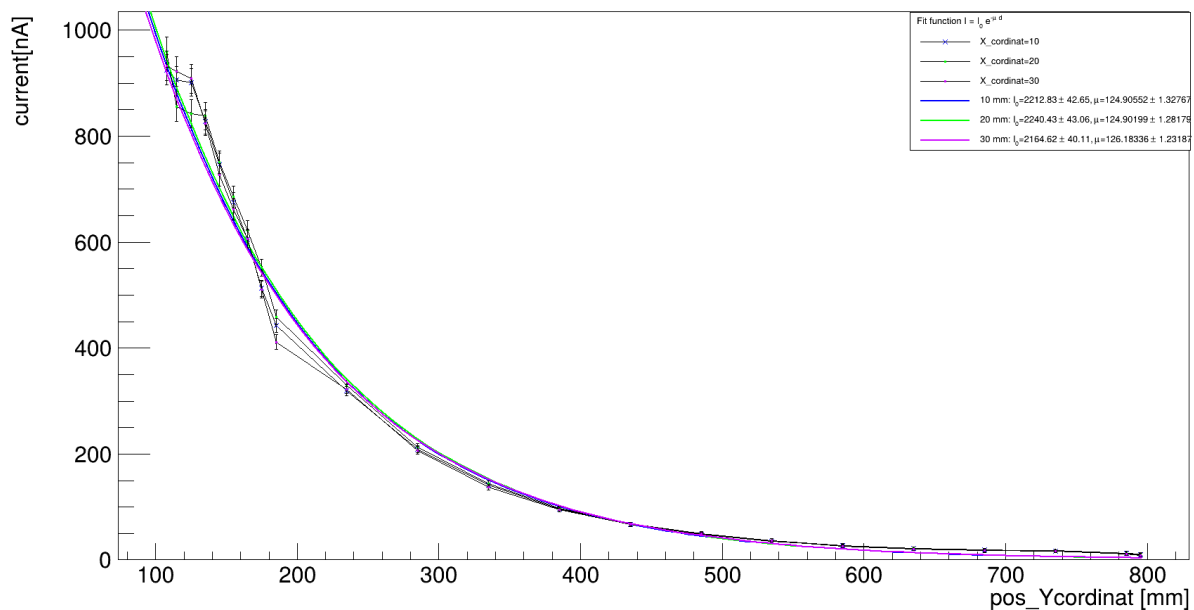


Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems

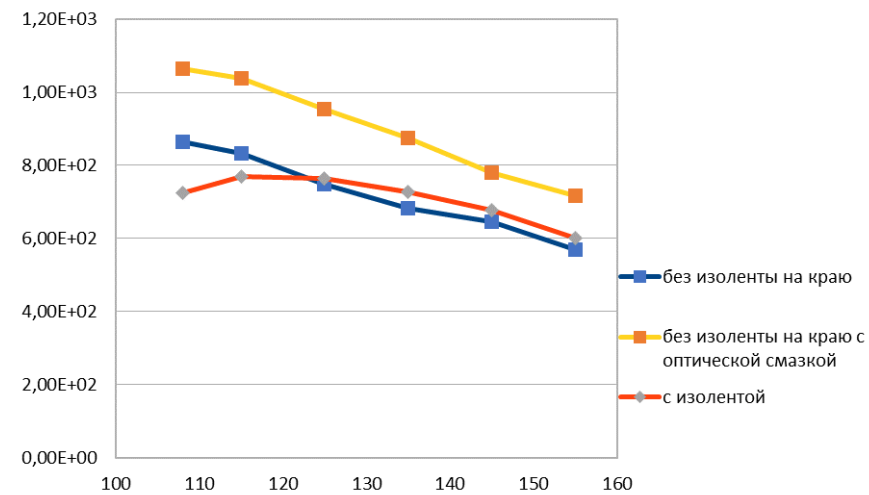


Joint Institute for  
Nuclear Research

China\_1\_data



Сильное влияние изолянта на источник



# Образец 1 Китай

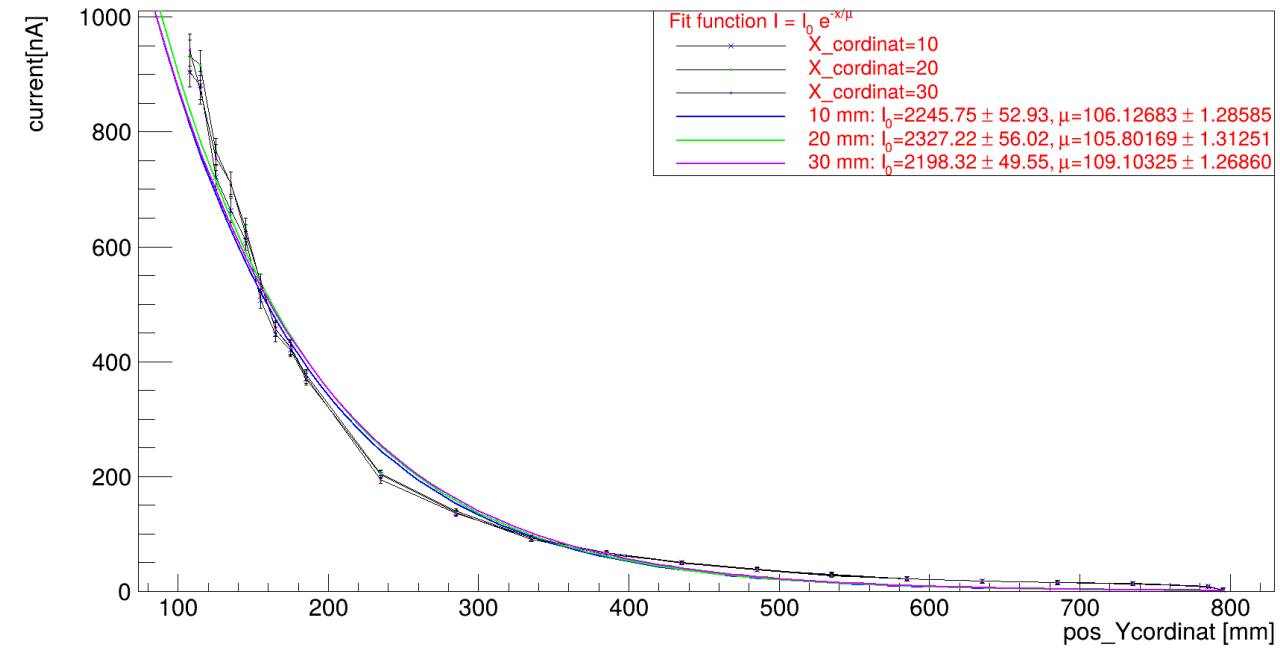


Dzheleppov Laboratory  
of Nuclear Problems

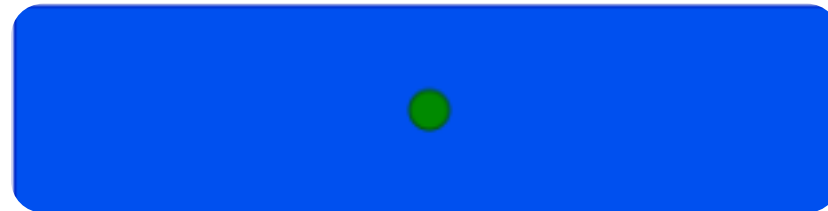
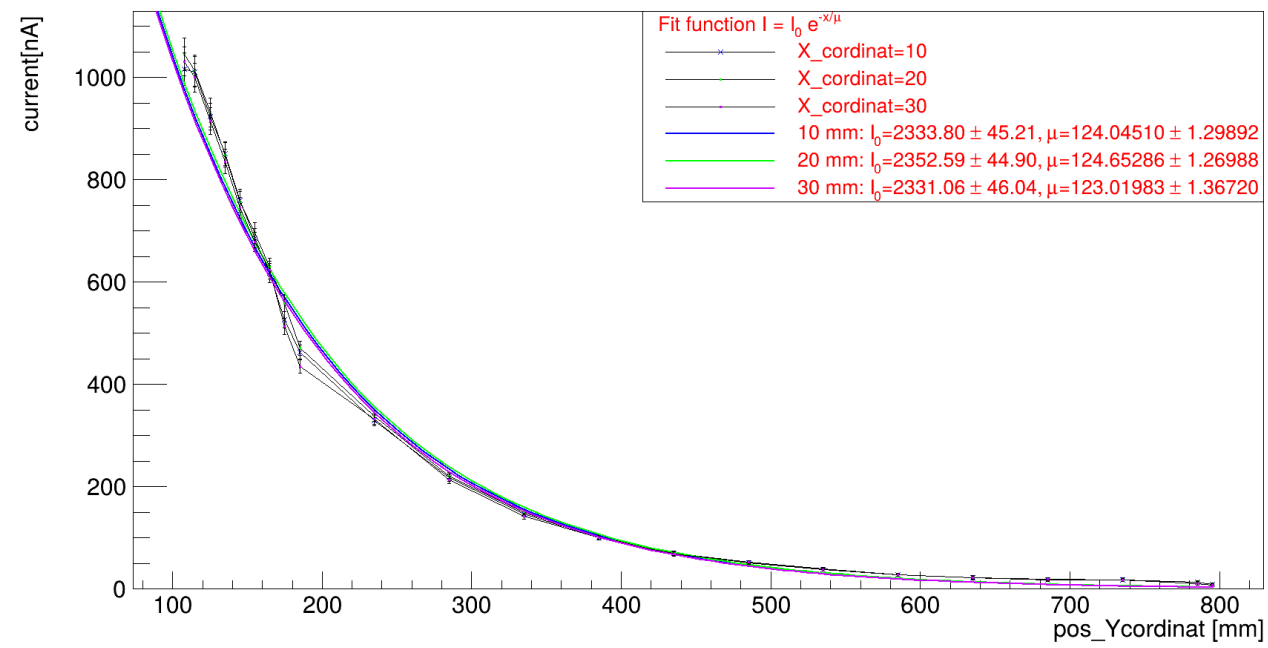


