



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

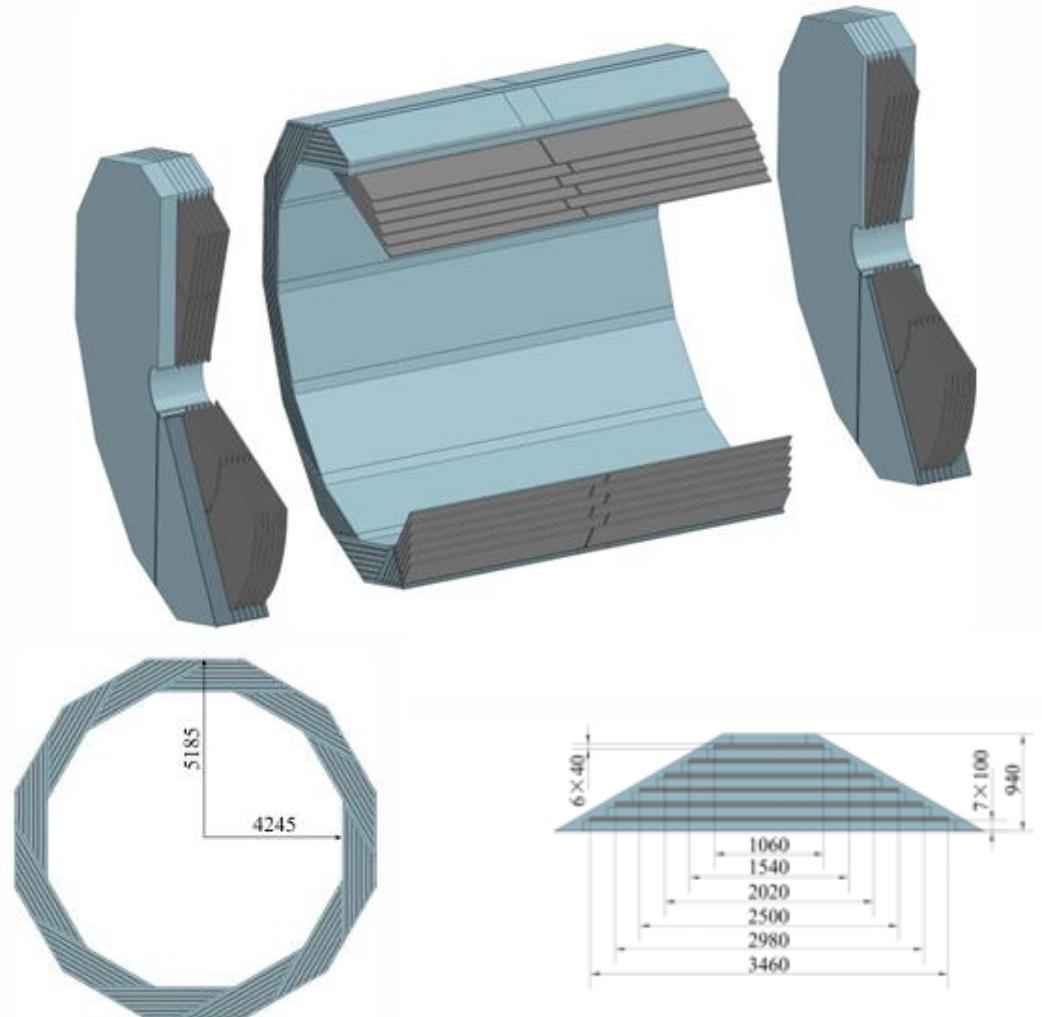
Аспирант: Гиня Э.

Научный руководитель: Наумов П.Ю.

