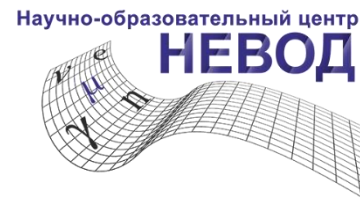


ВККЛ-2020, Москва, Россия, 28.09-02.10 2020 г.  
Секция МН: ID 033



# Моделирование сцинтилляционного годоскопа для метода мюнографии

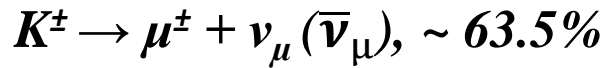
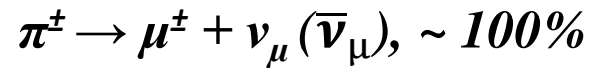
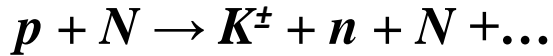
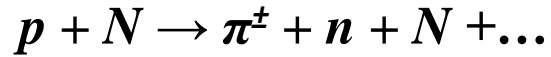
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Аношина Е.С., Дмитриева А.Н., Шутенко В.В., Яковлева Е.И., Яшин И.И.

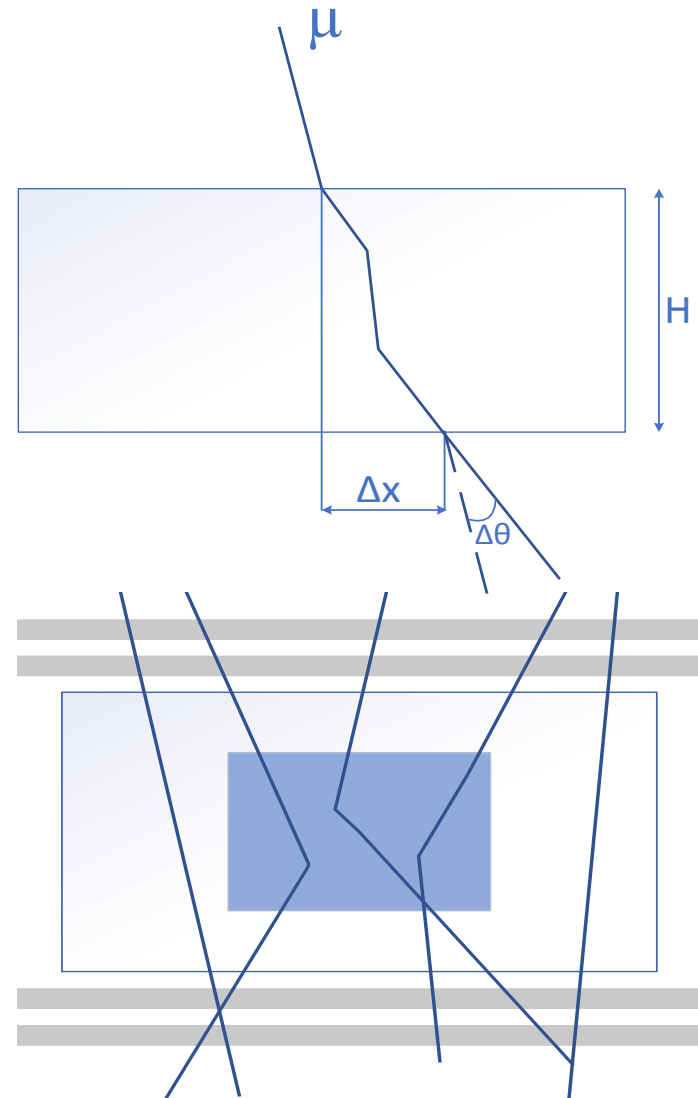
E-mail: [ESAnoshina@mephi.ru](mailto:ESAnoshina@mephi.ru)

Skype: <https://join.skype.com/invite/iHY966aGizKj>

# Мюонная томография



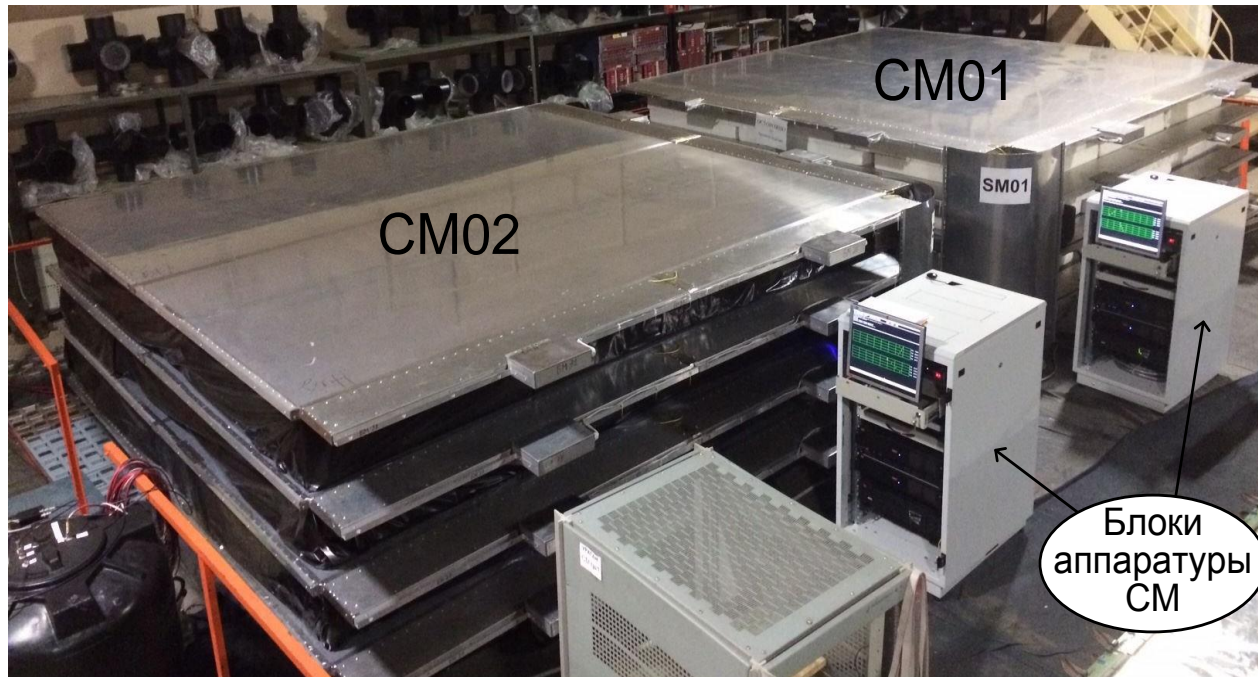
Метод, использующий эффекты, связанные с потерями энергии и рассеянием мюонов в веществе, называется мюонной томографией.