Joint Institute for  
Nuclear Research

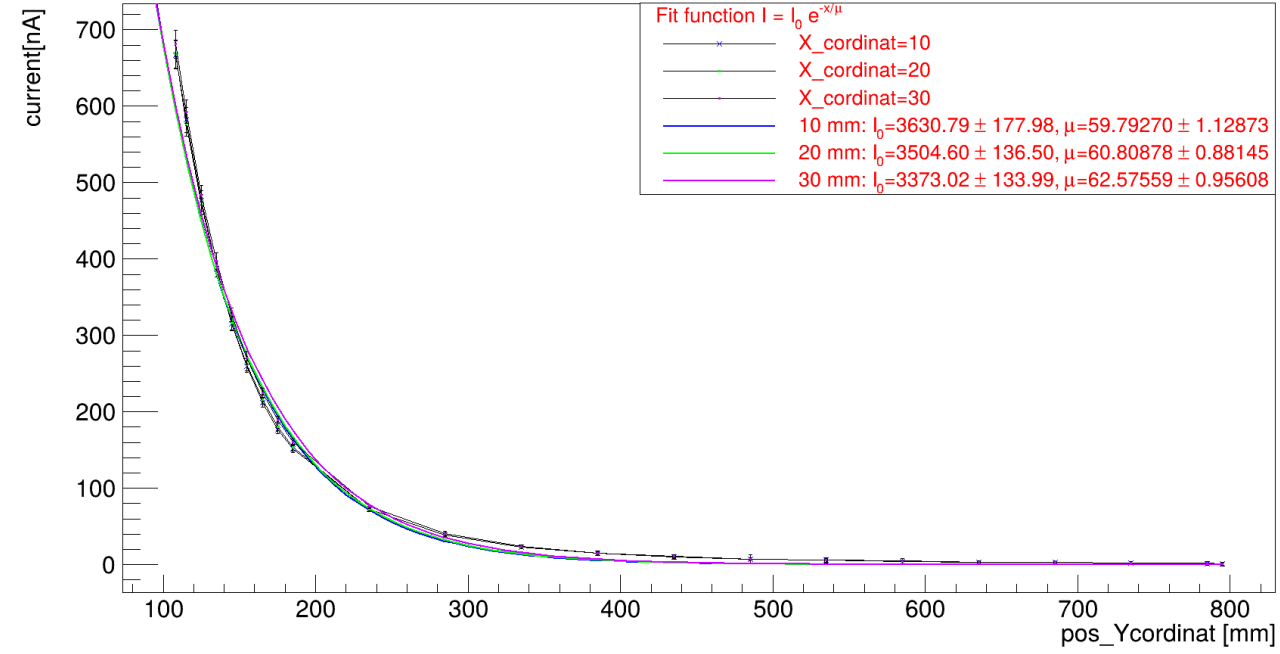
China\_2\_data



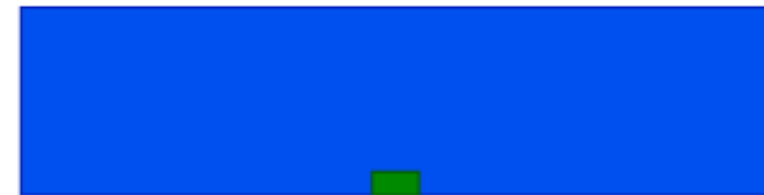
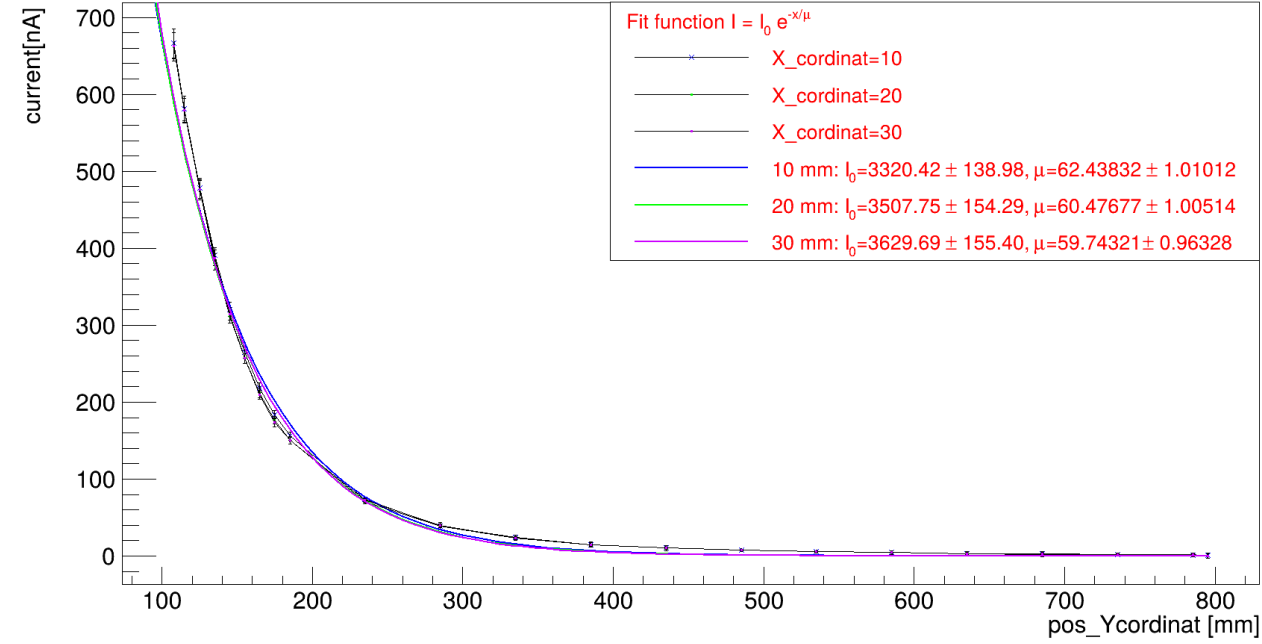
China\_1\_data