Организация: ОИЯИ

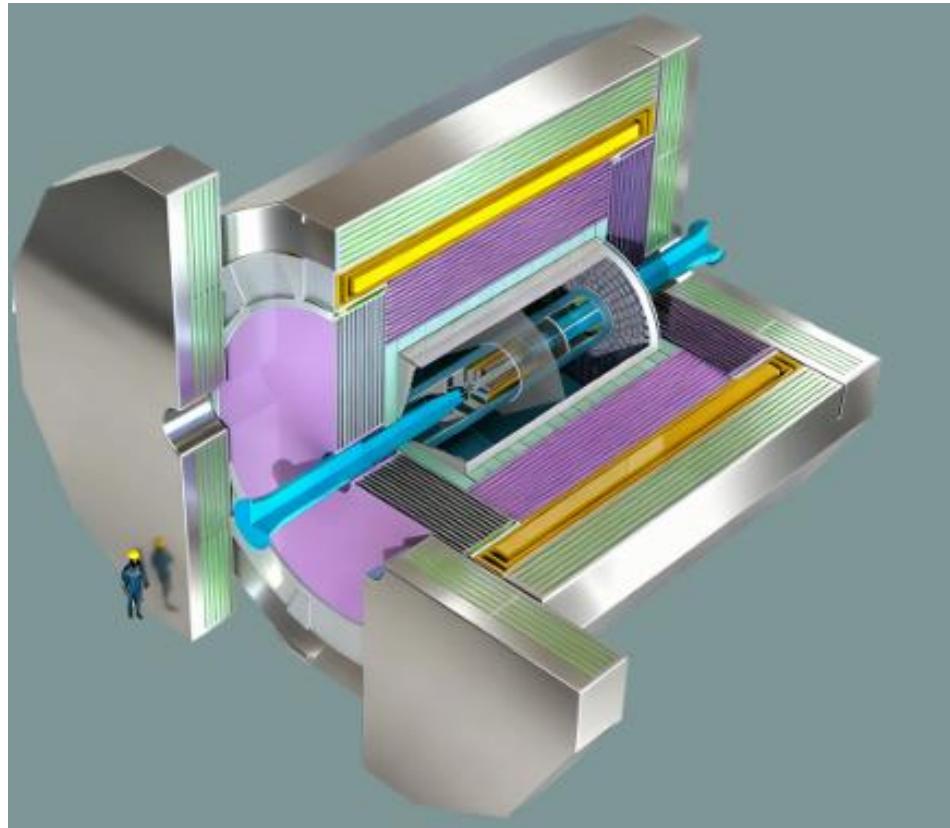
Год: 2025–2026

Актуальность работы



- Мюонная система является ключевым элементом детекторов физики высоких энергий, обеспечивая эффективную идентификацию мюонов и подавление фоновых событий.
- В проекте электрон-позитронного коллайдера CEPC рассматривается применение сцинтилляционных детекторов со спектросмещающим волокном (WLS), позволяющих повысить эффективность светосбора и упростить систему считывания.
- Оптимизация геометрии сцинтилляционного стрипа и характеристик WLS-волокна требует детального численного моделирования и экспериментальной проверки.
- Высокая эффективность μ ID критична для точных измерений бозона Хиггса, электрослабых процессов и поиска физики за пределами Стандартной модели.

Цель и задачи работы

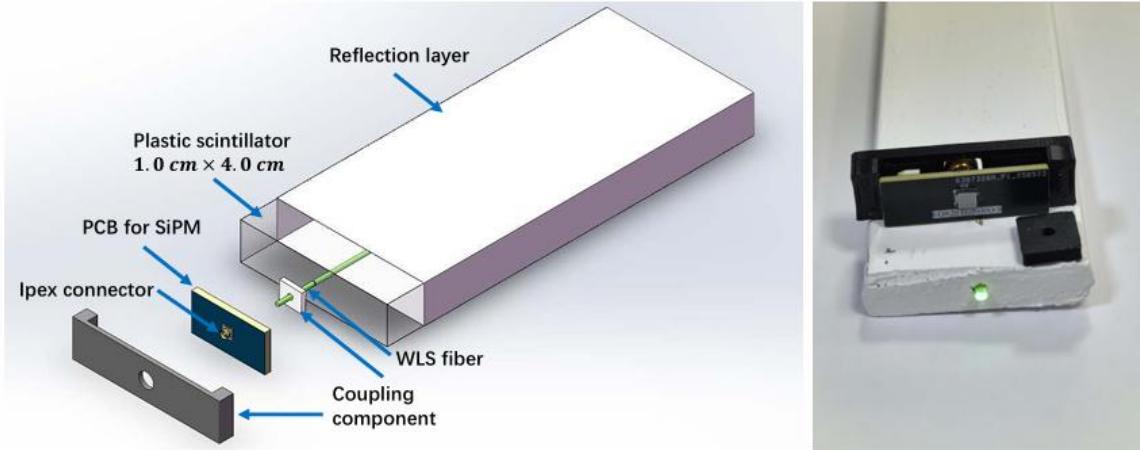


Цель работы — численное моделирование сцинтилляционного стрипа с центральным отверстием под WLS-волокно для мюонной системы коллайдера СЕРС и экспериментальная проверка полученных результатов.

В рамках работы были поставлены задачи:

- смоделировать прохождение мюона через сцинтилляционный стрип;
- изучить генерацию и распространение сцинтилляционного света;
- исследовать захват фотонов спектросмещающим волокном;
- получить распределение фотонов по поверхности WLS-волокна;
- оценить эффективность светосбора и транспортировки света;
- подготовить экспериментальную проверку результатов моделирования.

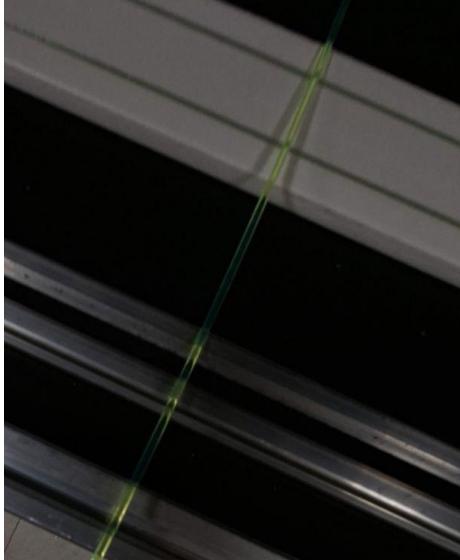
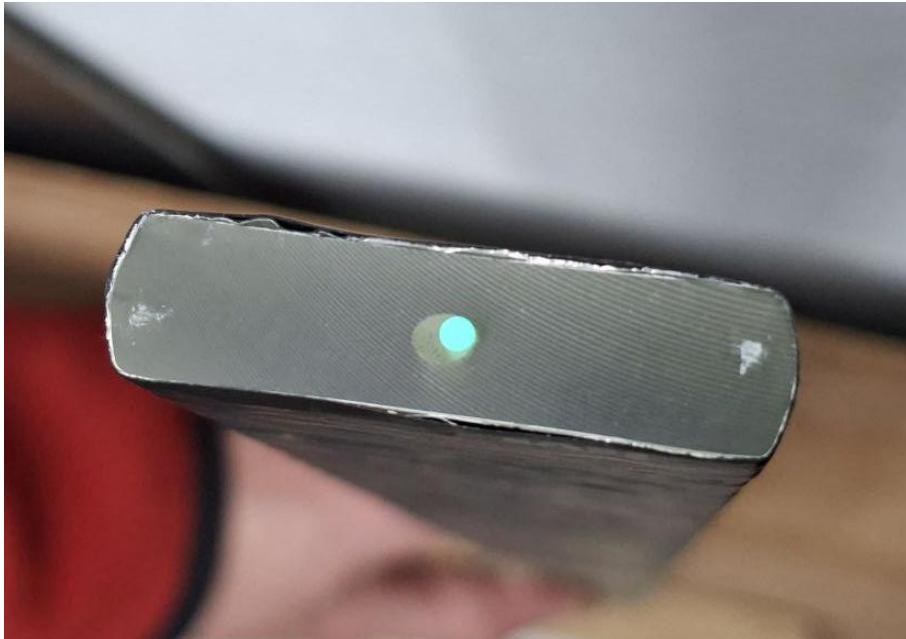
Сцинтиляционного стрипа



