



# Реконструкция частиц в мюонной системе установки SPD

Аспирант группы A25-102: Осетров Александр Олегович

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Солдатов Евгений Юрьевич

Научный консультант: к.ф.-м.н. Верхеев Александр Юрьевич

Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ», г. Москва, 2026



# Актуальность работы

Актуальность настоящего исследования обусловлена следующими ключевыми факторами:

- Отсутствие готовых решений: Для проектируемой мюонной системы SPD в настоящее время не существует готовых алгоритмов обработки данных, реконструкции треков и идентификации мюонов, валидированных в условиях, адекватных реальному эксперименту.
- Расширение функциональности системы: Помимо основной задачи идентификации мюонов, рассматривается возможность использования мюонной системы в качестве грубого адронного калориметра, в том числе для регистрации нейтронов.
- Требования к производительности: Высокий ожидаемый поток данных в эксперименте SPD предъявляет жёсткие требования к вычислительной эффективности алгоритмов реконструкции.

# Цель и задачи работы

Комплексное моделирование мюонной системы детектора SPD с использованием программной среды SPDGeoModel и последующая разработка алгоритмов программного обеспечения для решения ключевых задач обработки данных этой системы.

В задачи работы входит:

- Моделирование геометрии мюонной системы SPD в среде SPDGeoModel.
- Моделирование прохождения частиц через детектор и изучение его отклика.
- Разработка и тестирование алгоритмов реконструкции треков мюонов.
- Разработка методов идентификации мюонов.
- Оценка эффективности реконструкции, точности измерений и способности подавления фона на основе анализа результатов моделирования.
- Исследование возможности применения системы в целях калориметрии и регистрации нейтронов и разработка соответствующего инструментария.

# Эксперимент SPD

Цель эксперимента - изучение спиновой структуры протона и дейтрона и других спиновых явлений в столкновениях поляризованных p-p, d-d и p-d пучков с  $\sqrt{s} = 27$  ГэВ и светимостью порядка  $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

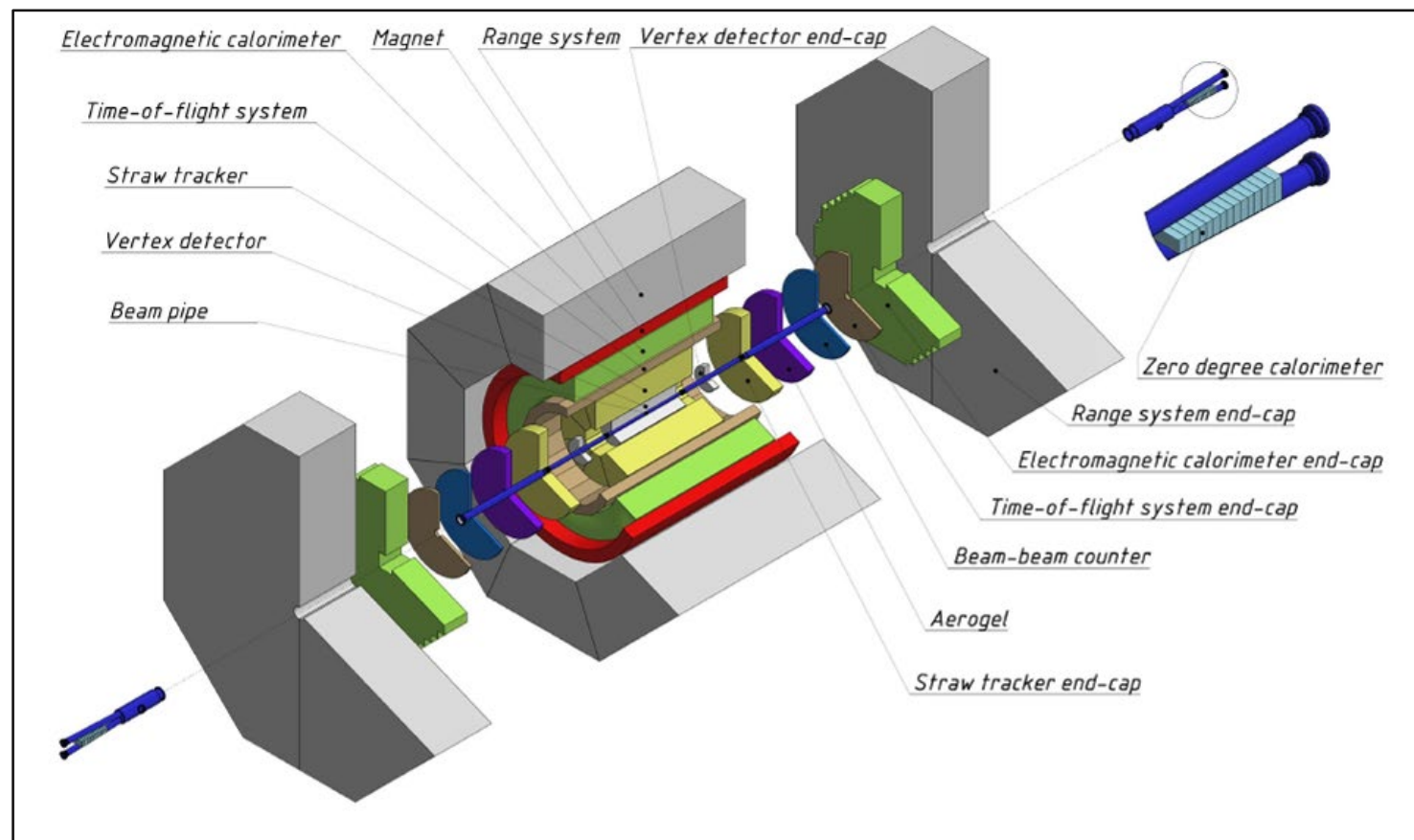


Рис. 1 Общая схема установки SPD

# Мюонная система

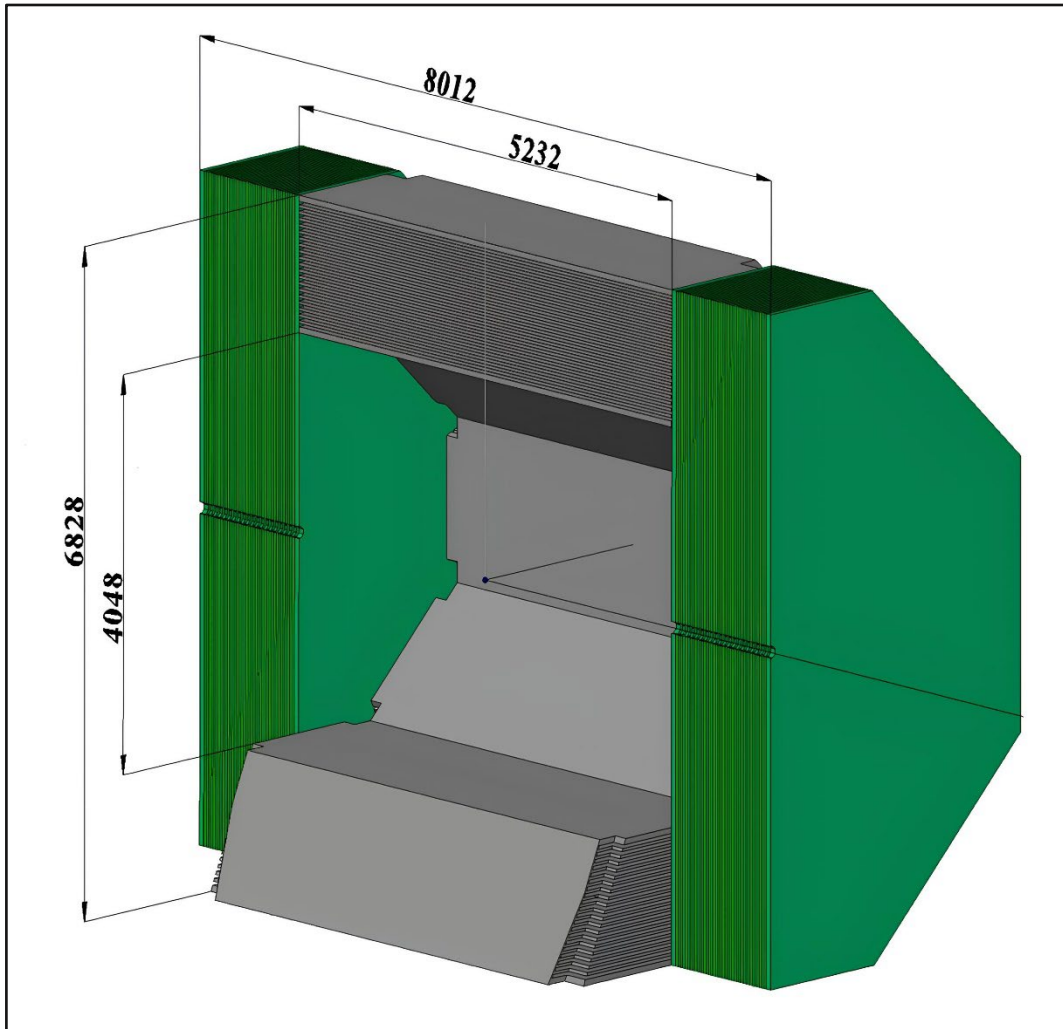


Рис. 2 Схематичный вид мюонной системы

- Идентификации мюонов в присутствии значительного адронного фона и оценки энергии адронов (грубая адронная калориметрия).
- Состоит из восьмимодульного барреля и двух торцевых дисков.
- В межслоевые зазоры помещаются Mini Drift Tubes (MDT) детекторы и считывающая электроника.