Vladimir\_strip\_top\_data



Vladimir\_strip\_bott\_data



# Треугольный образец

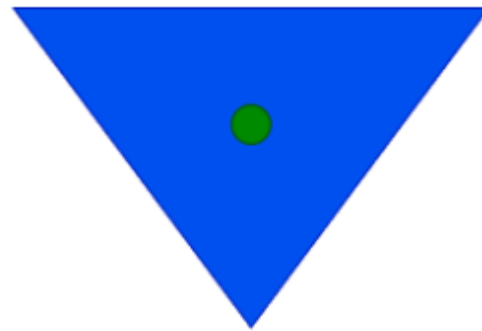
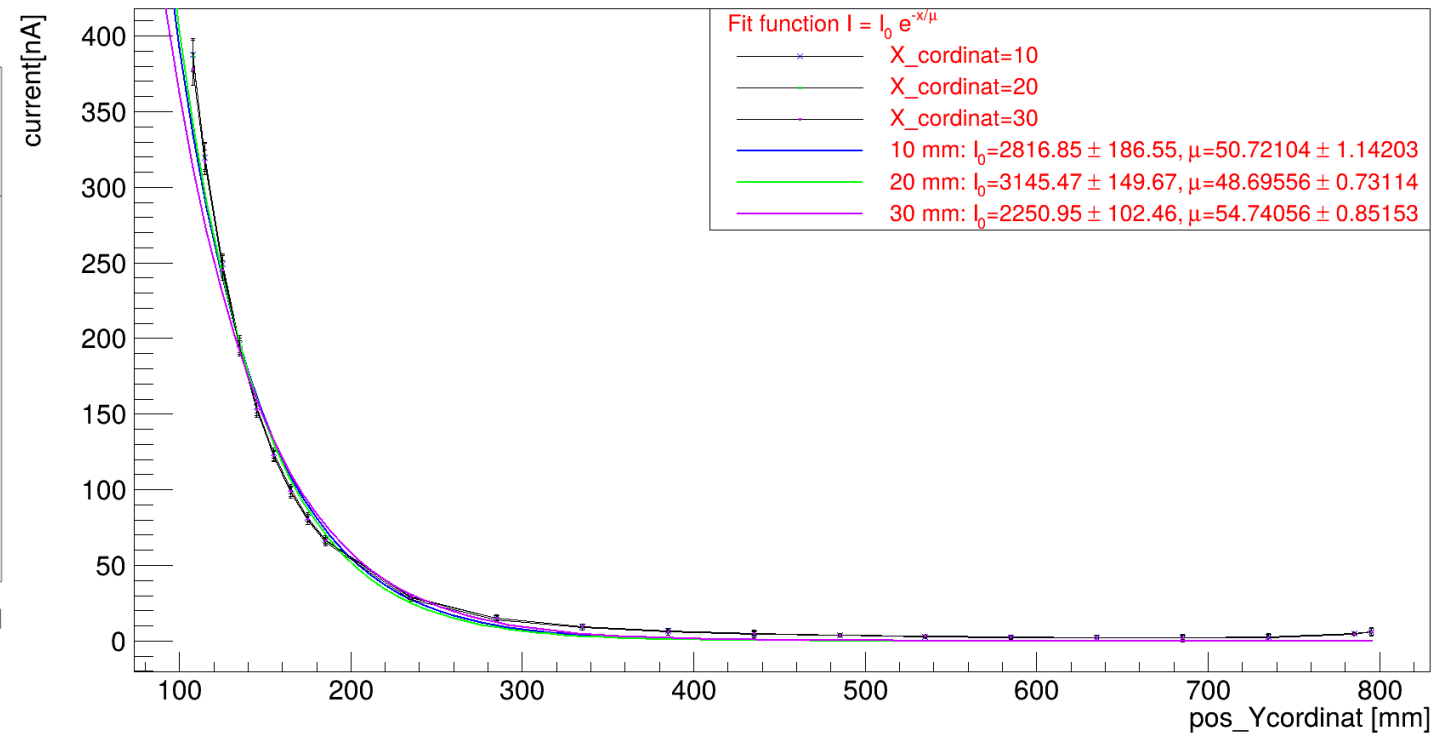
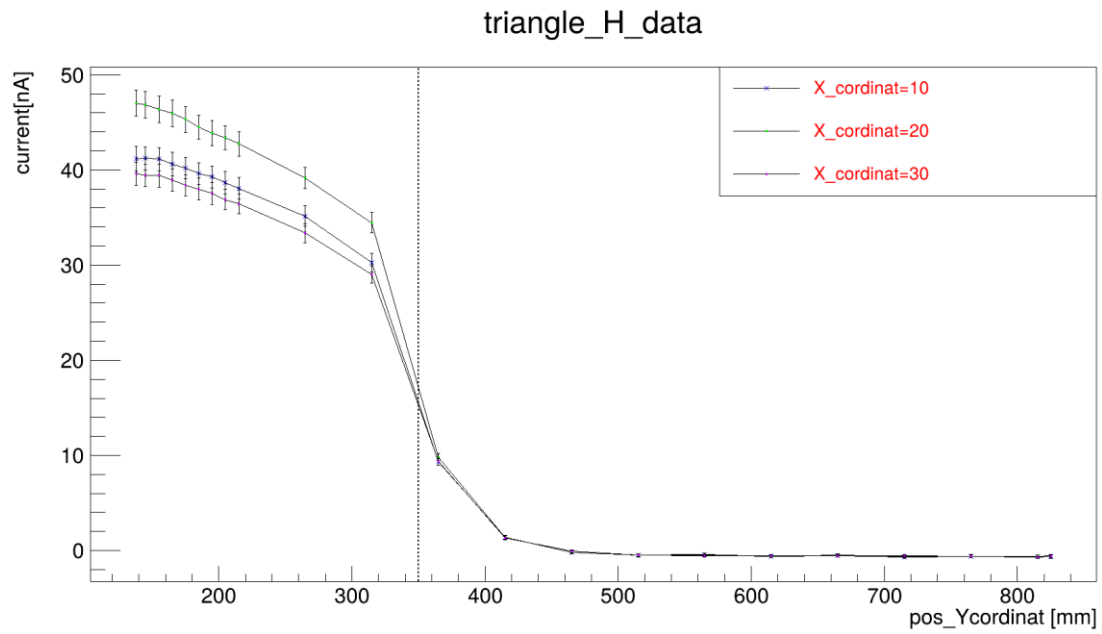


Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems



Joint Institute for  
Nuclear Research

triangle\_H\_data



## задачи

- Перенос света в сцинтилляторе рассматривается как процесс взаимодействия фотонов с материальной средой. В одномерном приближении вдоль оси детектора  $z$  изменение светового потока  $\Phi(z)$ .  $\Phi(z)$  описывается модифицированным законом Буггера—Ламберта—Бера:

$$\Phi(z) = \exp(-z/\lambda)$$

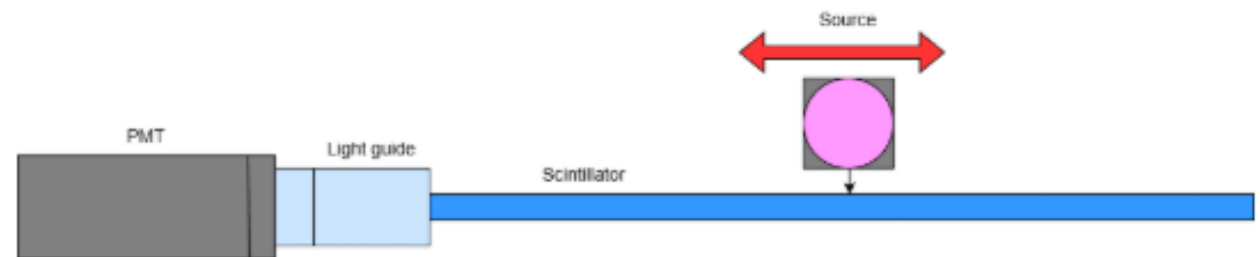
- **Поглошение:** Свет поглощается материалом и вероятность поглощения зависит от пройденного пути
- **Потери на границе:** Свет выходит из сцинтиллятора или отражается учитываем Коэффициент Френеля
- **Отражение от стенок:** Свет отражается обратно из за отражающей поверхности задаем отражательную способность  $R$