- Сцинтиляционный стрип из пластика (PS) с поперечным сечением **$4 \times 1 \text{ см}^2$**
- Центральный канал с WLS-волокном диаметром **1.2 или 2.0 мм**
- Покрытие стрипа **98%** отражающим слоем (TiO_2 или тefлон), толщина $\leq 0.1 \text{ мм}$
- Считывание сигнала с помощью SiPM с активной областью **$3 \times 3 \text{ мм}^2$**
- Оптическое соединение WLS–SiPM выполнено с высокой точностью для минимизации потерь света
- Ширина стрипа **4 см** выбрана исходя из требований пространственного разрешения мюонных треков
- Два взаимно перпендикулярных слоя стрипов обеспечивают двумерную реконструкцию координат

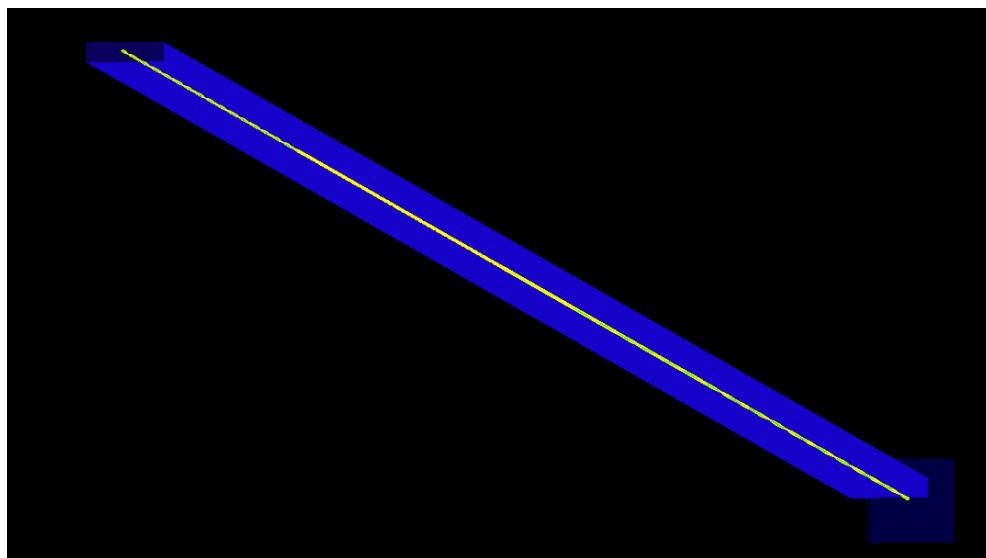
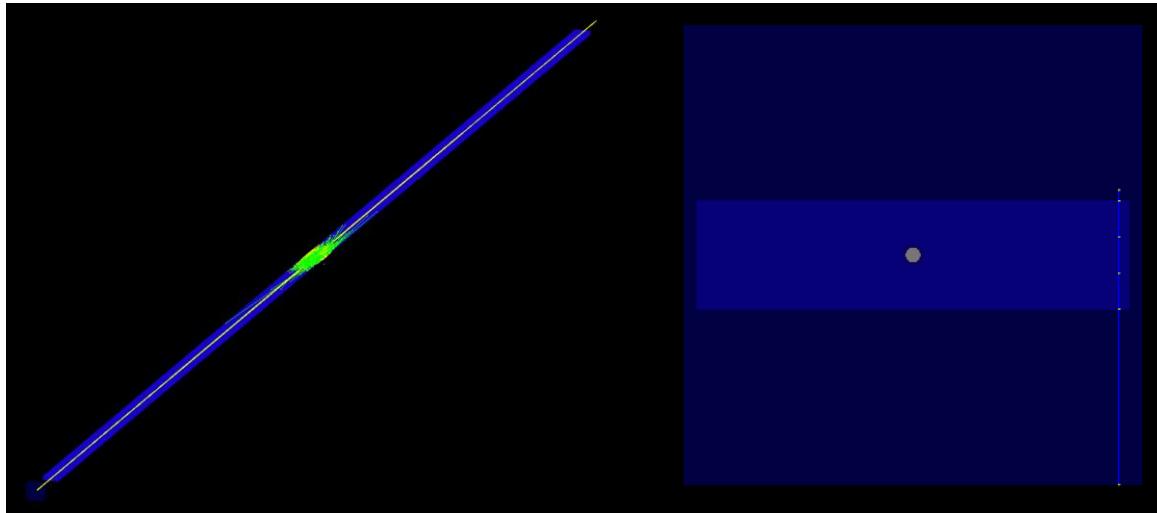


Физические процессы



- **Ионизационные потери энергии мюона в сцинтилляторе**
Мюон, проходя через пластиковый сцинтиллятор, теряет энергию за счёт ионизации и возбуждения атомов материала.
- **Генерация сцинтилляционных фотонов**
Часть потерянной энергии преобразуется в сцинтилляционный свет в видимом и ультрафиолетовом диапазонах.
- **Многократные отражения фотонов внутри стрипа**
Сцинтилляционные фотоны многократно отражаются от границ стрипа и отражающего покрытия, распространяясь к центральному каналу.
- **Захват фотонов WLS-волокном**
Фотоны, попадающие на поверхность WLS-волокна, поглощаются и переизлучаются на большей длине волны с последующим захватом по полному внутреннему отражению.
- **Спектральное преобразование и транспортировка света**
Переизлучённые фотоны распространяются вдоль волокна и транспортируются к фотодетектору (SiPM) с ослаблением, определяемым длиной затухания.