# MDT детектор

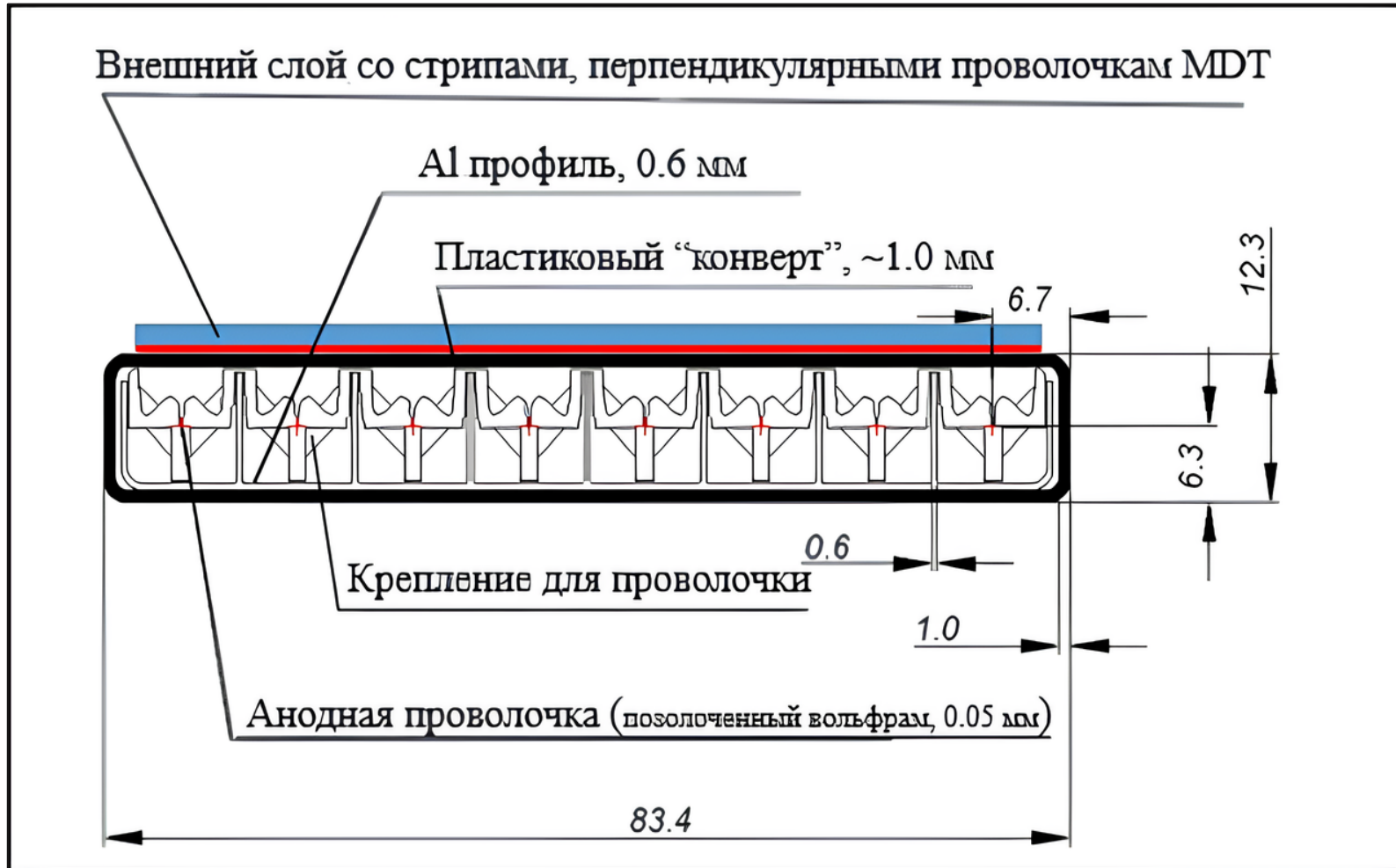
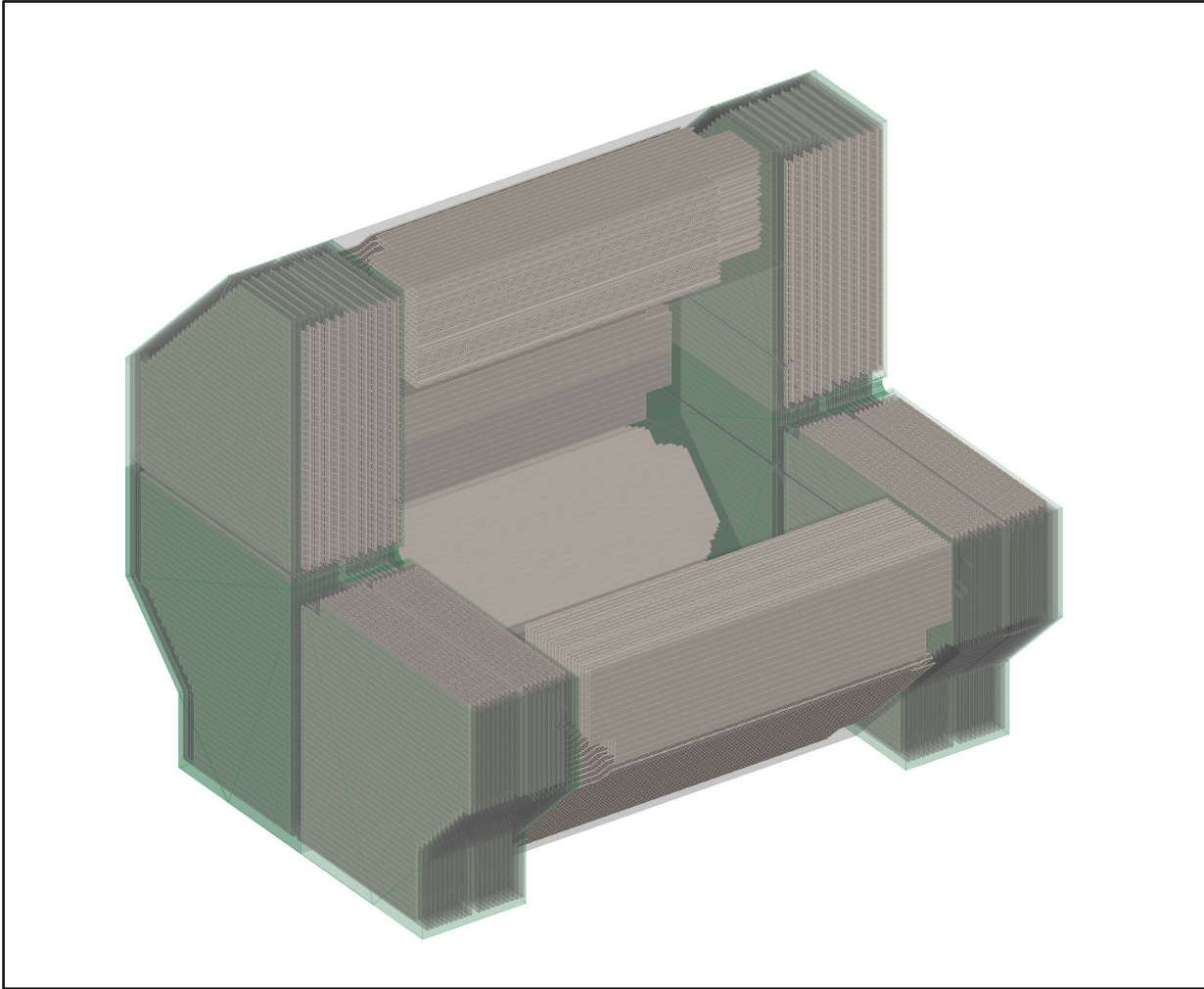


Рис. 3 Поперечное сечение детектора MDT

- Состоит из металлического катода (алюминиевый гребенчатый профиль из 8 ячеек), анодных проволочек и пластиковой оболочки (норил) для газонепроницаемости.
- Перпендикулярная стриповая плоскость вместе с системой анодных проволочек дают две координаты прохождения частицы.