- Длина  $L_z=750$  мм
- Ширина  $L_y=40$  мм
- Толщина  $L_x=10$  мм



## Особенности 1:

- Глубина: 2 мм
- Ширина: 2 мм



# Полученный результат

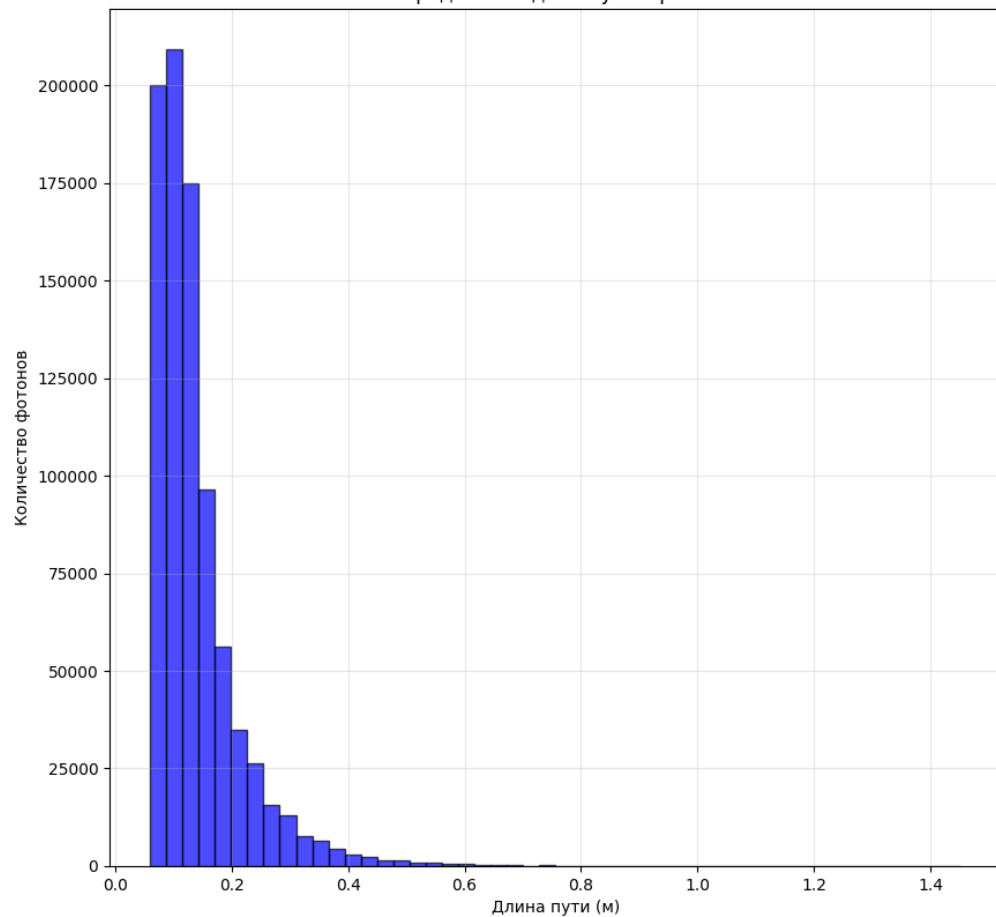


Dzheleпов Laboratory  
of Nuclear Problems

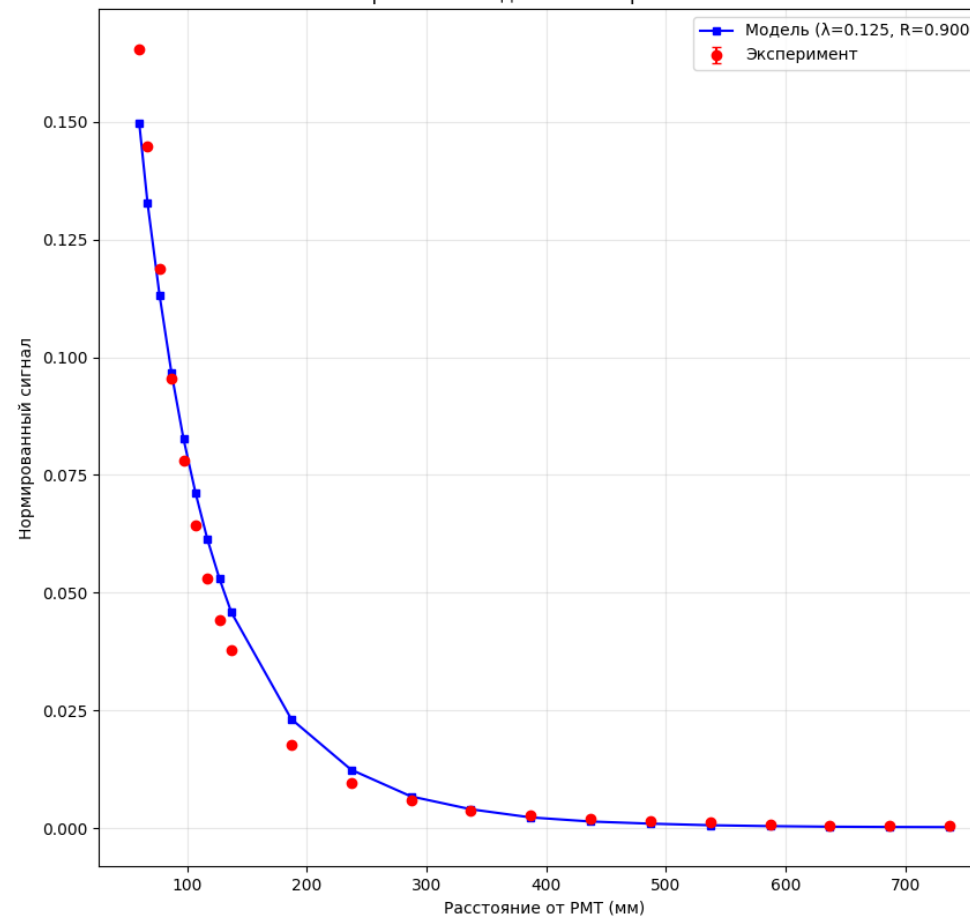


Joint Institute for  
Nuclear Research

Распределение длин путей фотонов



Сравнение модели с экспериментом

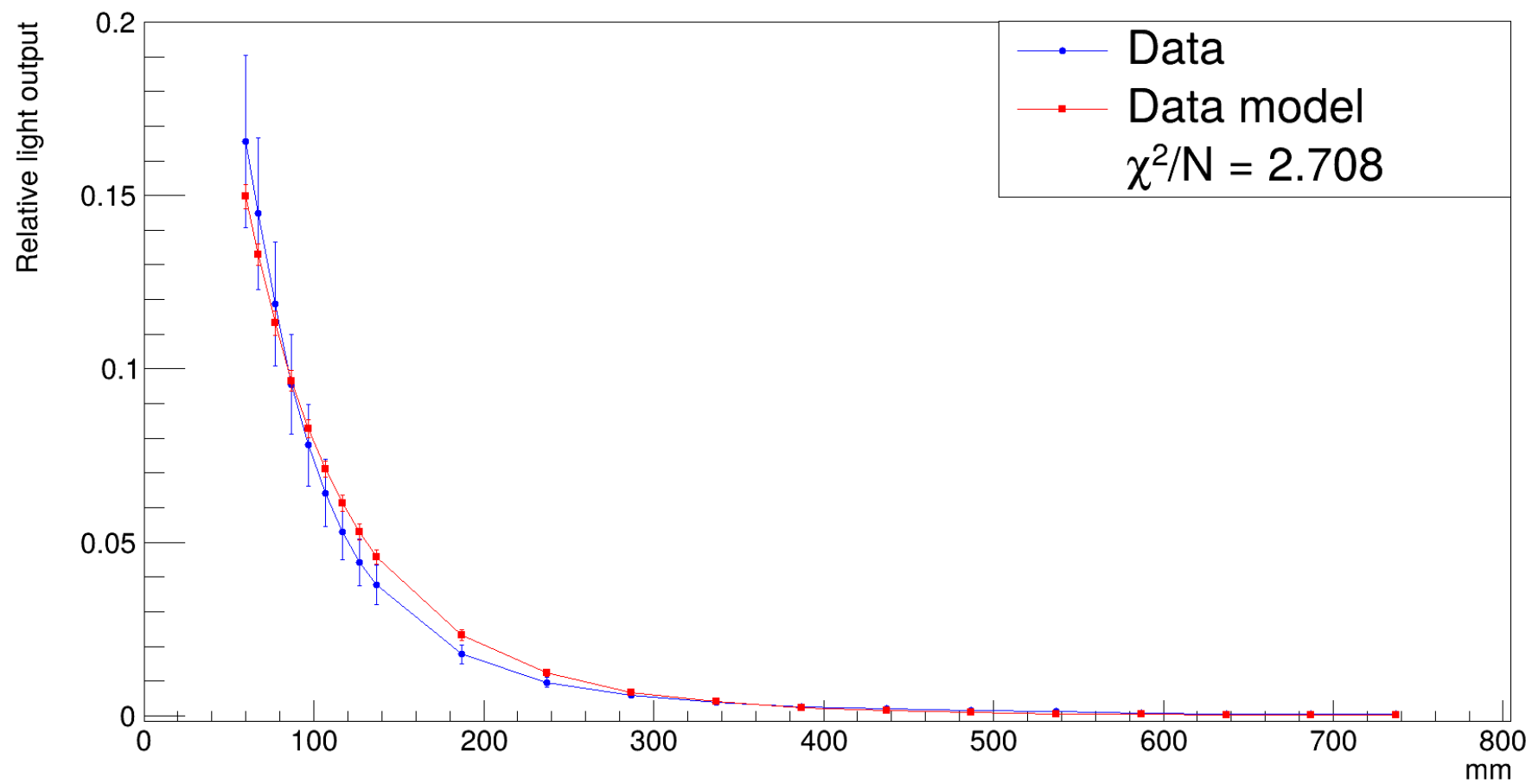


# Обработка данных и расчет сходимости



$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\mu_{\text{exp},i} - \mu_{\text{mod},i})^2}{\sigma_{\text{exp},i}^2}$$