# Детекторы для мюонной томографии

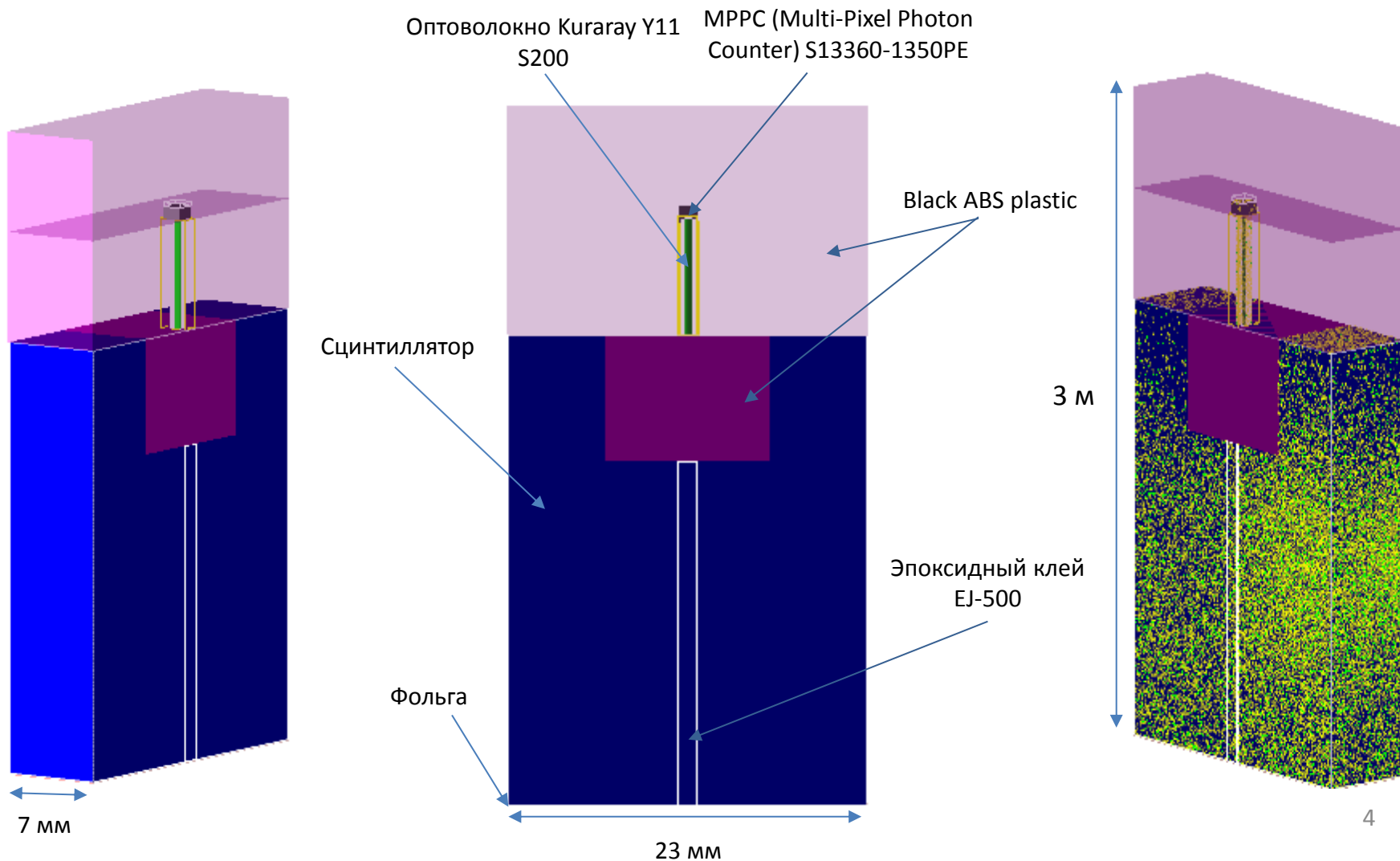
Для регистрации мюонной компоненты используются эмульсионные трековые детекторы, мюонные телескопы (МТ), многонаправленные мюонные телескопы (ММТ) и мюонные годоскопы.

## Сцинтилляционный мюонный годоскоп



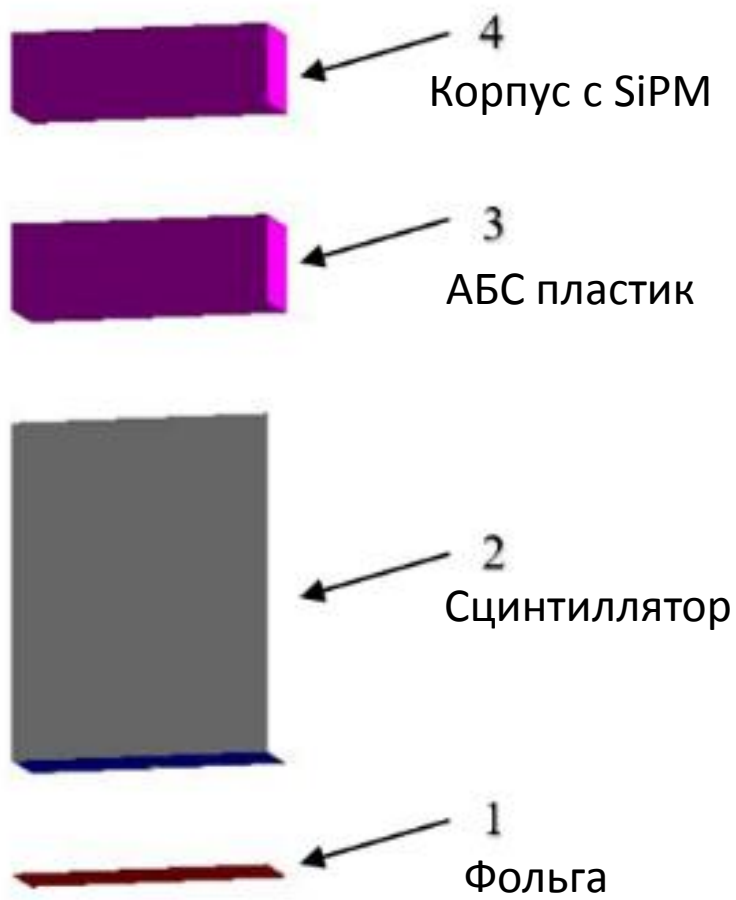
# Общие характеристики модели стрипа

Стрип состоит из сцинтиллятора, покрытого вспененным полистиролом, оптоволокну, вклеенного в сам стрип, и кремниевого фотоумножителя, подвод оптоволокну к которому осуществляется с помощью черного АБС пластика.