# Геометрическая модель RS SPD



## Баррель:

- Восьмиугольная воздушная призма, внутри - 8 трапецеидальных железных модулей
- В каждом модуле 20 воздушных детекторных слоёв (35 мм)
- В слоях - дрейфовые трубки MDT (шаг 1.6 мм)
- Чувствительный объём: 8 газовых ячеек Ar+CO<sub>2</sub> (70/30) в трубке

## Эндкапы:

- Воздушная оболочка с одним железным модулем
- 20 детекторных слоёв (35 мм), ступенчатая апертура пучка, рёбра жесткости
- MDT идентичны баррельным

## Технологические особенности

- Верхний модуль барреля: слот под криогенную подсистему
- Боковые зазоры для кабелей

Рис. 4 Геометрическая модель мюонной системы SPD

# Степы, МС и детекторные хиты

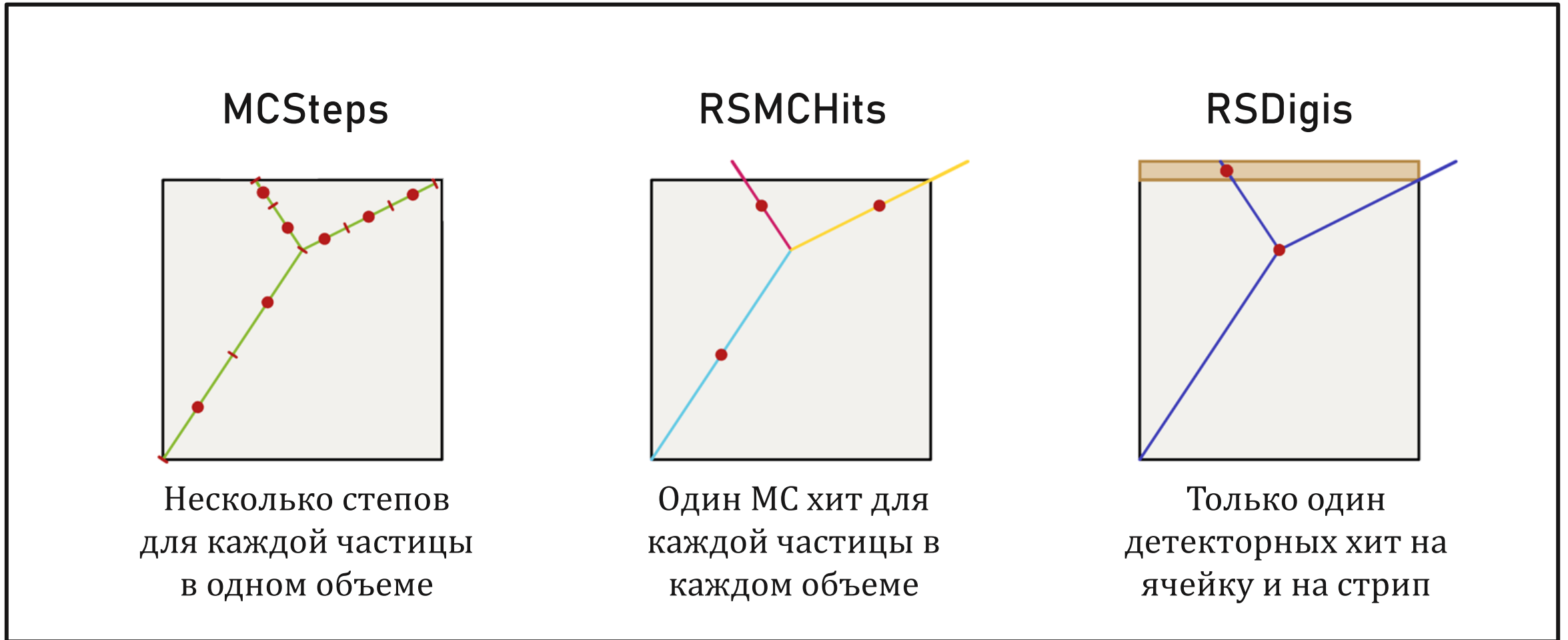


Рис. 5 Визуализация отличий степов, МС и детекторных хитов

# Монте-Карло хиты

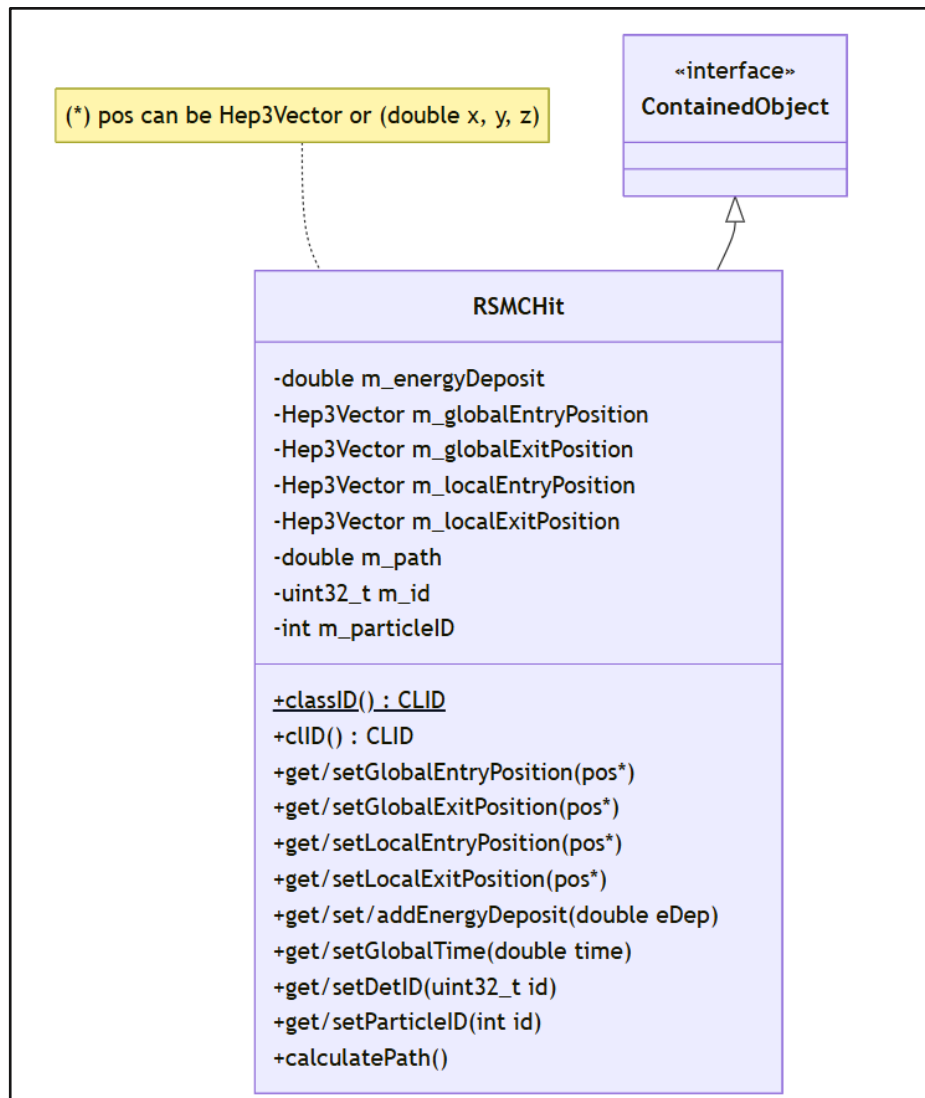


Рис. 6 UML-диаграмма класса RSMCHit

Что хранится в МС хите:

- Энерговывделение
- Глобальные и локальные координаты точек входа в ячейку и выхода из ячейки
- Путь частицы в ячейке
- Уникальный и неуникальный идентификаторы (particle id & track id)

Эта информация необходима для формирования детекторного хита (RSDigi)