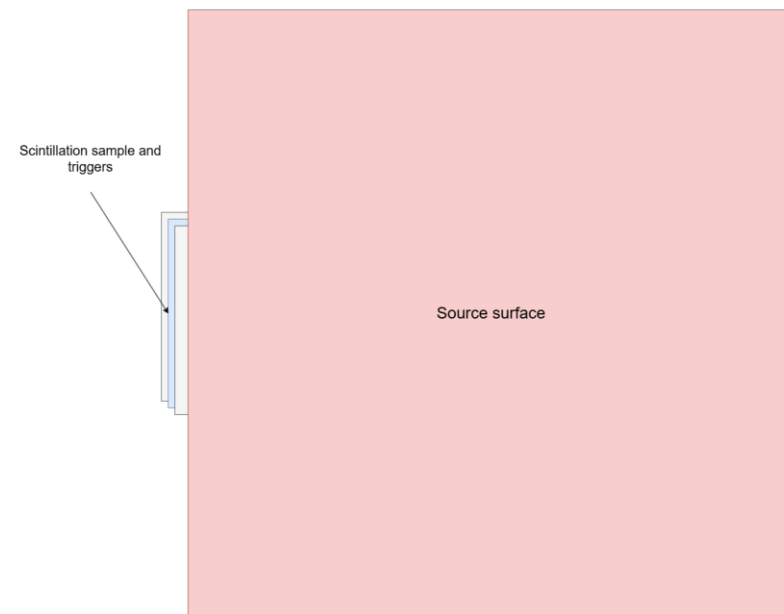
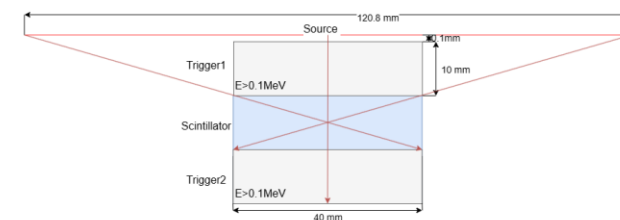
$$\chi^2/N = 2.708$$



## для мюонов разных углов

В ходе моделирования были получены распределения энерговыделения космических мюонов в пластиковом сцинтилляционном стрипе. Для отдельных фиксированных углов падения распределения потерь энергии имеют характерную форму распределения Ландау, что соответствует теории ионизационных потерь минимально ионизирующих частиц в тонких слоях вещества. Однако в рассматриваемой геометрии установки угол прохождения частицы через сцинтиллятор не является фиксированным. Благодаря использованию протяжённого источника и системы триггеров размером  $40 \times 40 \text{ мм}^2$  регистрируются мюоны, проходящие через сцинтиллятор под различными углами относительно нормали к поверхности детектора. Угловое распределение космических мюонов задавалось в соответствии с выражением