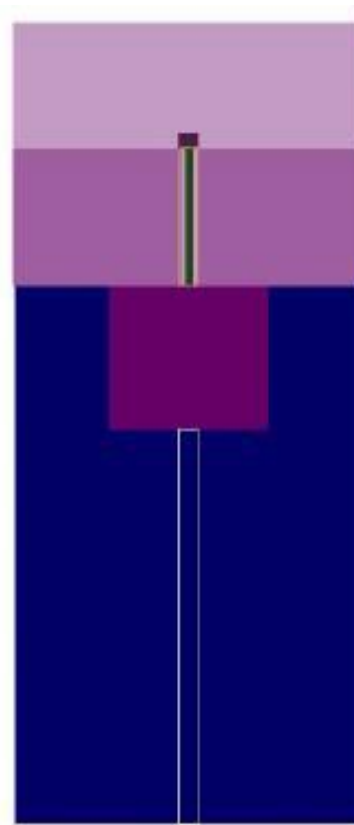


# Геометрия стрипа в программном пакете Geant4

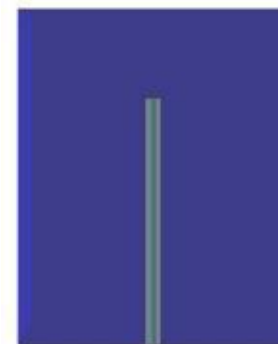
## Логическое разбиение стрипа



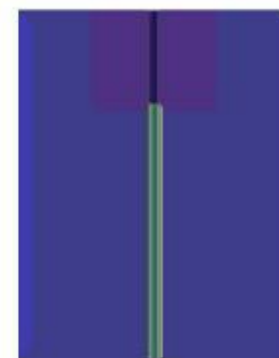
## Этапы создания стрипа



Стрип



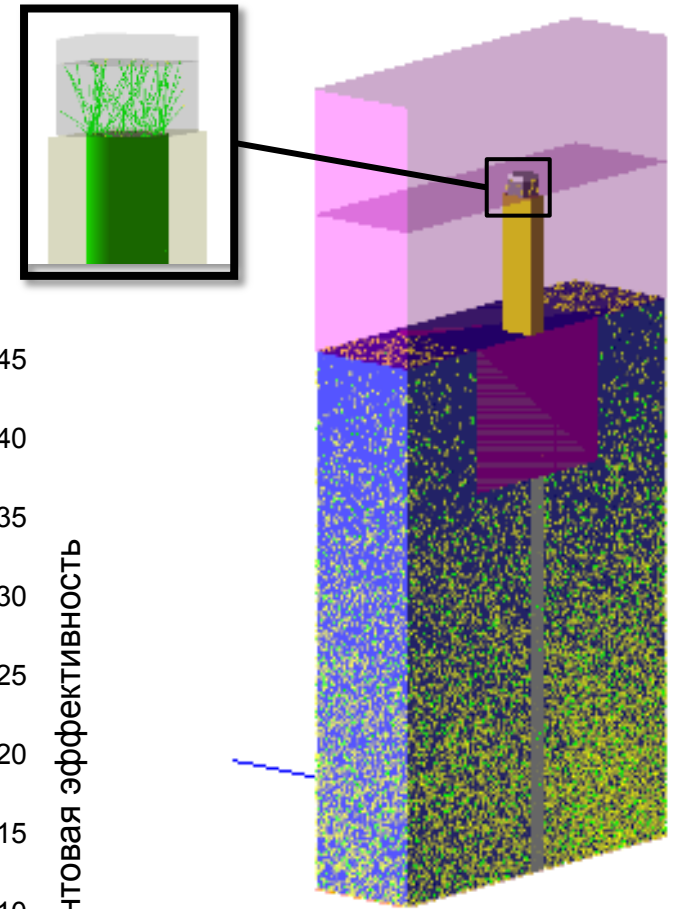
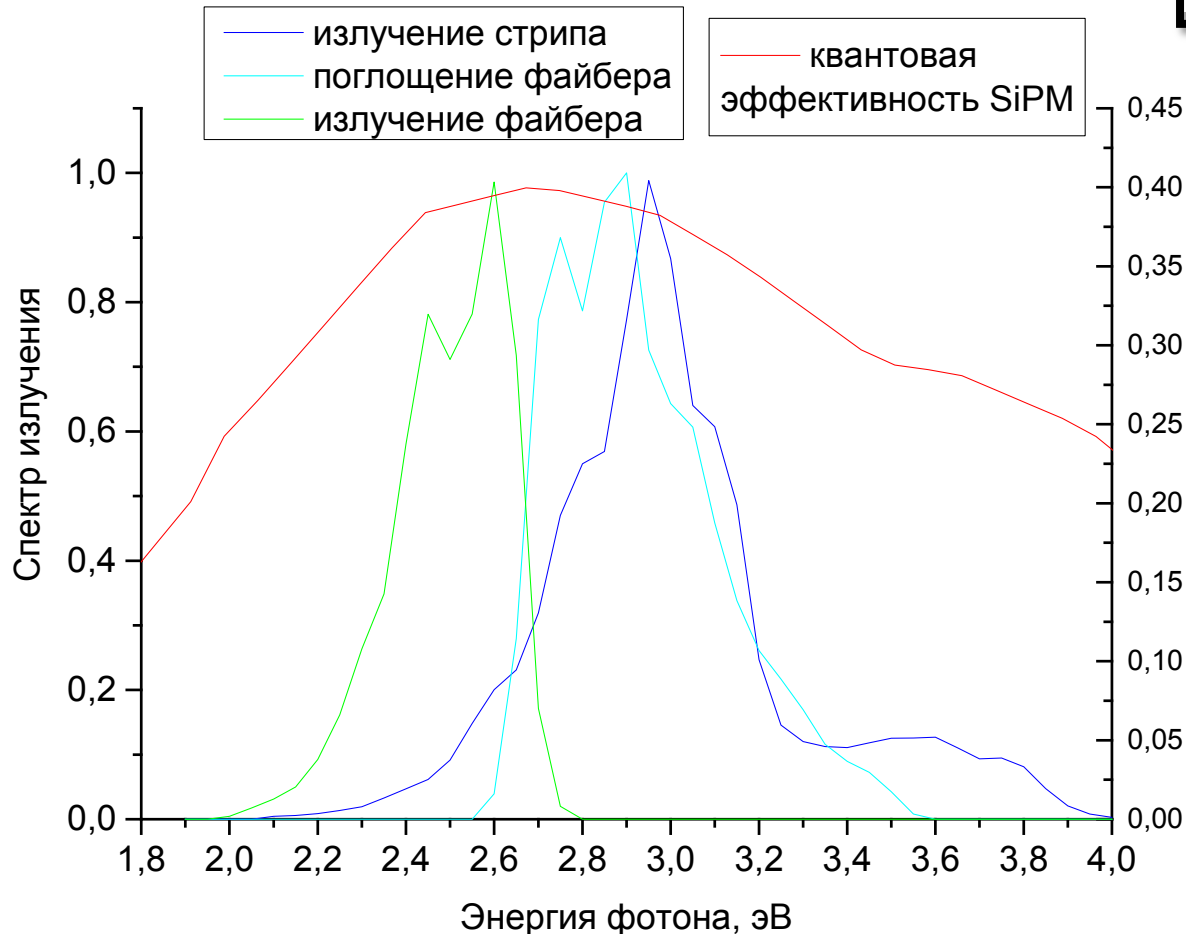
Сцинтиллятор со вклеенным оптоволоконном



Сцинтиллятор со вклеенным оптоволоконном и АБС пластиком

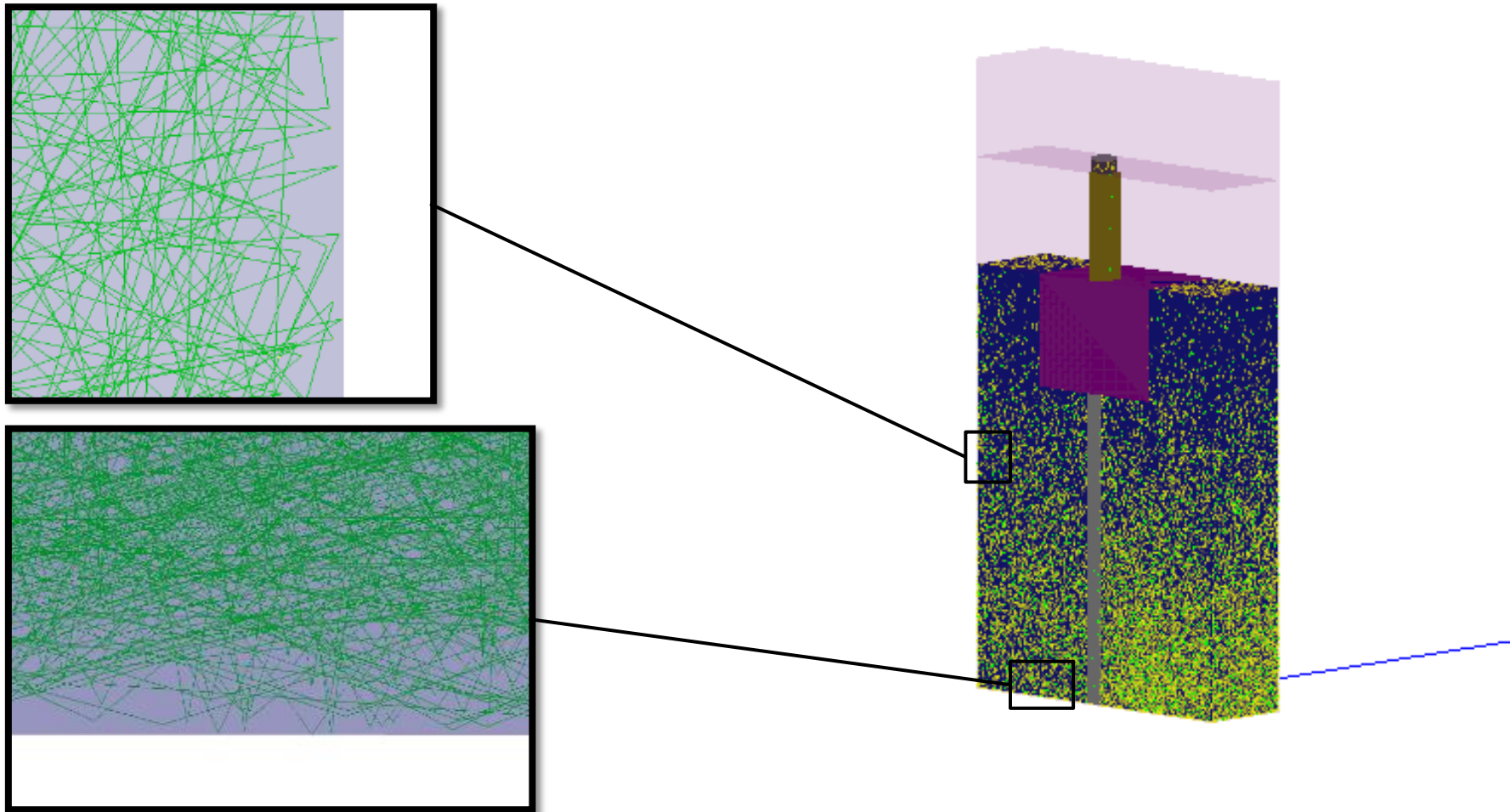
# Подключение оптических свойств стрипа

Большую часть излучения сцинтиллятора поглощает оптоволокно и переизлучает в другом диапазоне энергий. Максимум квантовой эффективности SiPM лежит в том же диапазоне энергий.