# Детекторные хиты

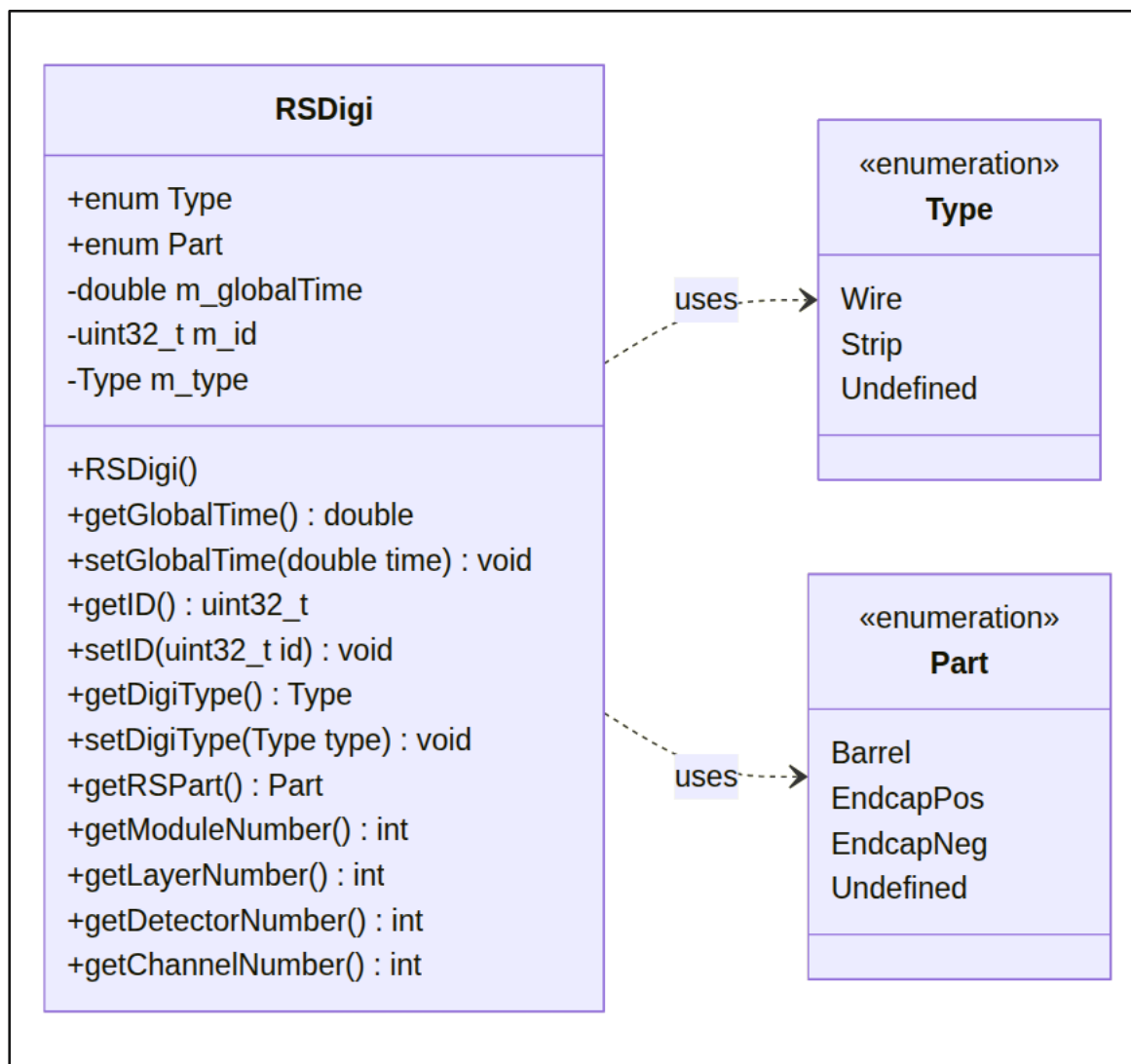


Рис. 7 UML-диаграмма класса RSDigi

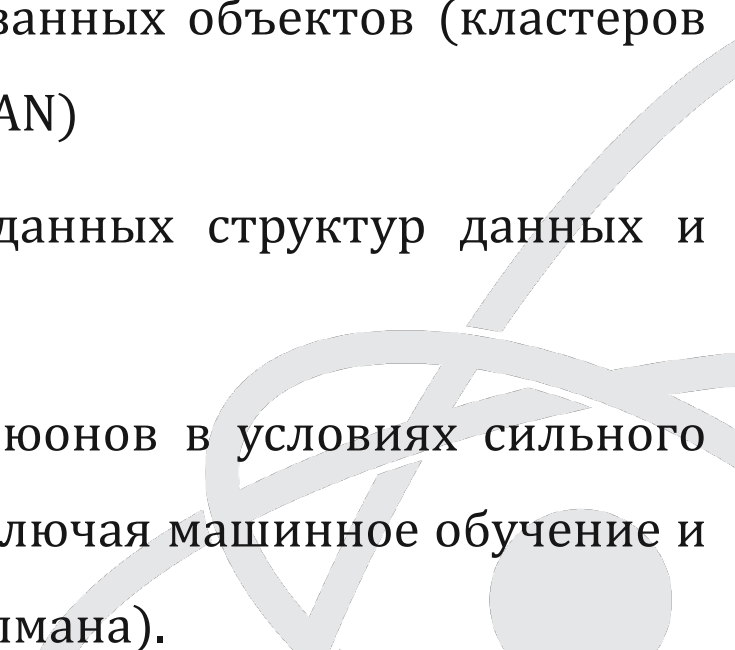
Что хранится в детекторном хите:

- Тип хита “Type” (ячеечный или стриповый)
- Принадлежность к части мюонной системы “Part” (баррель или эндкап)
- 32-битный идентификатор
- Временная метка

# Заключение

Создана геометрическая модель мюонной системы SPD в специализированной среде SPDGeoModel. Программно реализованы Монте-Карло и детекторные хиты для мюонной системы. Разработанные структуры интегрированы в программный пакет Sampro.

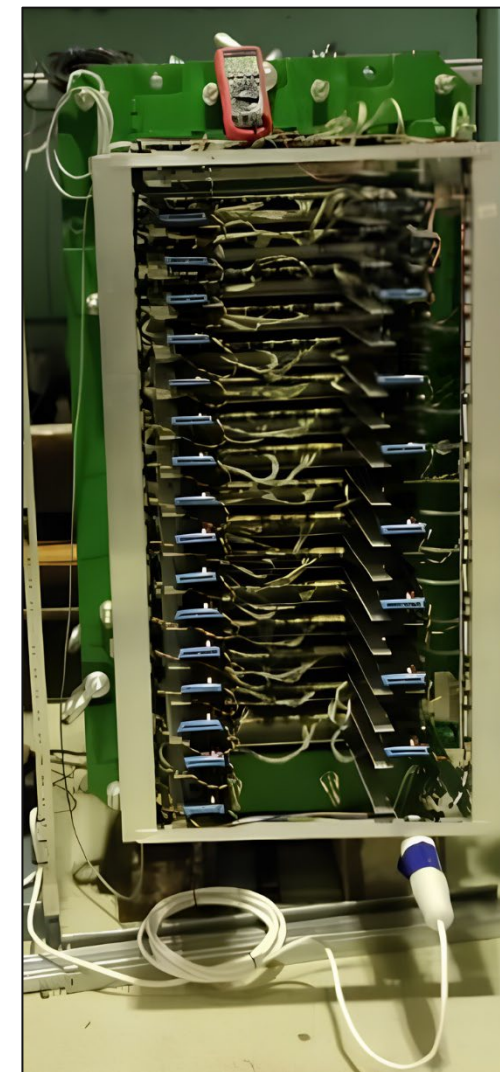
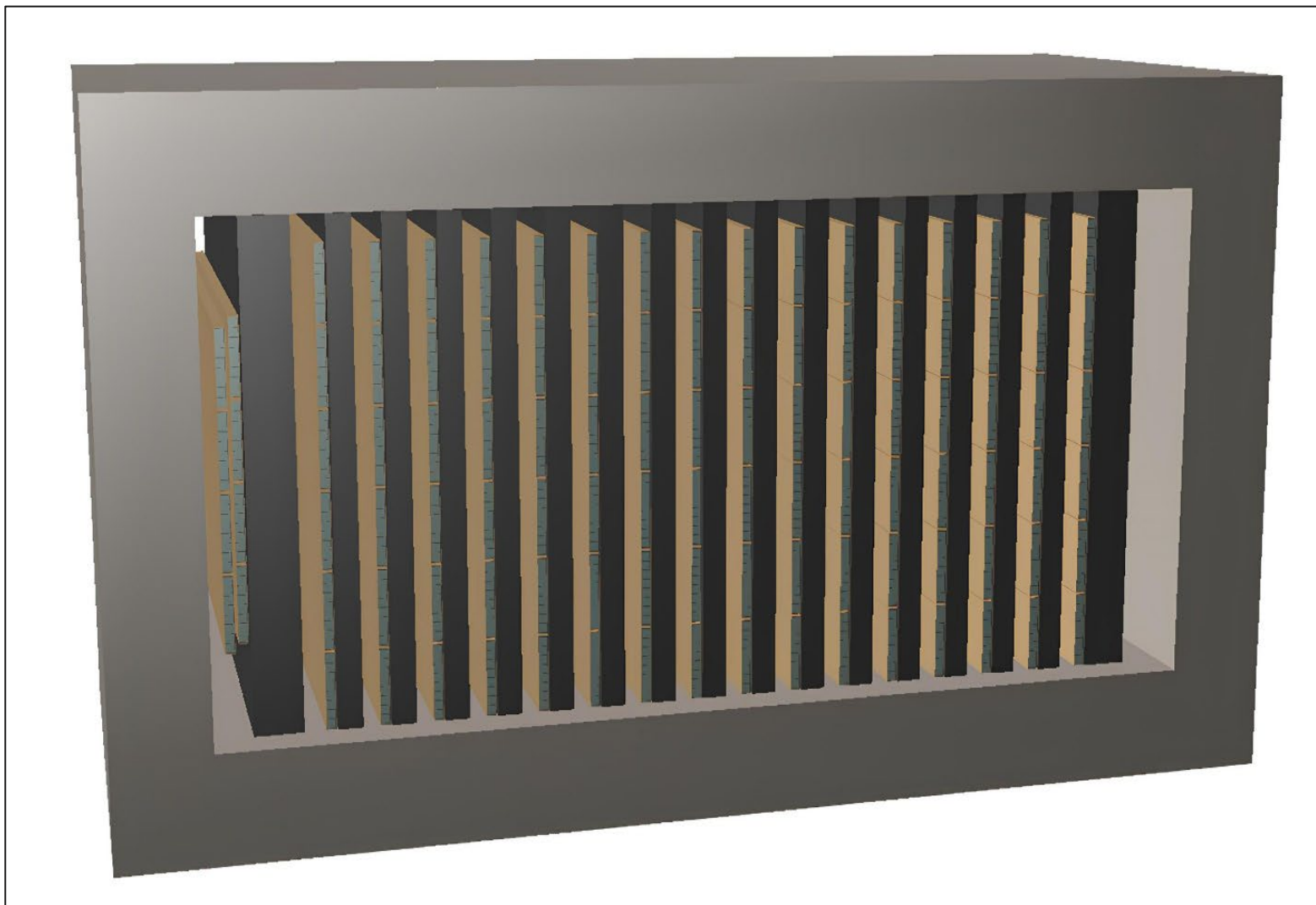
## План дальнейшей работы