$$I(\theta) \propto \cos^2 \theta$$



# Результат

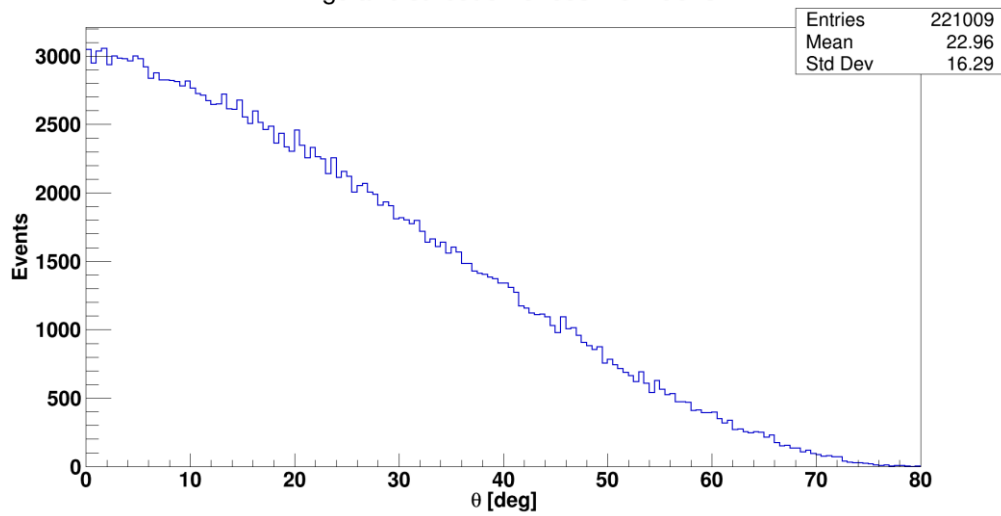


Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems

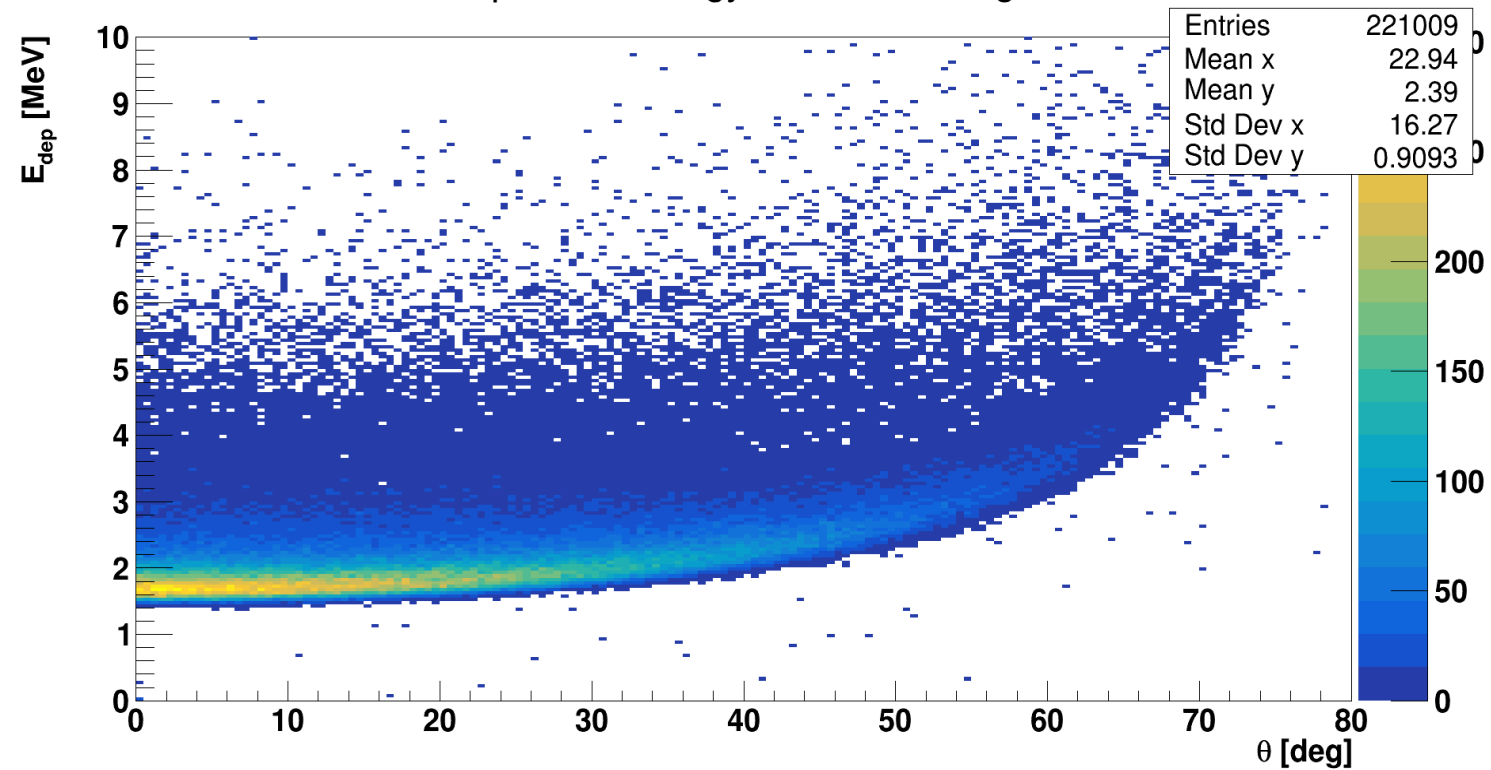


Joint Institute for  
Nuclear Research

Angular distribution of cosmic muons



Deposited Energy vs Incident Angle



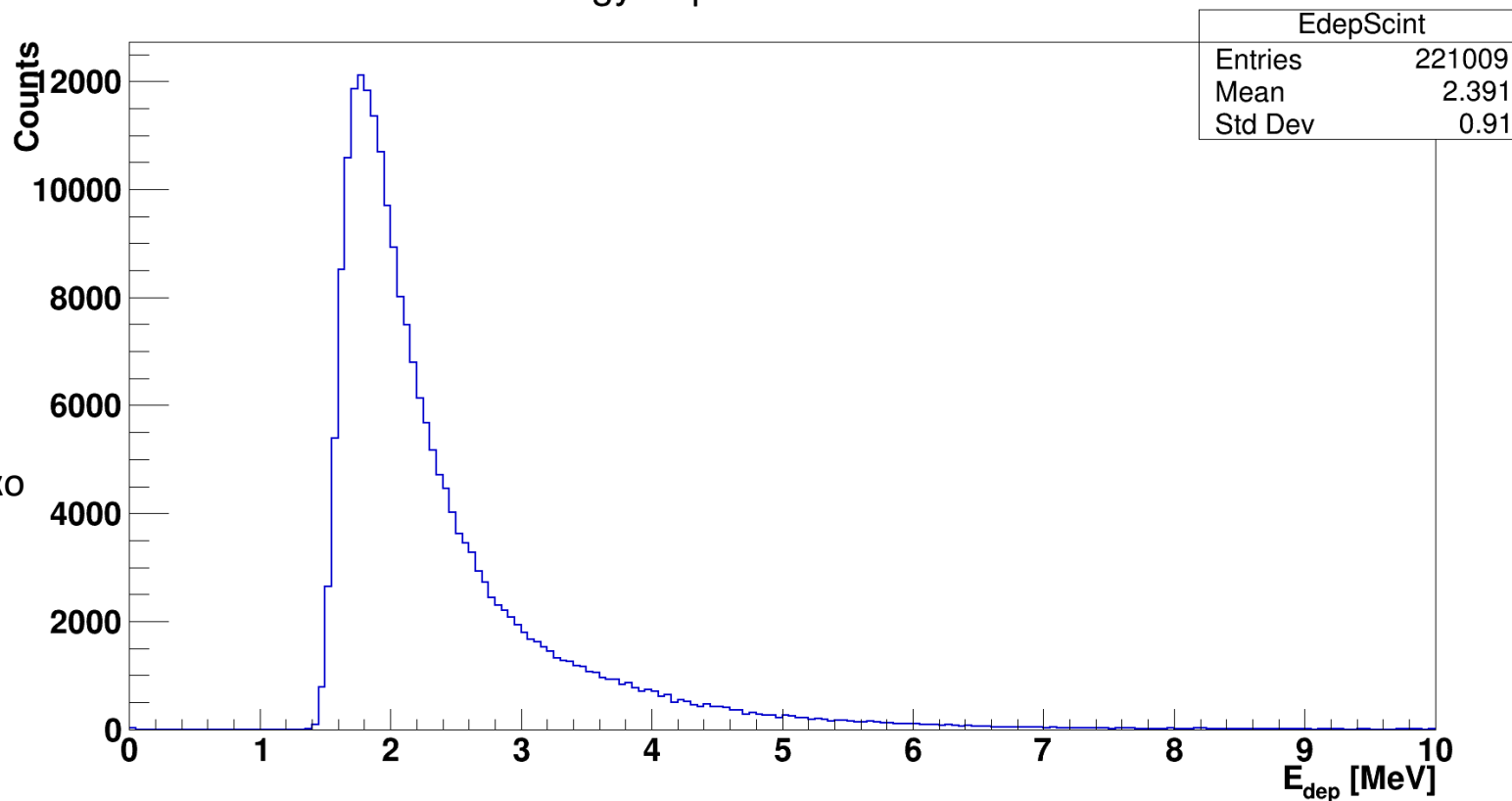
В результате суммарное распределение энерговыделения представляет собой суперпозицию распределений Ландау с различными параметрами, взвешенными угловым распределением космических мюонов:

$$F(E) = \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \text{Landau} \left( E; \frac{MPV_0}{\cos \theta}, \frac{\sigma_0}{\cos \theta} \right) d\theta$$

Основной вклад в распределение вносят мюоны, проходящие под малыми углами к нормали, однако наличие частиц с большими углами приводит к увеличению высокоэнергетического хвоста распределения вследствие возрастания длины пробега в сцинтилляционном материале.

Полученное распределение имеет выраженную асимметричную форму с длинным высокоэнергетическим хвостом, характерную для процессов ионизационных потерь заряженных частиц в тонких слоях вещества. Среднее энерговыделение составило

Energy deposited in scintillator



$$\langle E_{dep} \rangle = 2.39; \text{MeV}.$$

- Полученные данные длины затухания в сцинтилляторе использовались в мат моделировании для сравнении мат модели с реальными данными.
- Лучшая длина затухания у владимирского, но по количеству света больше в китайских (может быть связано с поверхностью и с возрастом) по качеству пластика лучше владимирский.
- Результаты мат моделирования согласуются с результатами эксперимента в пределах ошибок.
- Промоделированное энерговыделение для мюонов разных углов показывает что результирующее энерговыделение есть свертка Ландау и косинуса квадрат. И демонстрирует мюоны под какими углами мы детектируем.