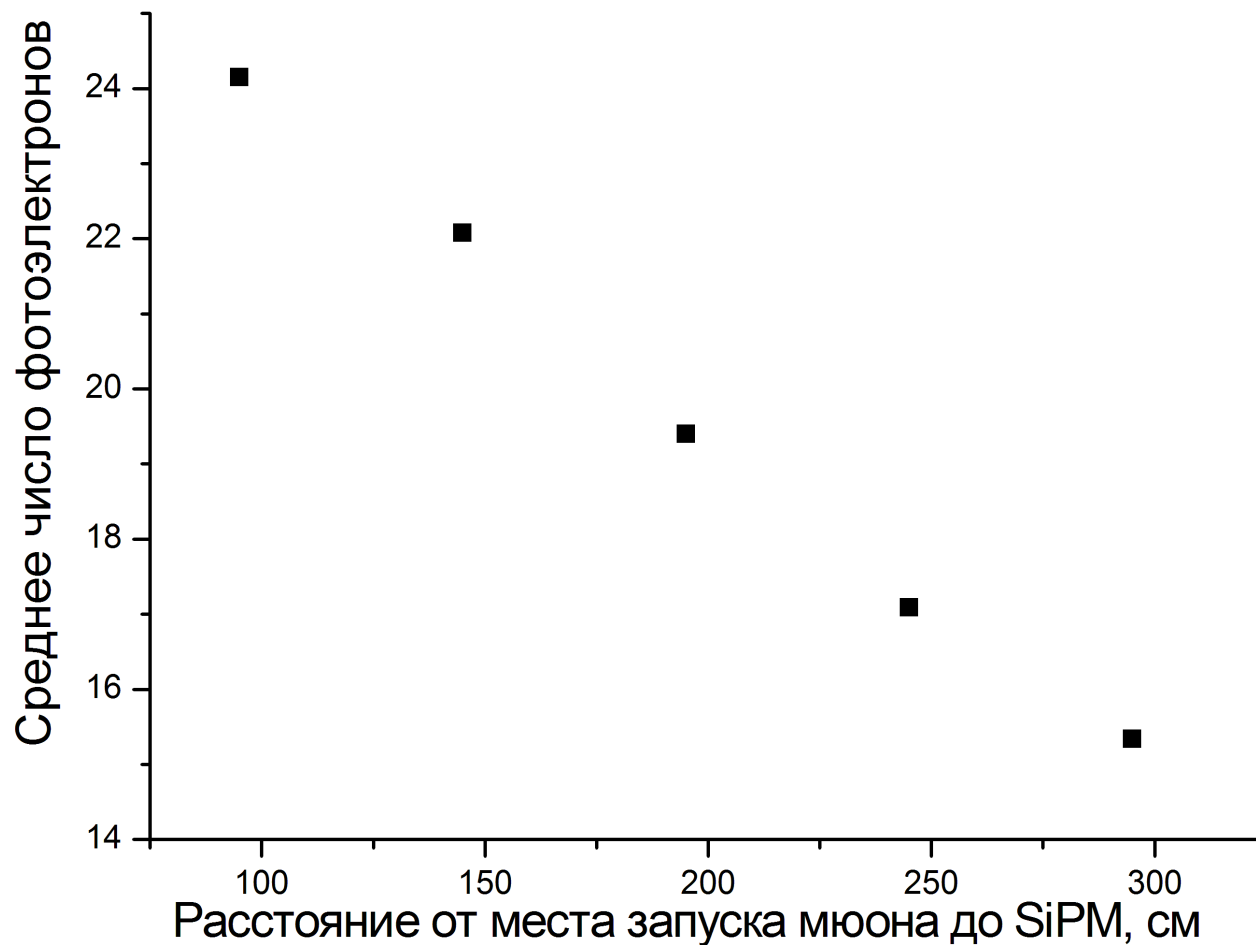
# Подключение оптических поверхностей

Подключены оптические поверхности: диффузное отражение оболочки стрипа и зеркальное отражение нижнего торца стрипа.



# Моделирование отклика SiPM на прохождение частицы

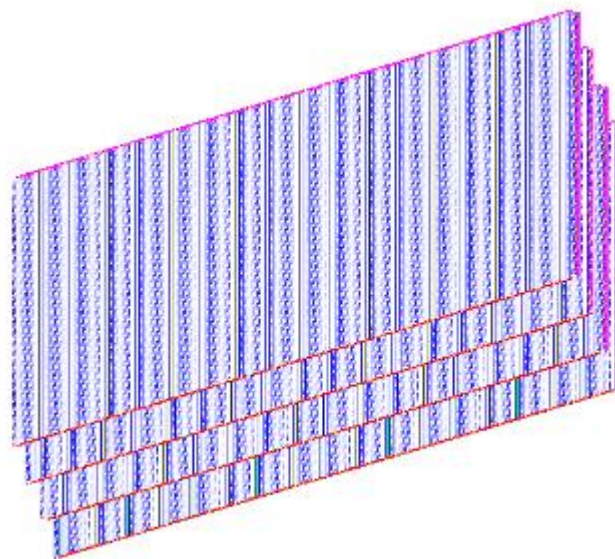
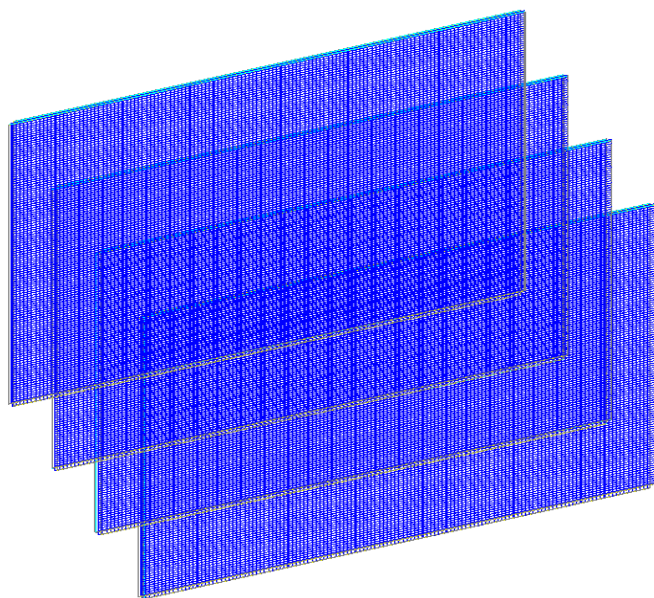
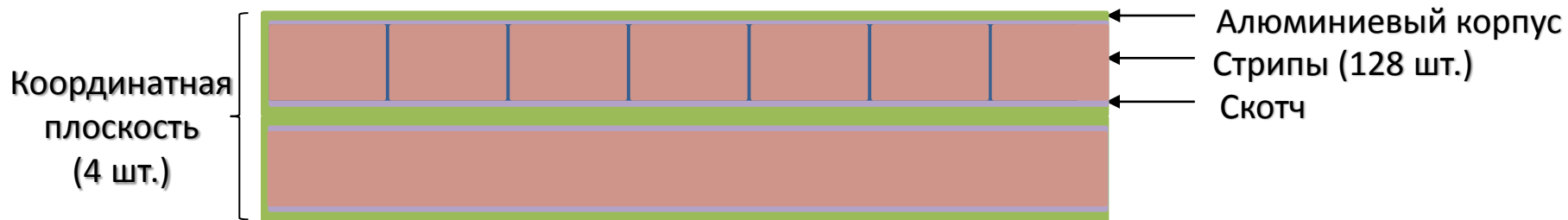
На стрип проводился запуск мюонов энергией 3 ГэВ с шагом 50 см, в каждую точку стрипа запускалось 100 частиц. По результатам запуска промоделирован фотоэффект и построен график зависимости среднего числа выбитых фотоэлектронов от места запуска мюона.