1. Реализация программного представления реконструированных объектов (кластеров детекторных хитов) и алгоритма их формирования (DBSCAN)
  2. Комплексная тестирование и оценка работы всех созданных структур данных и алгоритмов в рамках программной среды Sampro
  3. Создание и оптимизация алгоритмов идентификации мюонов в условиях сильного адронного фона с применением современных методов, включая машинное обучение и классические трековые алгоритмы (например, фильтр Калмана).
- 

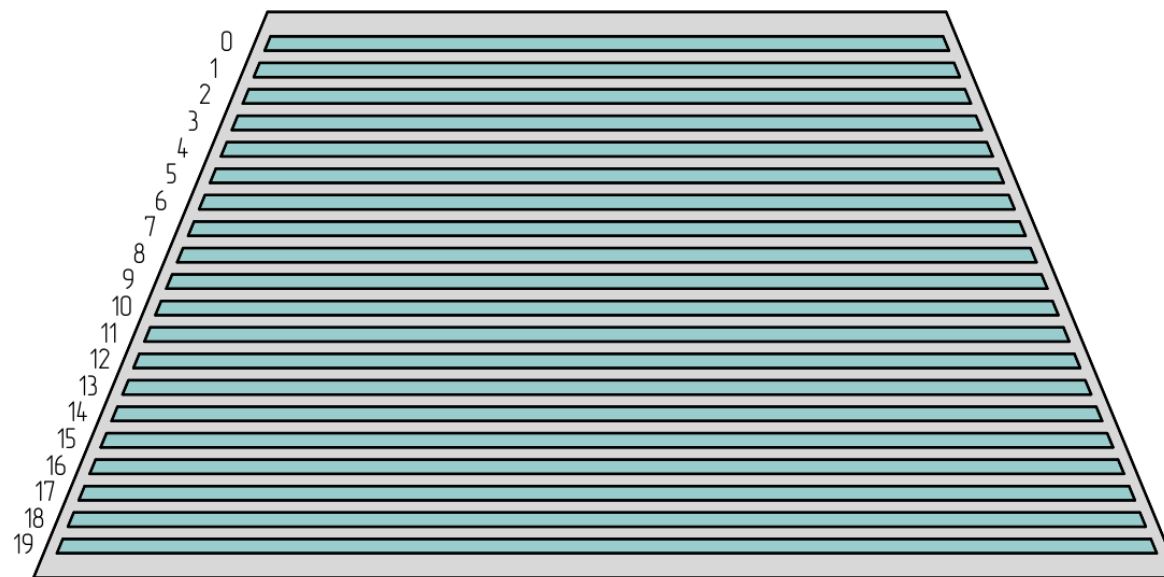
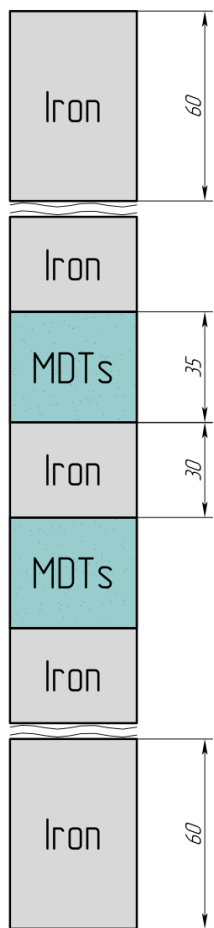
6. Исследование возможности регистрации нейтронов мюонной системой и разработка соответствующих методов анализа.
7. Оценка потенциала использования системы в качестве грубого адронного калориметра и создание прототипов алгоритмов для данной цели.
8. Калибровка и валидация разработанных алгоритмов на данных, полученных с реального прототипа мюонной системы при облучении космическими лучами.