Численное моделирование



Моделирование работы сцинтиляционного стрипа выполнено с использованием программного пакета **GEANT4**, предназначенного для моделирования взаимодействия частиц с веществом и оптических процессов.

В численной модели учитывались:

- геометрия сцинтиляционного стрипа с центральным отверстием и спектросмещающего волокна;
- оптические свойства материалов сцинтиллятора, отражающего покрытия и WLS-волокна;
- процессы ионизационных потерь энергии мюона и генерации сцинтиляционных фотонов;
- распространение фотонов с учётом отражений, преломлений и поглощения;
- взаимодействие фотонов с поверхностью WLS-волокна, включая поглощение, переизлучение и транспортировку света к фотодетектору.

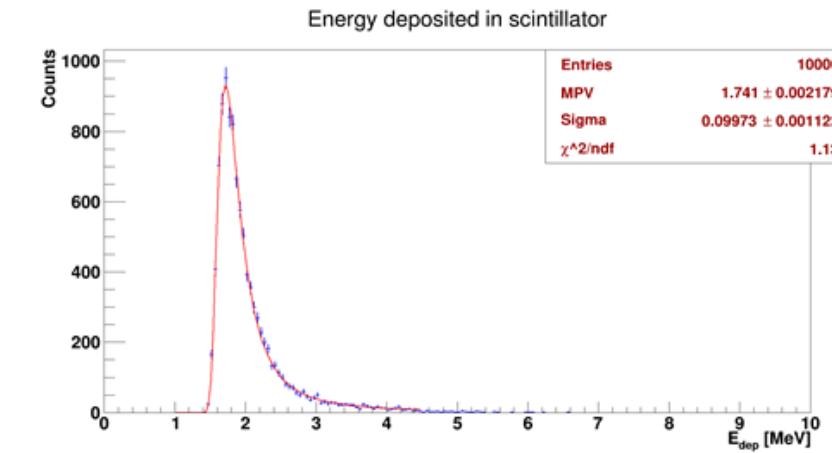
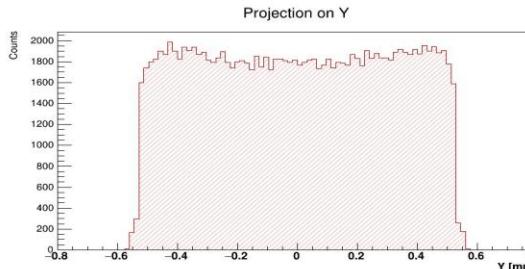
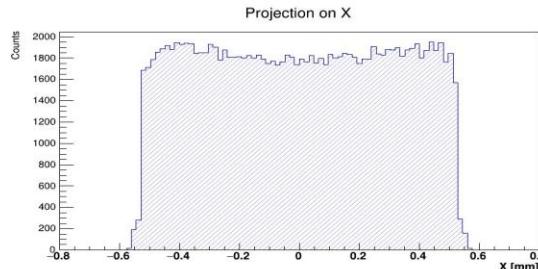
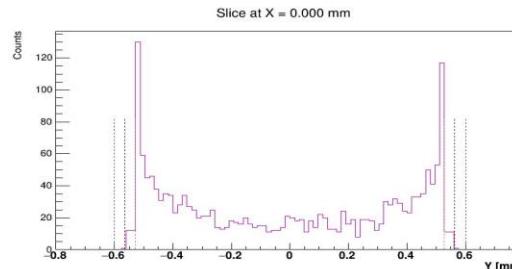
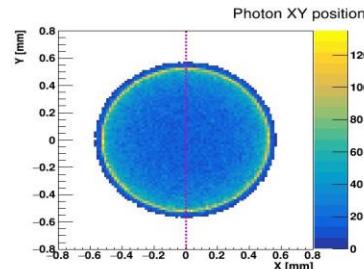
Результаты моделирования



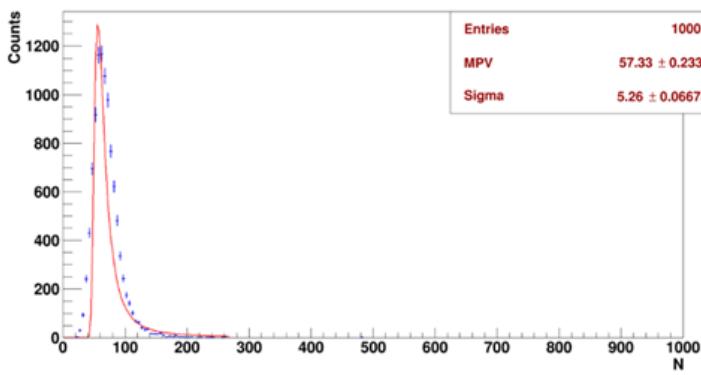
Dzhelepov Laboratory
of Nuclear Problems