# Используемые формулы(доп. слайд )

Угол падения связан с углом преломления законом Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t.$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

$$R = (R_s + R_p)/2$$

```
R_total = wall_reflectivity * R_fresnel
```

$$\phi = 2\pi \cdot \text{random}()$$

$$\cos(\theta) = 2 \cdot \text{random}() - 1$$

$$\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \leq 1$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau},$$

# Почему учили

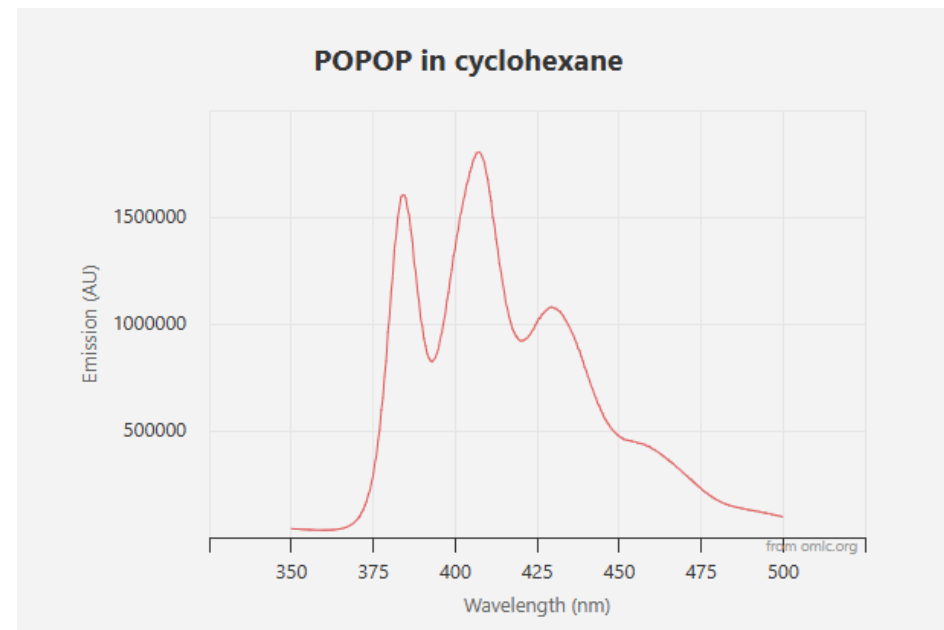
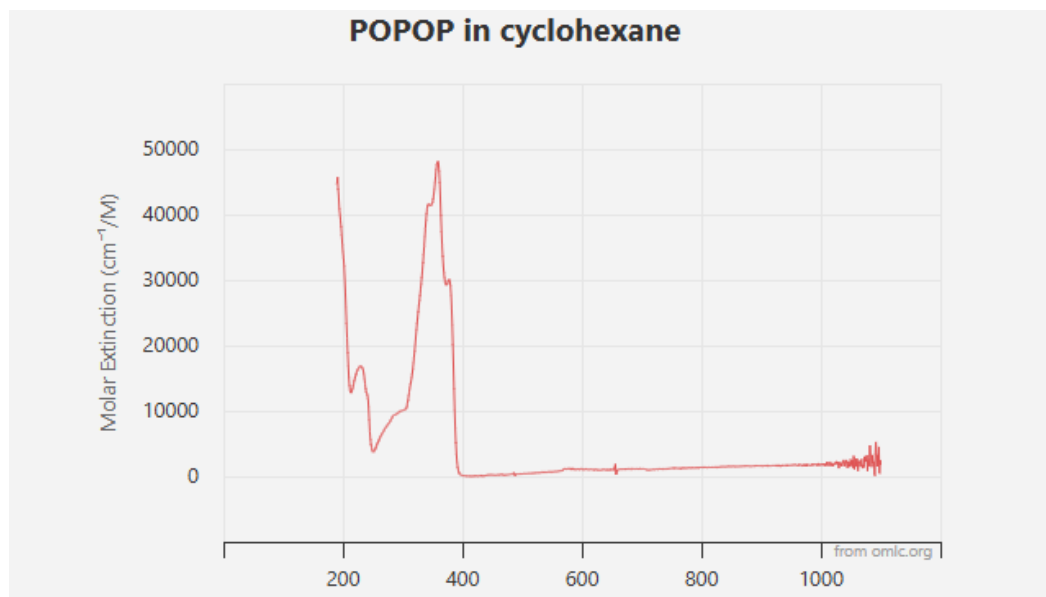


Dzhelepov Laboratory  
of Nuclear Problems



Joint Institute for  
Nuclear Research

# поглощение с переизлучением (Доп. Слайд )



## Монте-Карло(доп. Слайд)

- Шаг 1. Генерация фотона  
Задаем начальную позицию:  $(x_0, y_0, z_0)$  — место, где произошла сцинтилляция  
Задаем случайное направление движения: все направления равновероятны (изотропно)
- Шаг 2. Поиск ближайшей границы  
(tgroove)  
Считаем расстояние до всех стенок сцинтиллятора: До левой/правой стенки ( $t_y$ ). До передней/задней стенки ( $t_x$ ). До торца с ФЭУ и противоположного торца ( $t_z$ ). До канавки  
Выбираем минимальное расстояние до него фотон долетит без препятствий
- Шаг 3. Проверка поглощения  
Фотон может поглотиться по пути:  
Генерируем случайное число  $r$  от 0 до 1  
Если  $r > e^{-t \min/\lambda}$  — фотон поглощается (завершаем трассировку) из этих фотонов с какая то доля поглощается и переизлучается переизлученный фотон затухает по другой длине волны  
Если нет — фотон долетает до границы
- Шаг 4. Проверка попадания в детектор  
Если фотон достиг торца с ФЭУ ( $z=Lz$ ): Увеличиваем счетчик обнаруженных фотонов  
Завершаем трассировку
- Шаг 5. Взаимодействие с границей  
Если фотон достиг любой другой границы: Рассчитываем, отразится он или выйдет наружу  
Для отражения используем законы Френеля (зависит от угла падения и показателя преломления)  
Если стенка отражающая — меняем направление движения  
Если фотон вышел или поглотился стенкой — завершаем трассировку
- Шаг 6. Повторяем шаги 2–5  
Продолжаем трассировку до тех пор, пока фотон:  
Не поглотится в объеме  
Не выйдет через границу  
Не попадет в детектор  
Не будет поглощен стенкой
- Шаг 7. Статистика  
Повторяем шаги 1–6 для  $N$  фотонов  
Считаем долю фотонов, достигших детектора