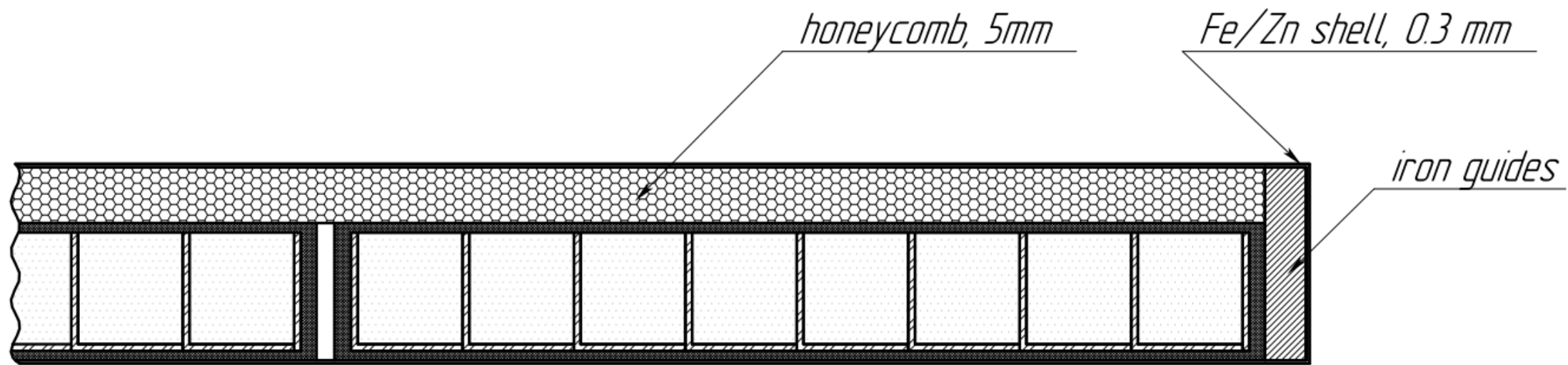
# Дополнительные слайды



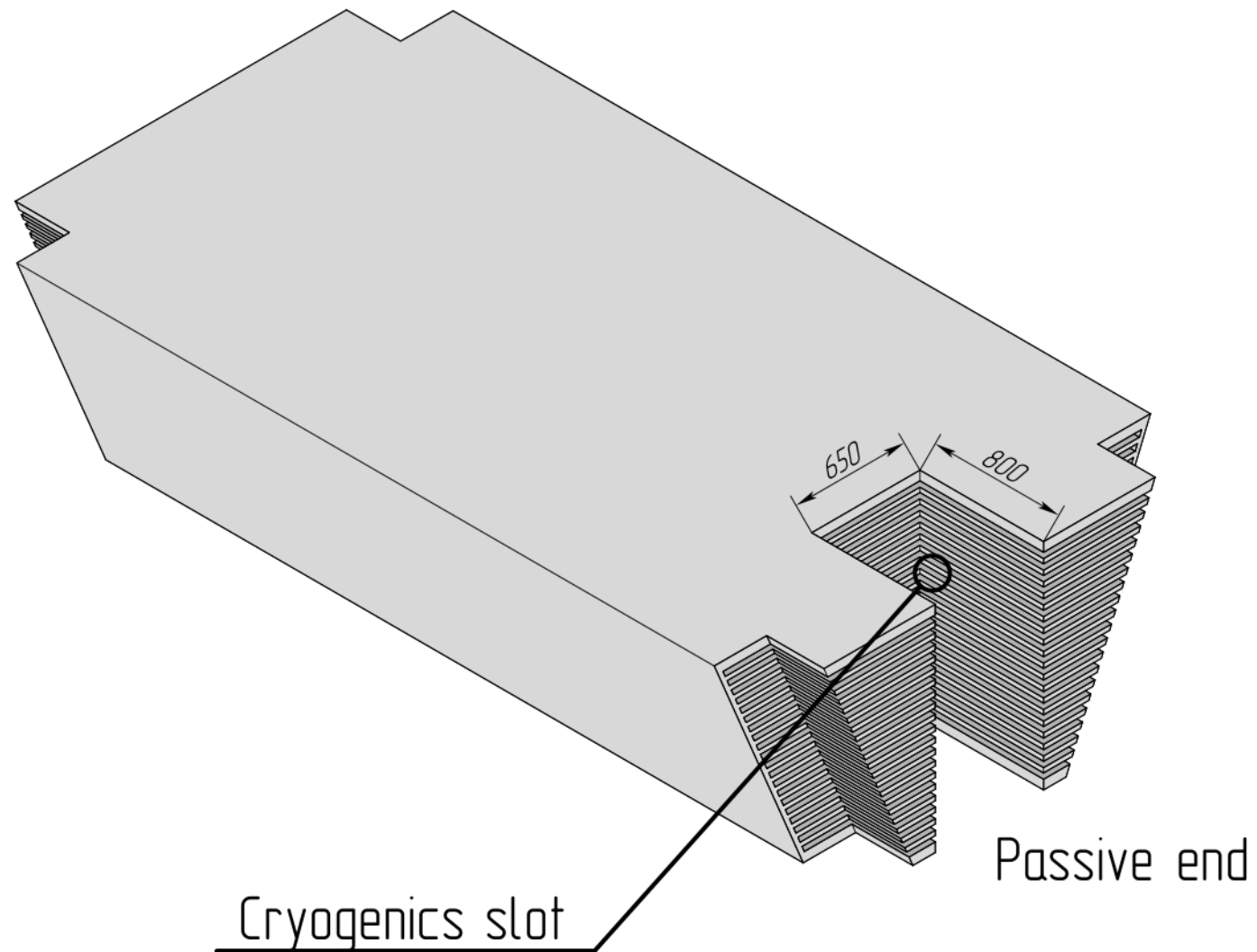
# Дополнительные слайды



# Дополнительные слайды

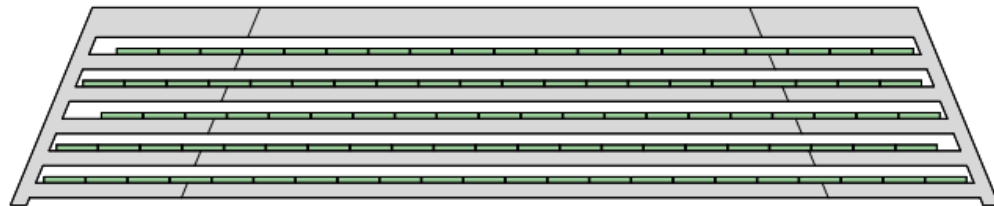


# Дополнительные слайды

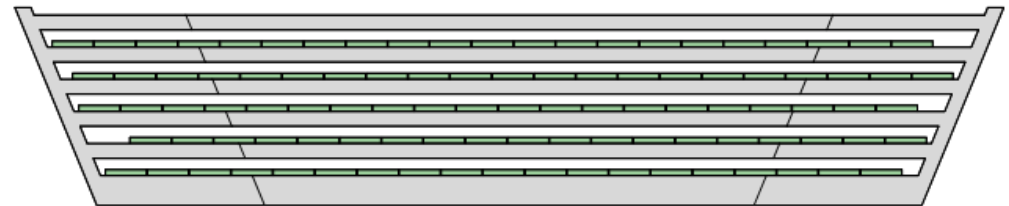


# Дополнительные слайды

BOTTOM&SIDE modules