# Геометрия модели сцинтилляционного мюонного годоскопа

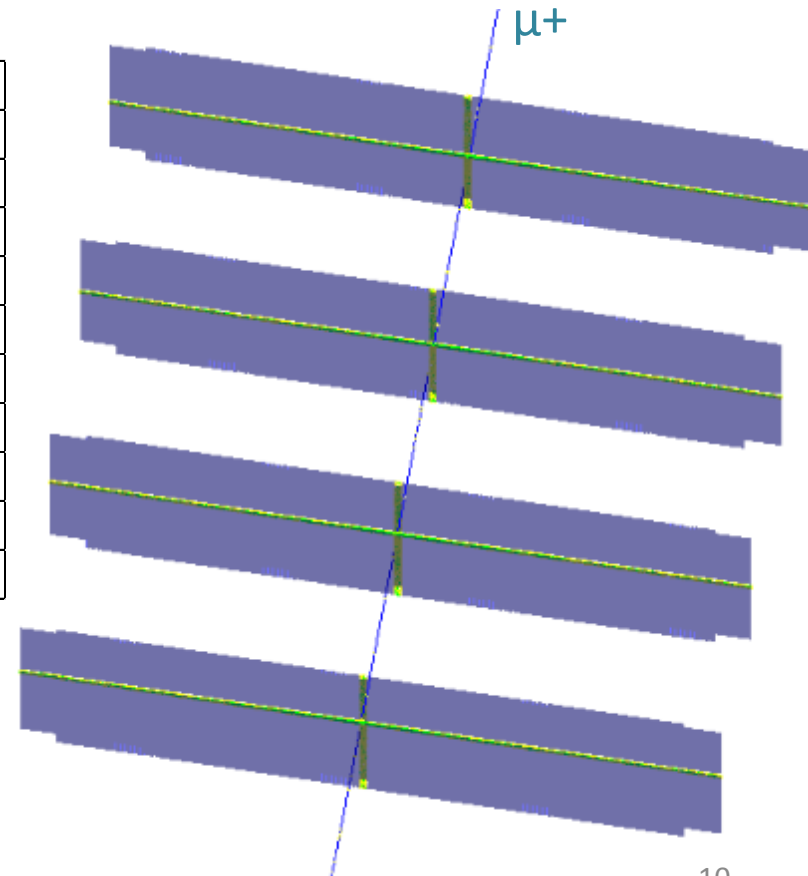
Супермодуль состоит из восьми слоев, каждый слой содержит 128 стрипов, которые расположены внутри специального защитного корпуса и скреплены с помощью двухстороннего скотча. Корпус обеспечивает жесткость, дополнительную светоизоляцию и защиту стрипов от повреждений. Слои накладываются друг на друга перпендикулярно, образуя координатную плоскость. Таким образом, из восьми слоев формируются четыре координатные плоскости. В качестве конечных параметров годоскопа выбраны ширина стрипа 23 мм и расстояние между соседними слоями 65 см.



# Моделирование отклика сцинтилляционного мюонного годоскопа на прохождение частицы

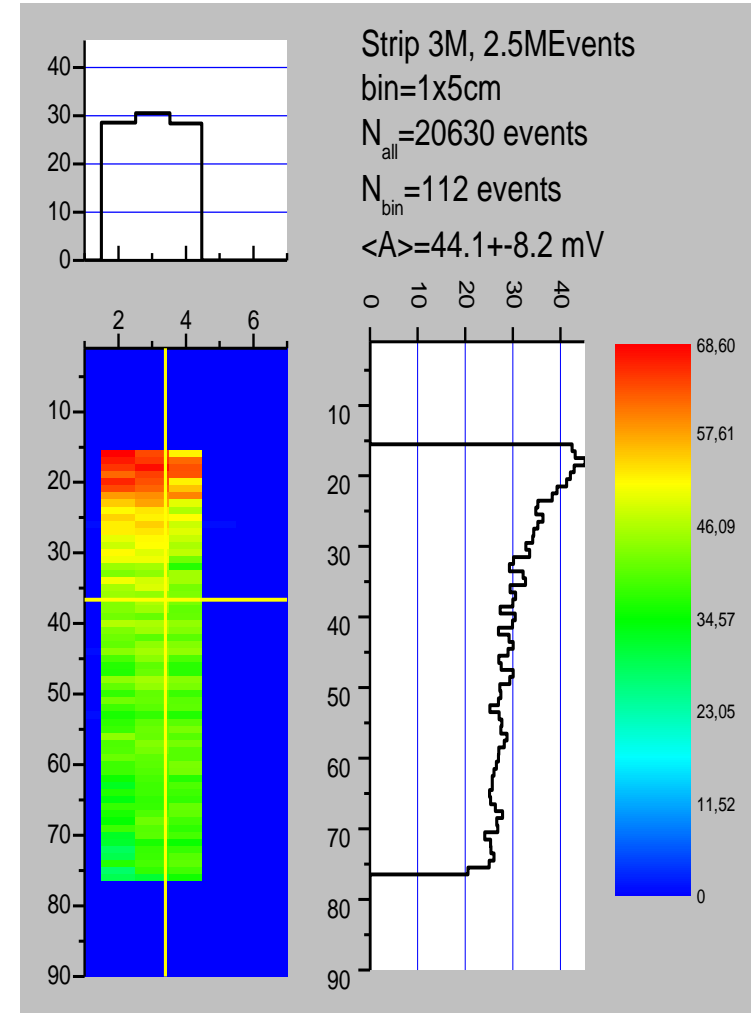
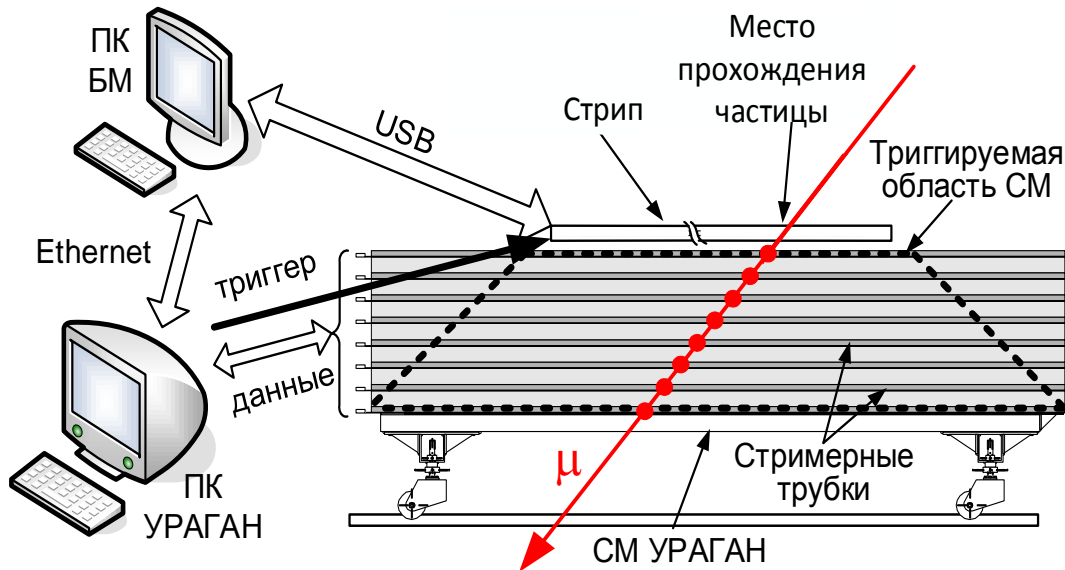
На рисунке изображено прохождение мюона с энергией 3 ГэВ через модель сцинтилляционного мюонного годоскопа. Зеленым цветом светятся сработавшие стрипы. Это подтверждает, что разработанная модель работает корректно.