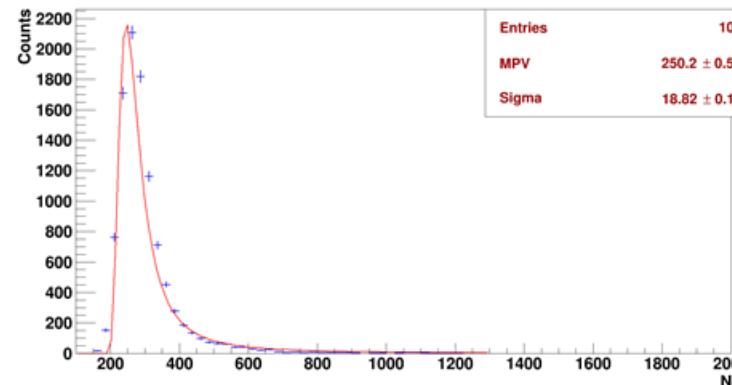
Joint Institute for
Nuclear Research



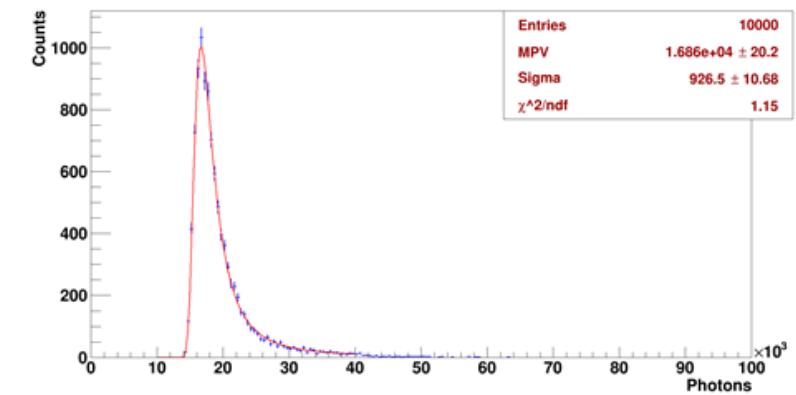
Photon Absorption & WLS Emission



Photon Absorption & WLS Emission

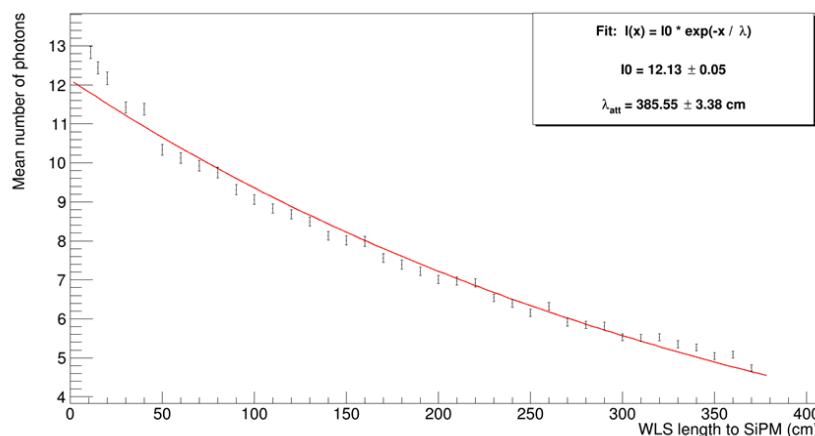
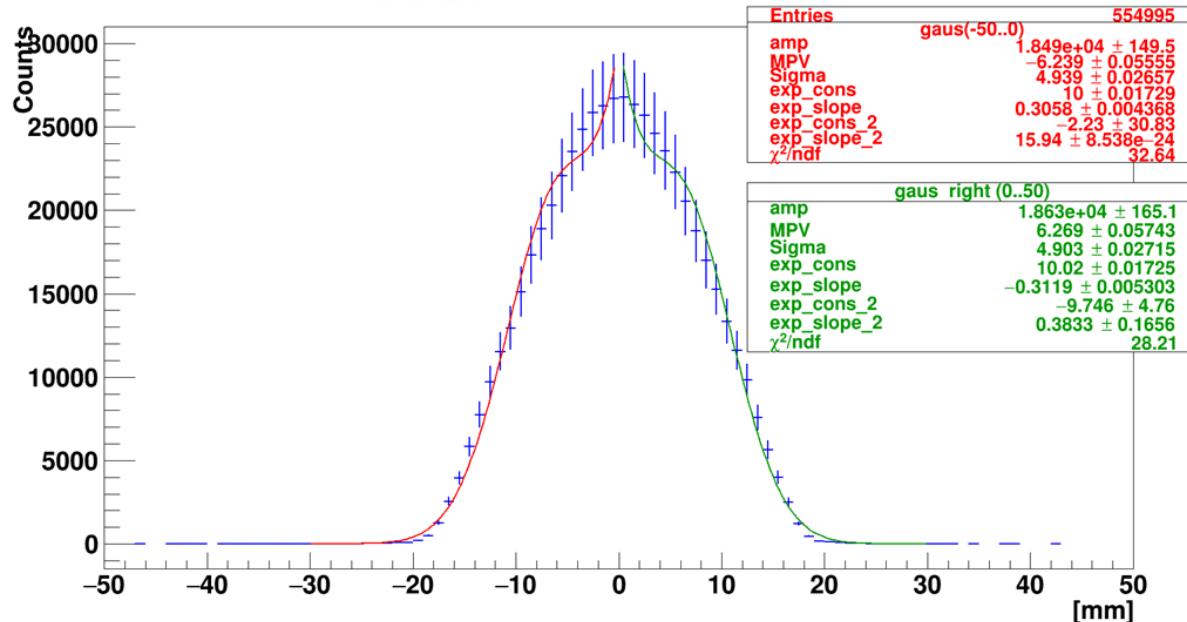
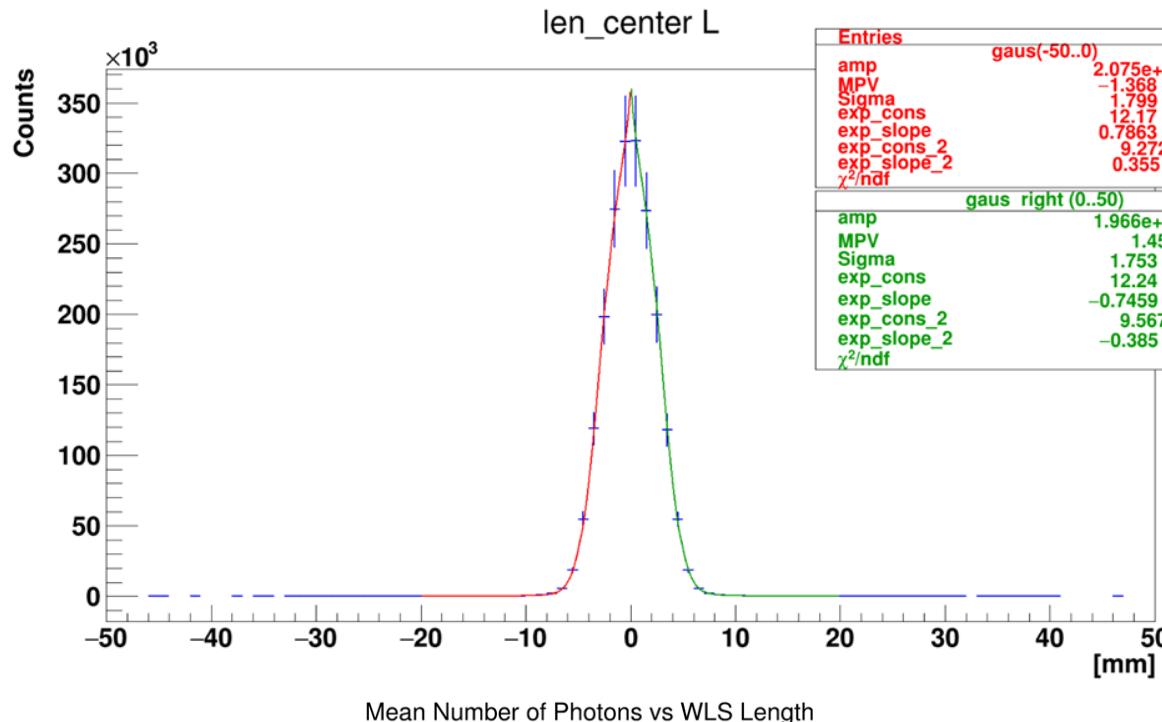