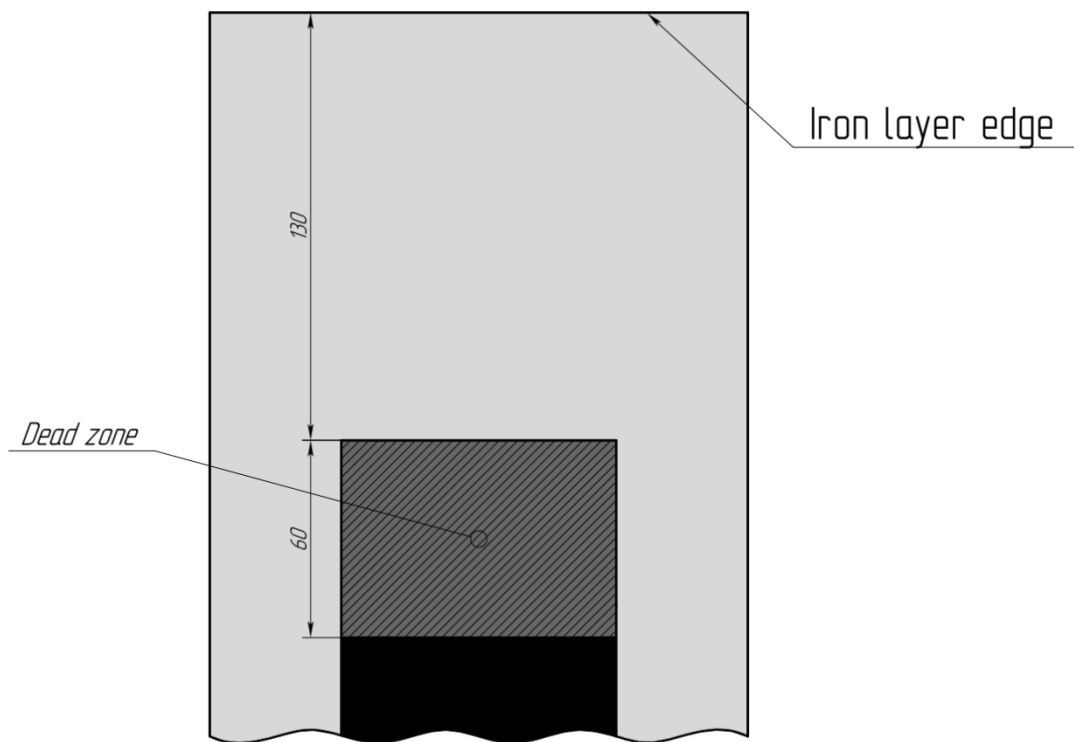


TOP & TOP-SIDE modules

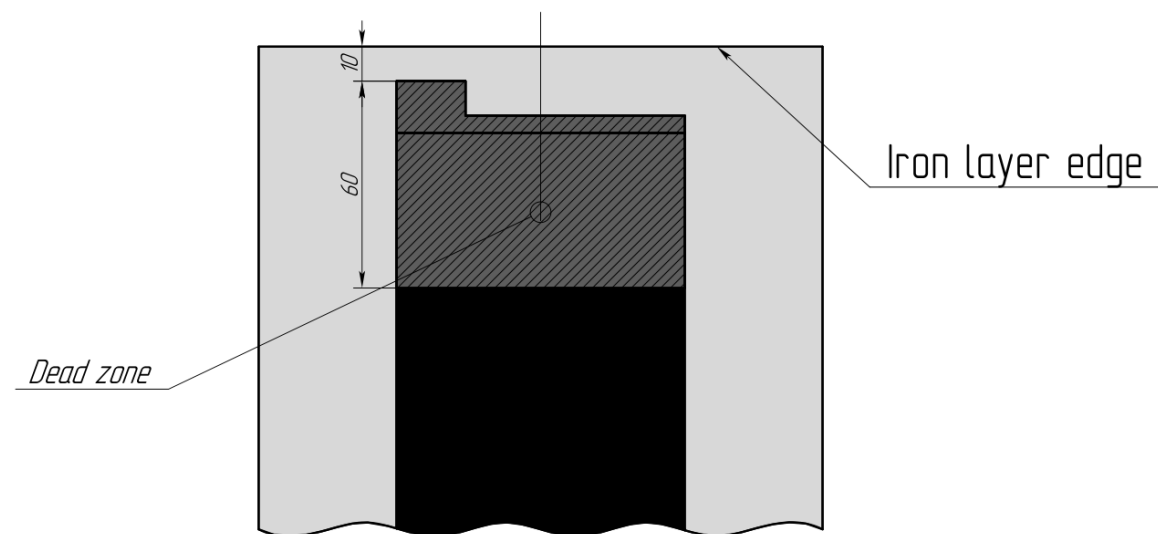


# Дополнительные слайды

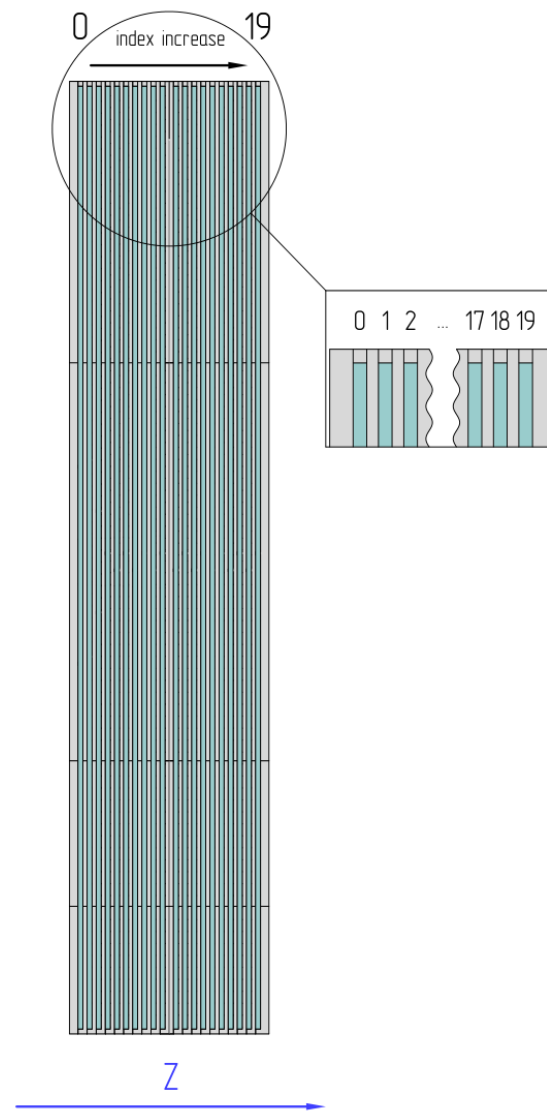
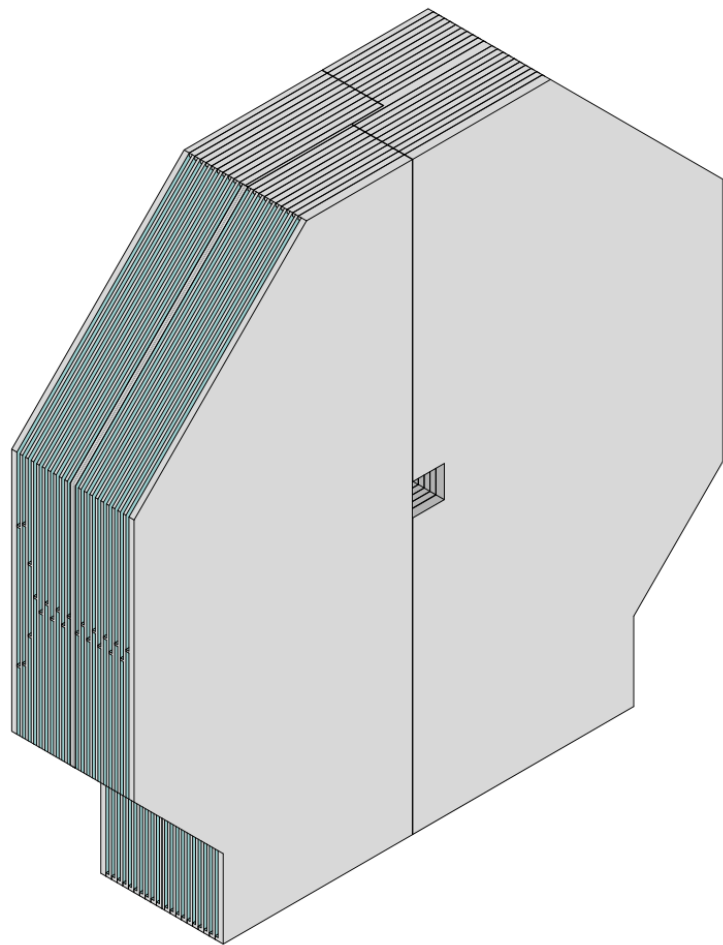
Active end



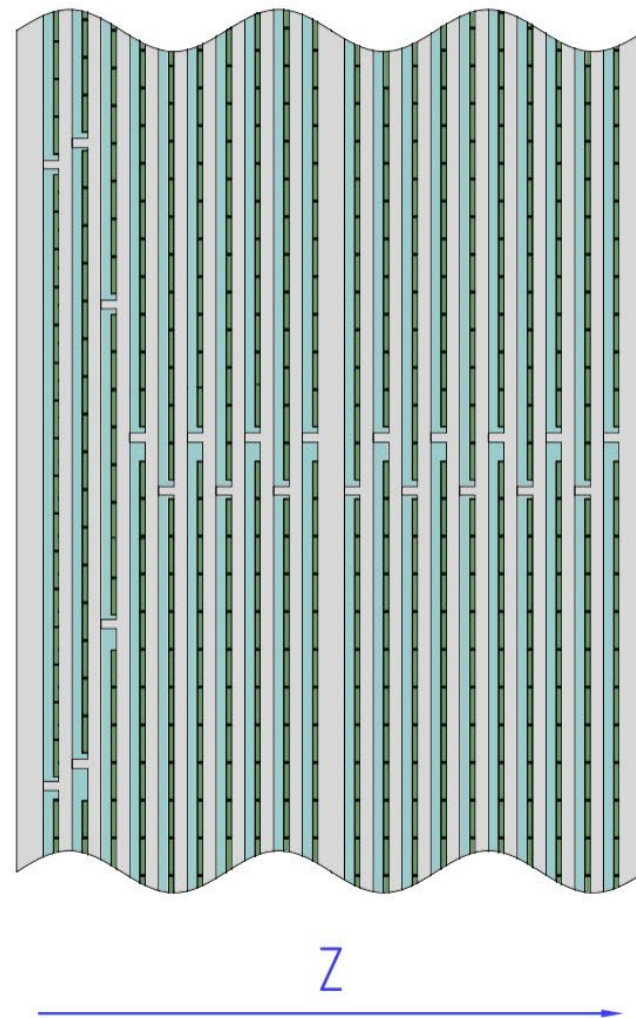
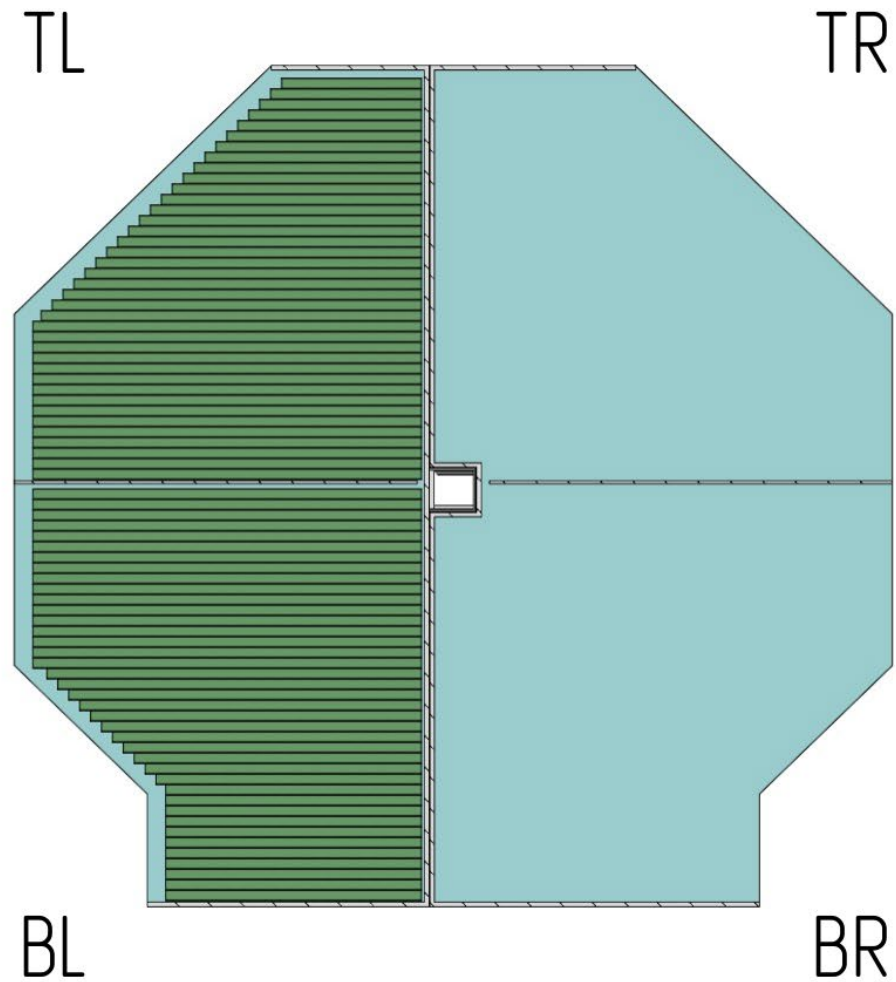
Passive end