| Номер слоя | Номер стрипа | Число фотонов | Число фотоэлектронов |
|------------|--------------|---------------|----------------------|
| 7          | 53           | 97            | 37                   |
| 6          | 62           | 22            | 10                   |
| 5          | 53           | 77            | 26                   |
| 4          | 64           | 96            | 33                   |
| 3          | 53           | 151           | 55                   |
| 1          | 53           | 119           | 47                   |
| 0          | 63           | 16            | 4                    |
| 0          | 64           | 143           | 62                   |
| 0          | 63           | 91            | 32                   |
| 0          | 64           | 20            | 5                    |



# Методика калибровки стрипа сцинтилляционного мюонного годоскопа

Проведена калибровка стрипа по экспериментальным данным для того, чтобы повысить точность моделирования. Для исследования зависимости средней амплитуды срабатывания SiPM от расстояния между SiPM и местом прохождения мюона стрип помещается на верхнюю поверхность супермодуля УРАГАН.



# Калибровка стрипа по экспериментальным данным

Итоговые параметры стрипа для моделирования:

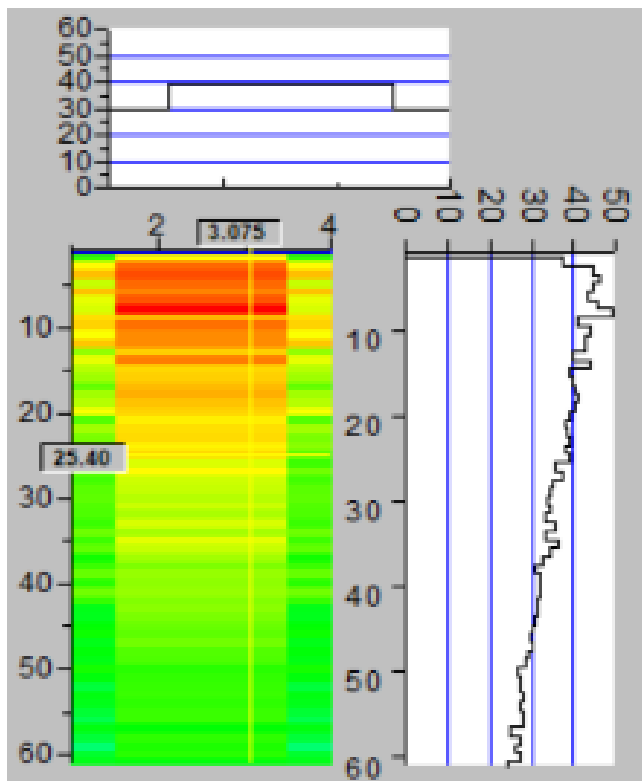
1) световойход 11500/МэВ

2) длина поглощения 10 см

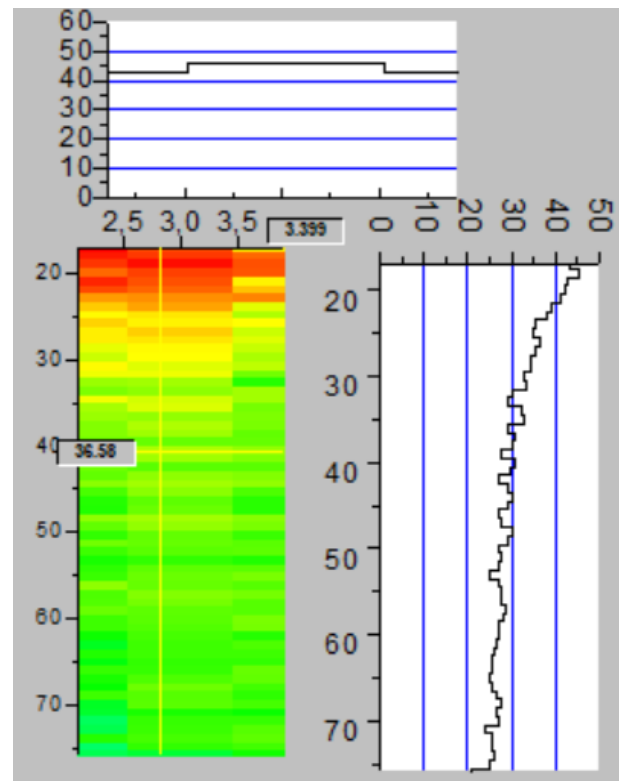
3) отражение от внутренней поверхности стрипа 0.98

4) отражение от фольги 0.98

## Моделирование



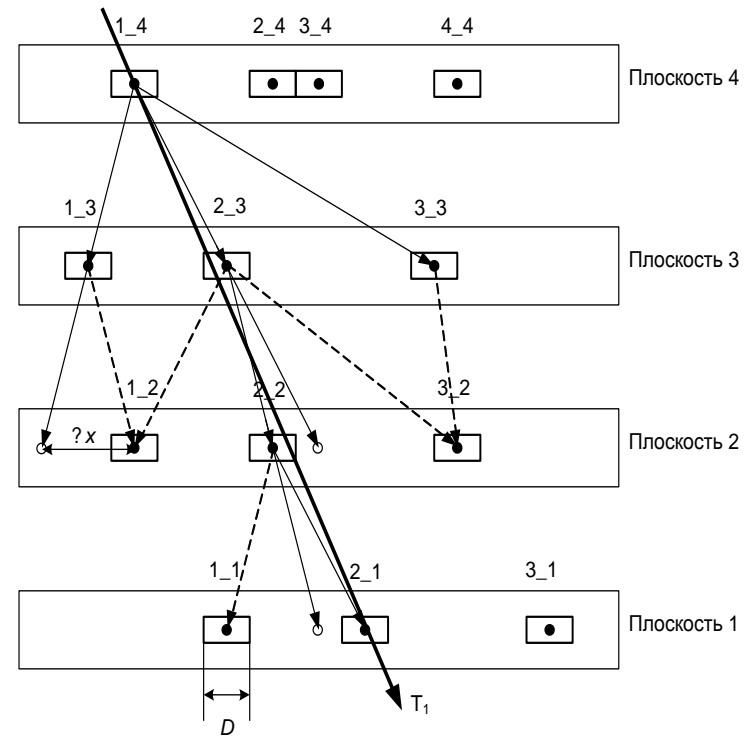
## Эксперимент



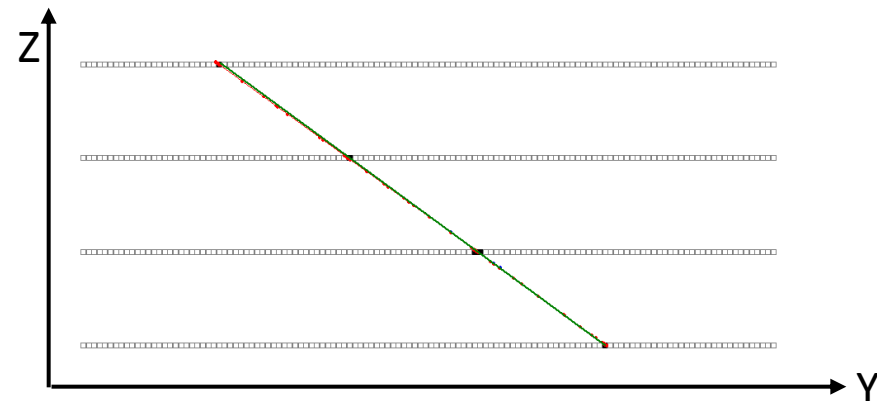
# Программа реконструкции треков мюонов

Программа on-line реконструкции треков прорисовывает координаты прохождения частицы, реконструированный трек по данным сработавших стрипов (по методу “прямолинейного” участка) красным цветом, и реальный трек, полученный путем применения метода наименьших квадратов (МНК) к точным координатам прошедшей частицы, зеленым цветом.