Number of scintillation photons



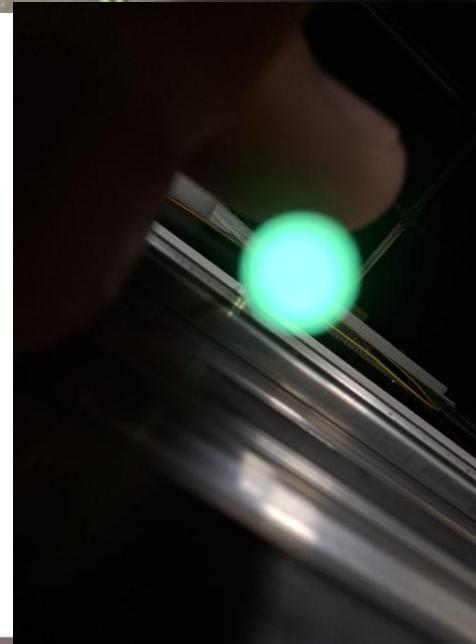
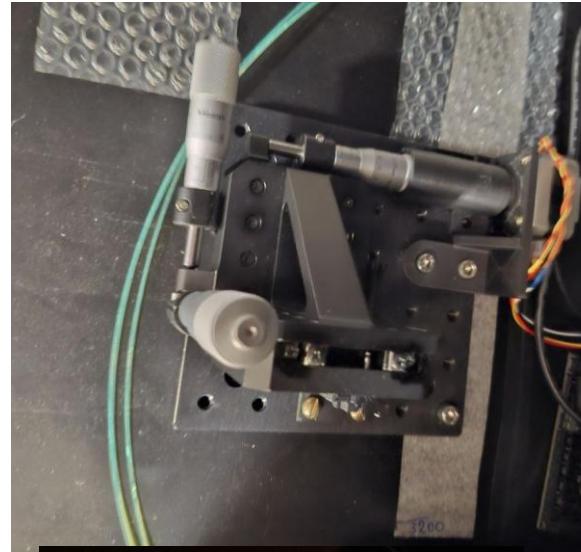
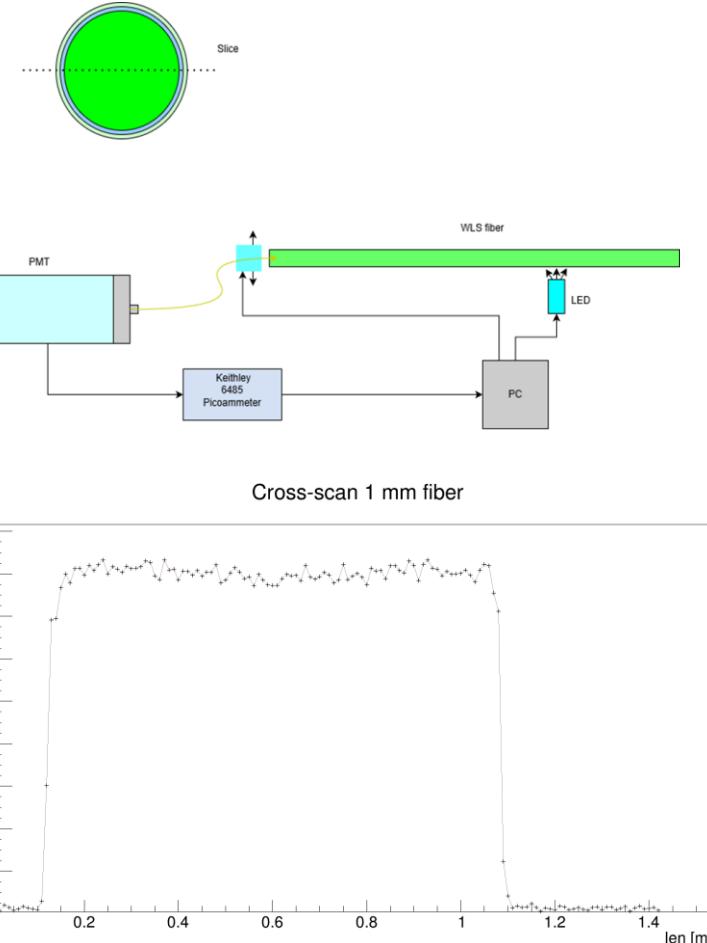
- Получены характеристики светосбора сцинтиляционного стрипа;
- Показано, что число фотонов зависит от положения прохождения мюона;
- Установлено, что свет в WLS-волокне распространяется преимущественно вблизи периферийной области ядра;
- Сделан вывод о повышенной нагрузке на крайние пиксели SiPM