## Метод прямолинейности

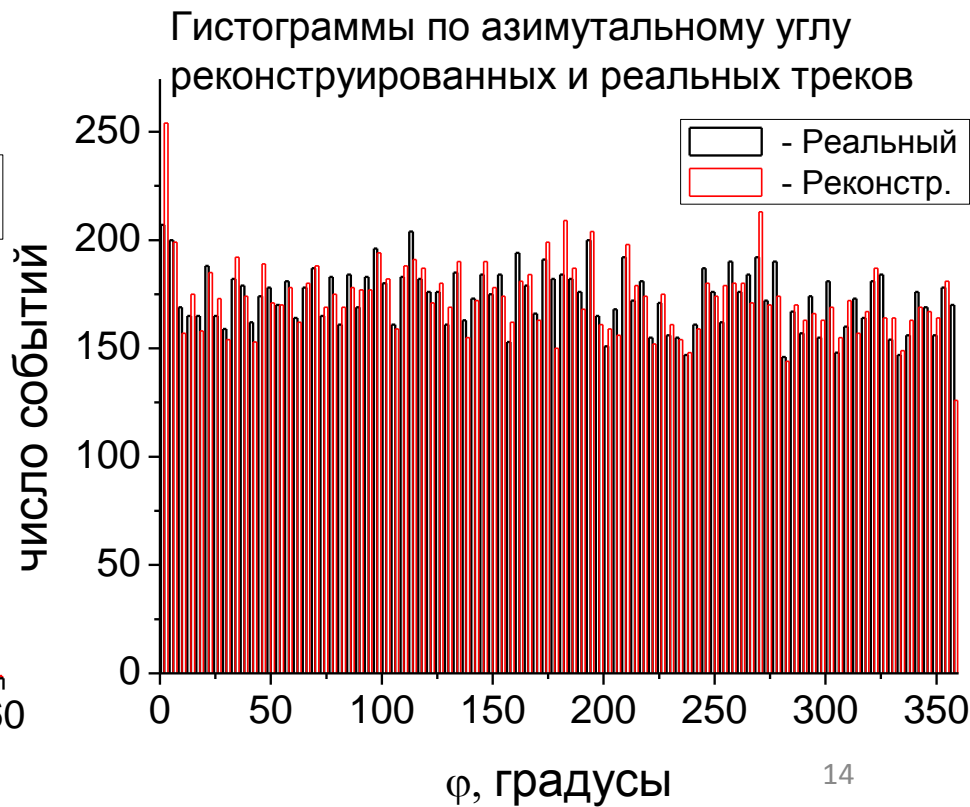
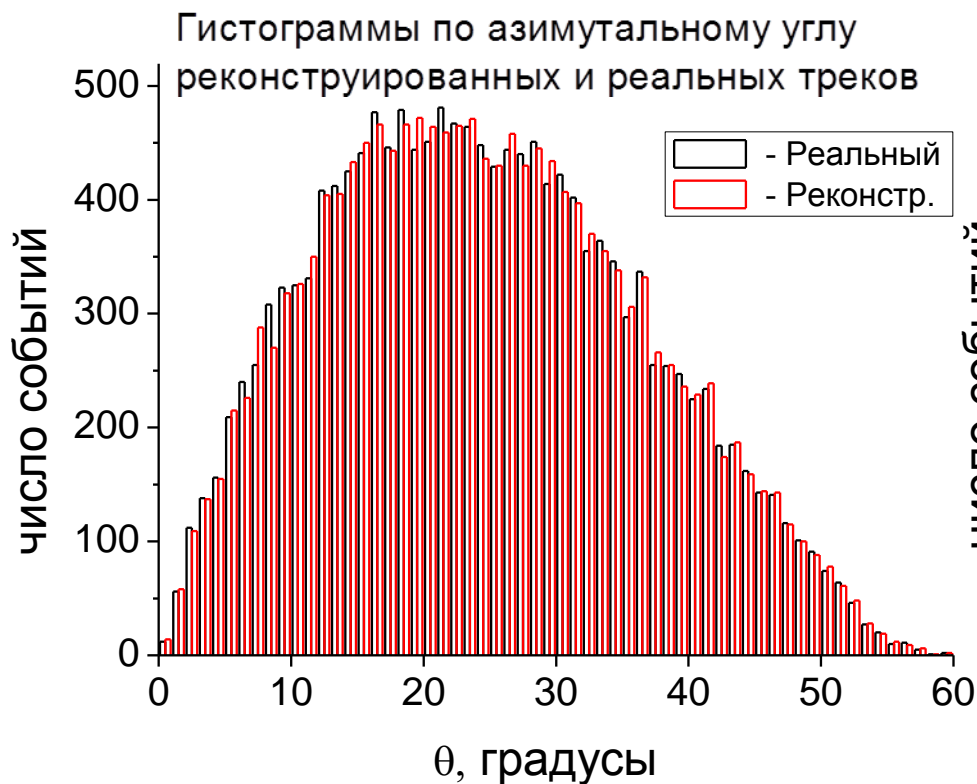


## Пример восстановления трека мюона



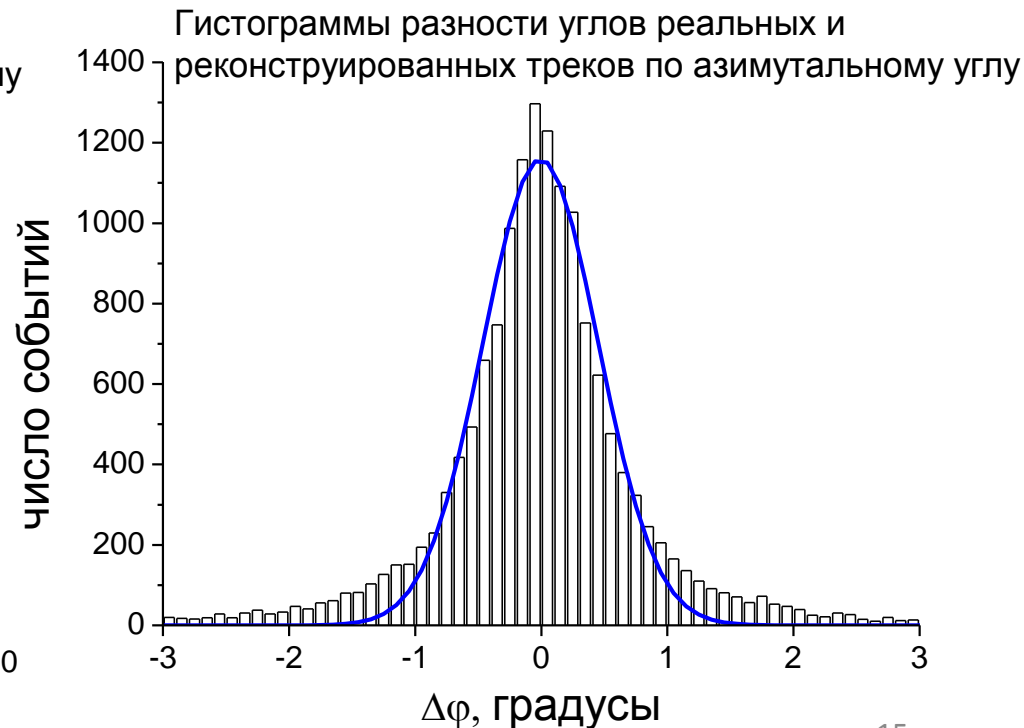
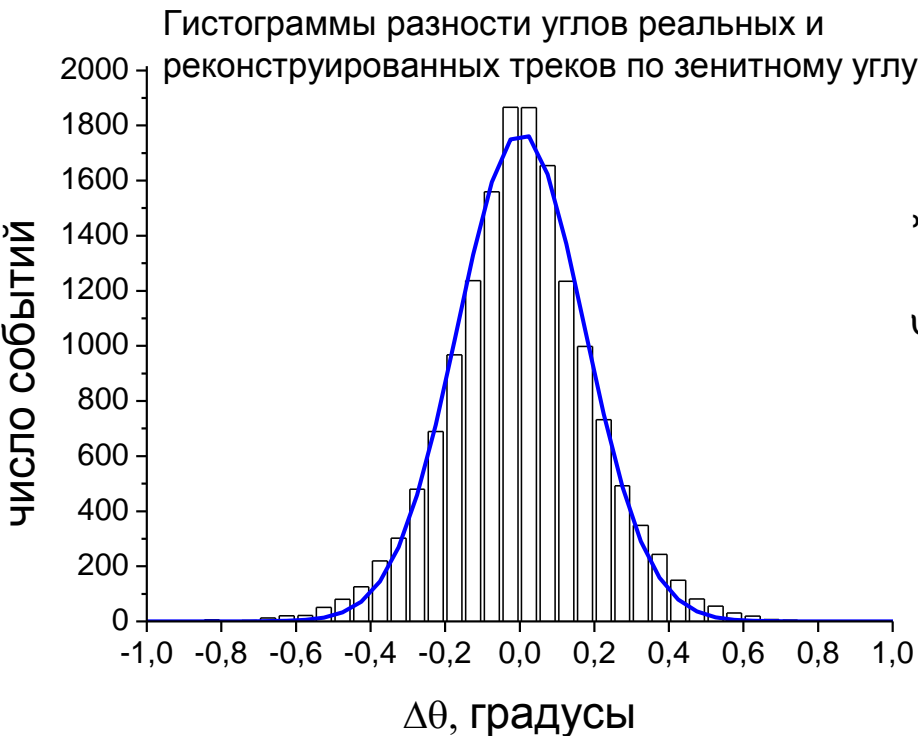
# Определение точности и эффективности реконструкции треков мюонов

Для зенитных  $\vartheta$  и азимутальных  $\varphi$  углов реальных и реконструированных треков построены гистограммы. Для гистограммы по зенитным углам шаг составляет 1 градус, по азимутальным - 4 градуса. Видно, что число реконструированных треков практически совпадает с числом реальных треков.



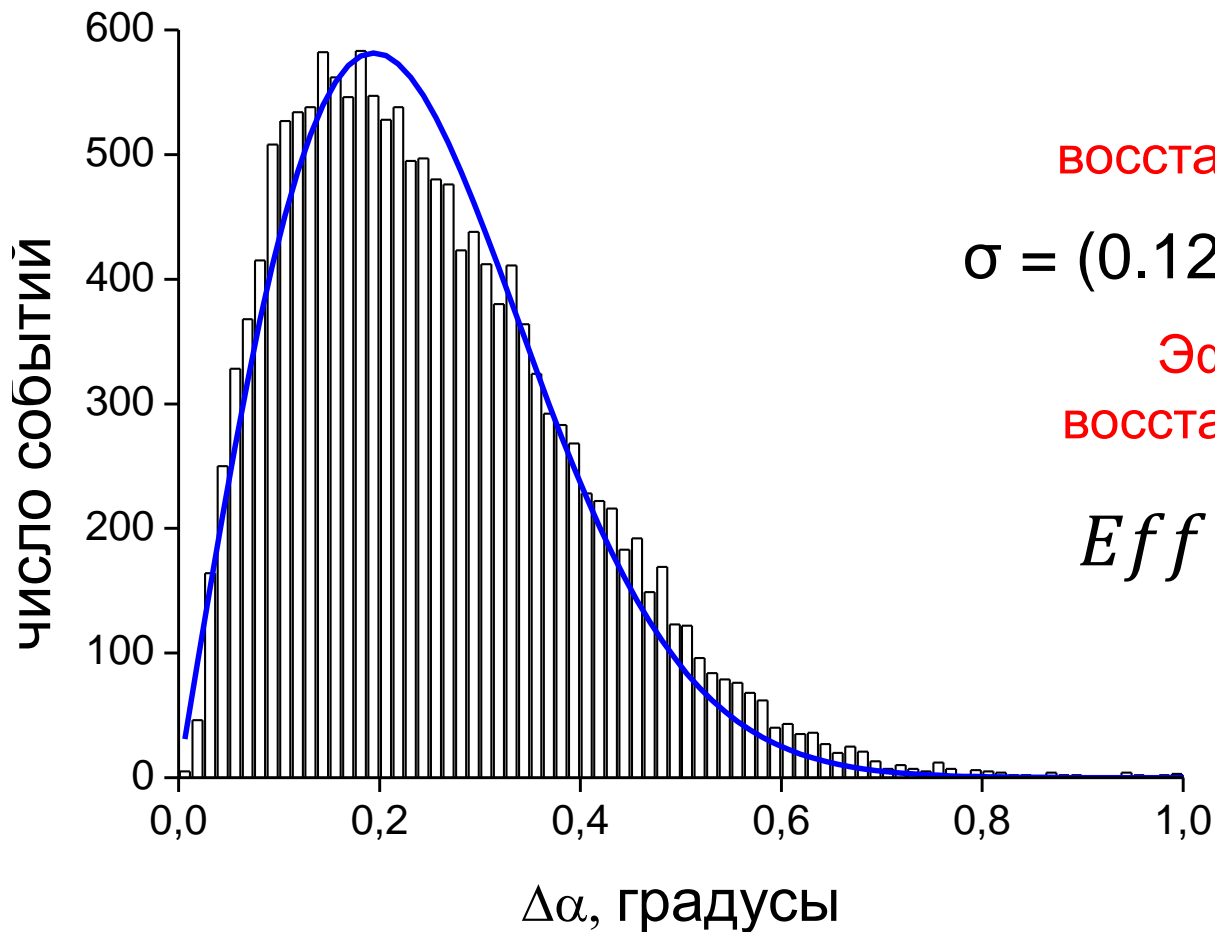
# Определение точности и эффективности реконструкции треков мюонов

Построены распределения событий по разности азимутальных углов  $\Delta\varphi$  с шагом 0.1 градуса и зенитных углов  $\Delta\vartheta$  с шагом 0.05 градуса для реальных и реконструированных треков. Синяя линия – фитирование Гауссом. Видно, что гистограммы близки к распределению Гаусса.



# Определение точности и эффективности реконструкции треков мюонов

На рисунке приведена гистограмма углов  $\Delta\alpha$  между восстановленным и реальным треками. Синяя линия на гистограмме – это фитирование распределением Релея. Точность восстановления треков определяется среднеквадратичным отклонением  $\sigma$ .



Точность  
восстановления треков

$$\sigma = (0.127 \pm 0.008) \text{ градуса}$$

Эффективность  
восстановления треков

$$Eff = \frac{N_{rec}}{N_{real}} \sim 90\%$$



# Заключение

1. Создана модель стрипа в программном пакете Geant4, подключены физические и оптические процессы, проверена достоверность полученной модели.
2. Создана модель сцинтилляционного мюонного годоскопа и промоделирован отклик МГ на прохождение мюонов с энергией 3 ГэВ.
3. Разработанная модель стрипа откалибрована по экспериментальным данным, полученным на мюонном годоскопе УРАГАН. Подобраны оптимальные параметры модели стрипа и уточнена созданная модель сцинтилляционного мюонного годоскопа.
4. Оценена эффективность и точность регистрации мюонов сцинтилляционным мюонным годоскопом. Погрешность восстановления углов прохождения треков составляет менее одного градуса, а эффективность восстановления треков мюонов составляет около 90%.

Спасибо за внимание!