Результаты



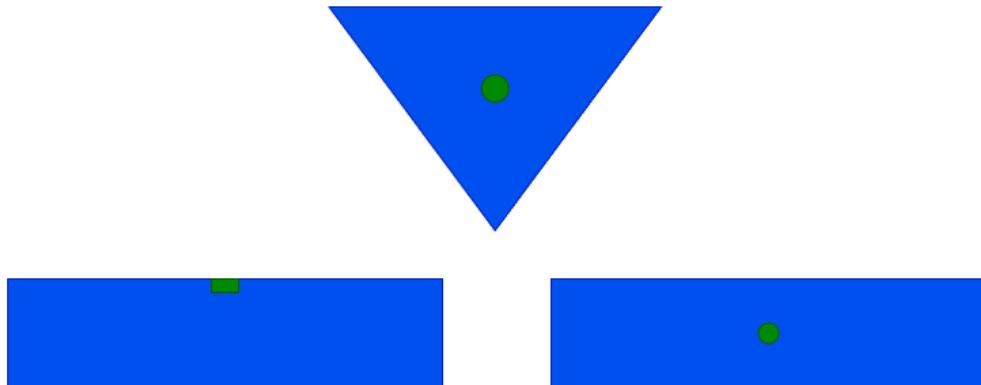
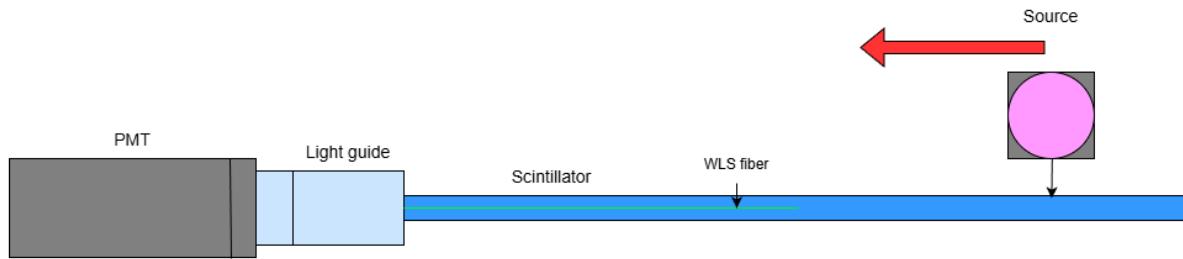
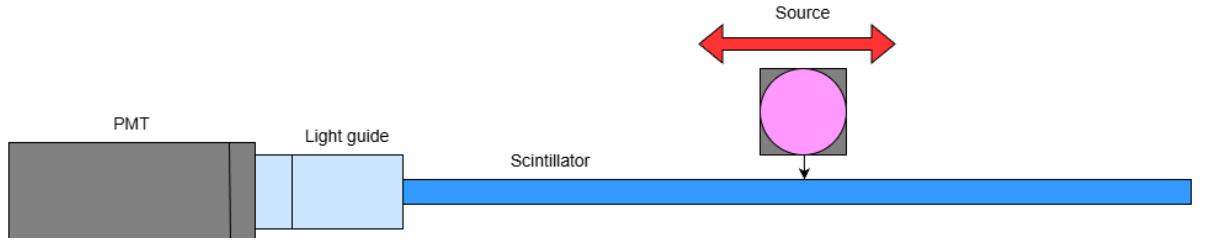
- Определена **длина захвата фотонов** спектросмещающим волокном в зависимости от расстояния до волокна ;
- Исследована **длина затухания света** при транспортировке вдоль WLS-волокна.

Экспериментальная проверка

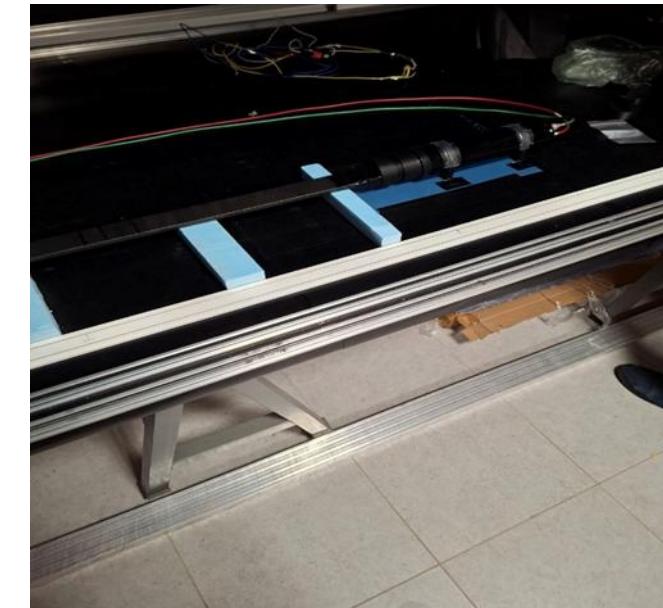


- Разработаны и собираются тестовые стенды;
- Используются сцинтиляционные стрипы с WLS-волокном ;
- Проводится калибровка фотодетекторов;
- Планируется сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

Экспериментальная проверка



Вторая экспериментальная установка предназначена для исследования оптических характеристик сцинтиляционного стрипа и спектросмещающего волокна. На данной установке будут проверяться образцы сцинтиляционных стрипов с интегрированным WLS-волокном. В ходе измерений планируется изучение длины затухания света в сцинтиляторе, а также расстояния захвата сцинтиляционного света спектросмещающим волокном. Полученные экспериментальные данные будут использованы для проверки и уточнения результатов численного моделирования.



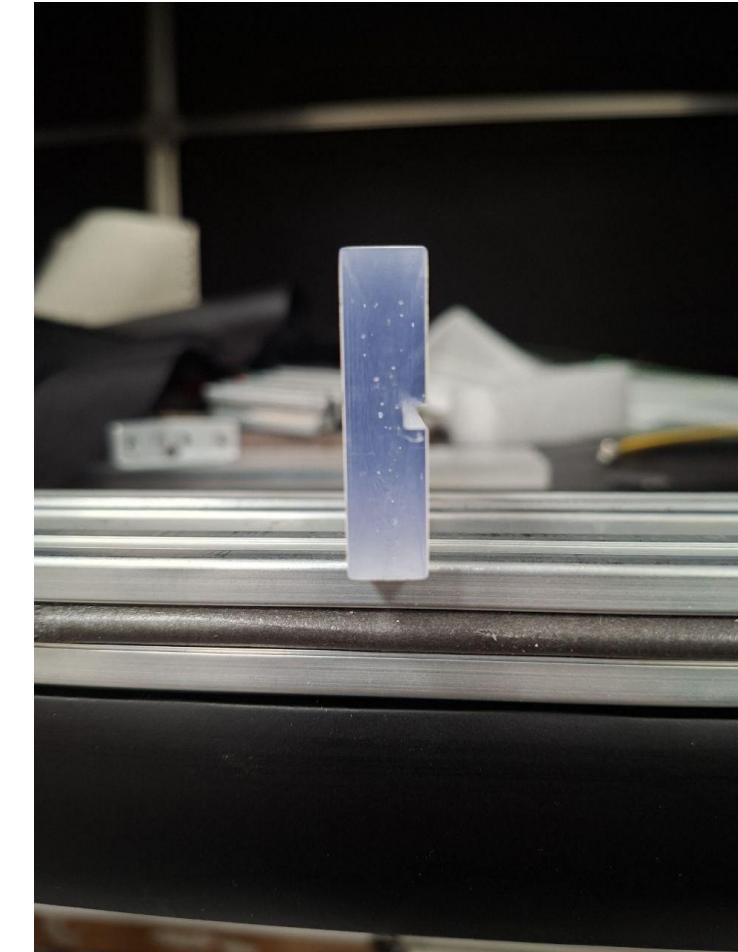
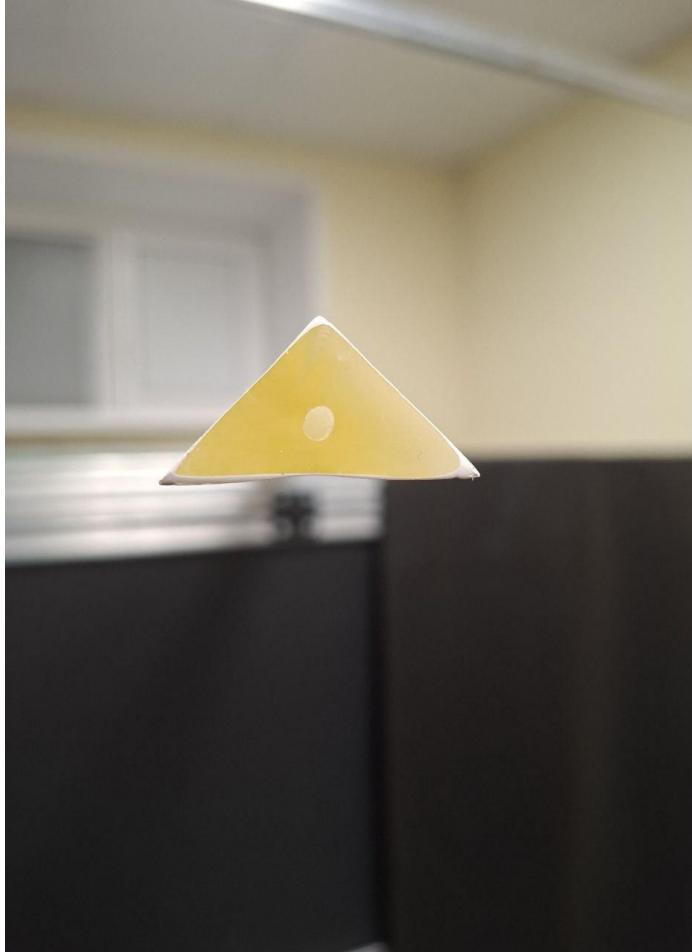
Образцы



Dzhelepov Laboratory
of Nuclear Problems



Joint Institute for
Nuclear Research





Заключение

Выполненная работа позволила изучить процессы генерации, распространения и захвата сцинтиляционного света в сцинтиляционном стрипе с WLS-волокном. Полученные результаты моделирования и экспериментальная программа создают основу для дальнейшей оптимизации детекторных элементов мюонной системы коллайдера СЕРС и продолжения диссертационного исследования.