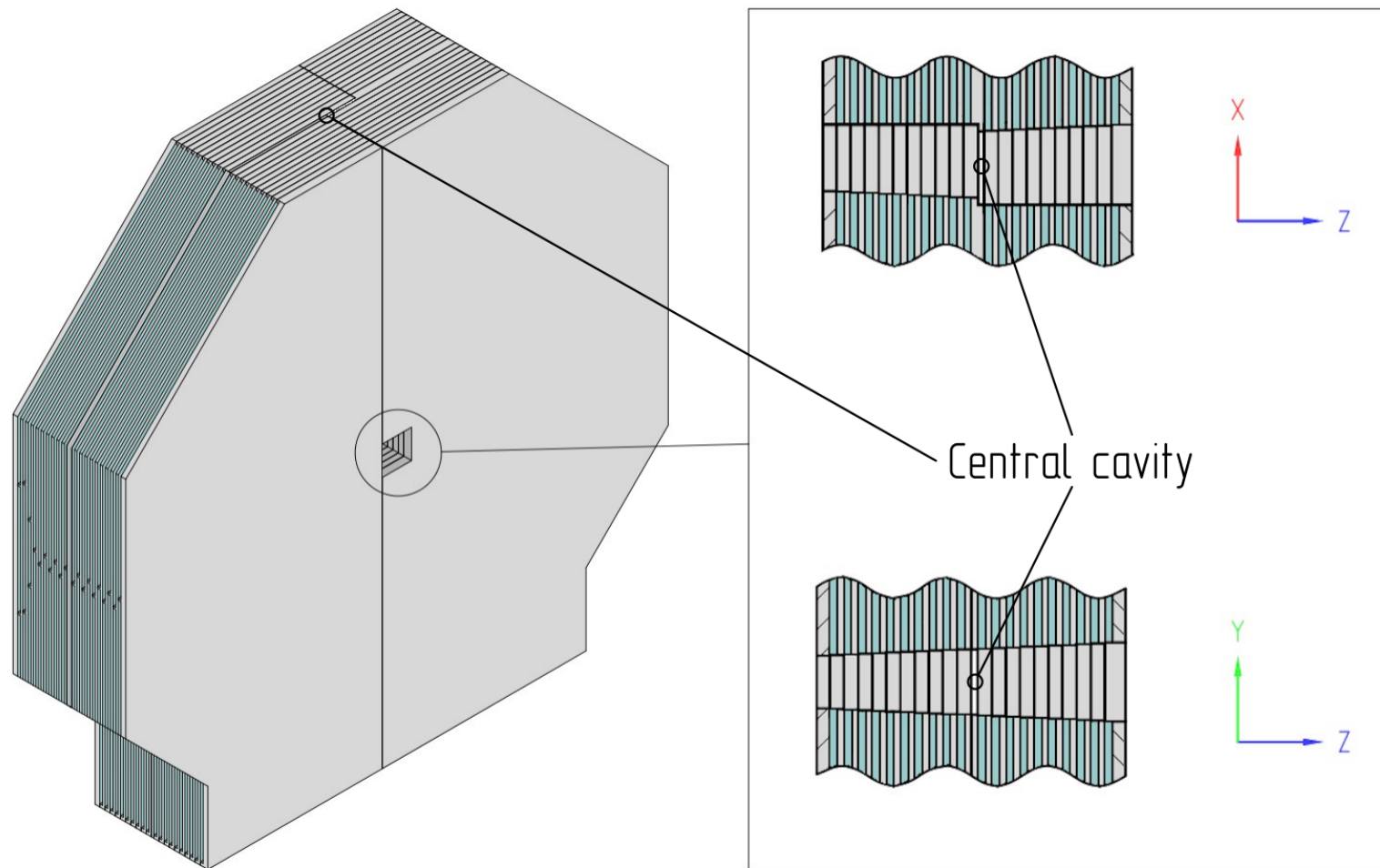
# Дополнительные слайды



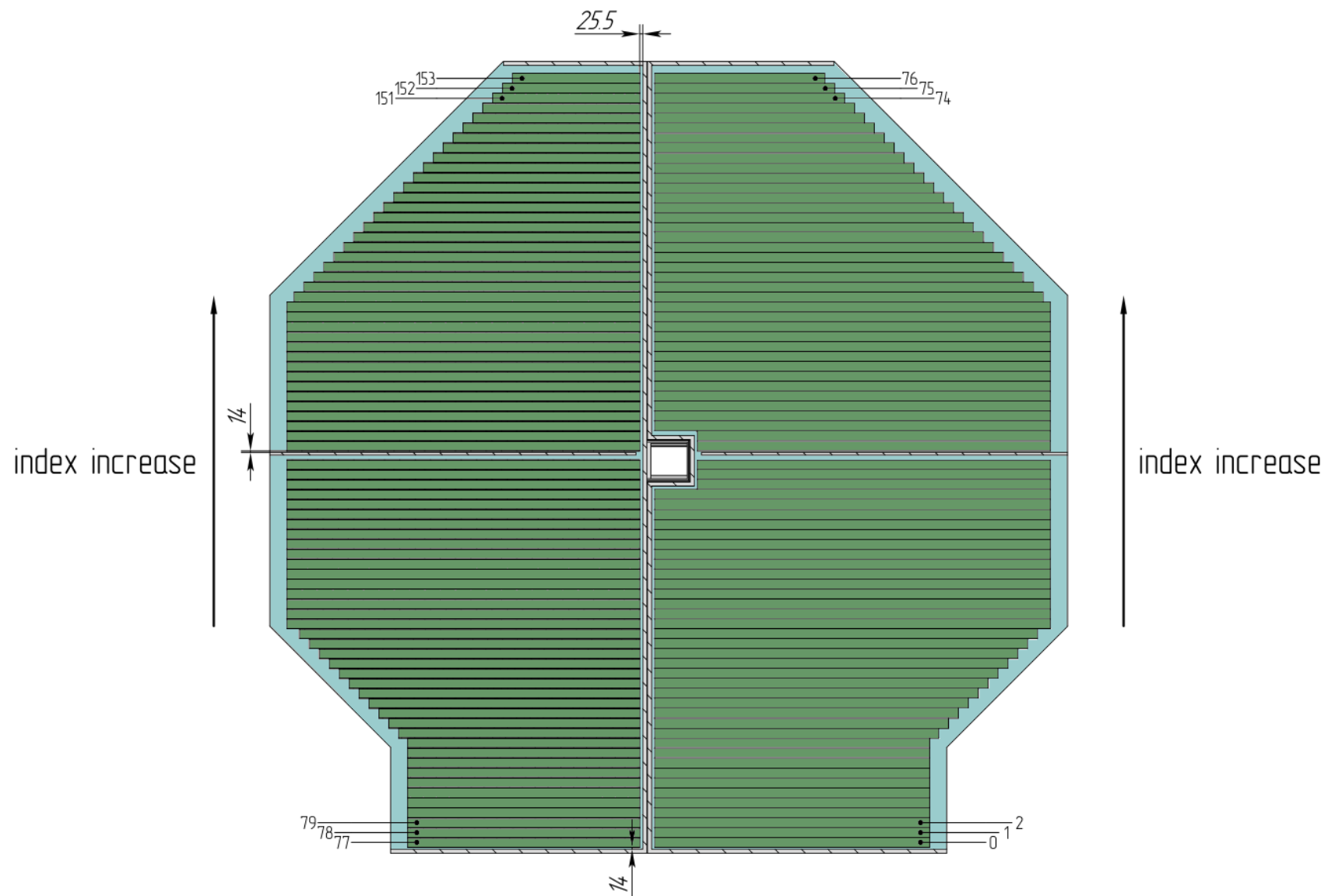
# Дополнительные слайды



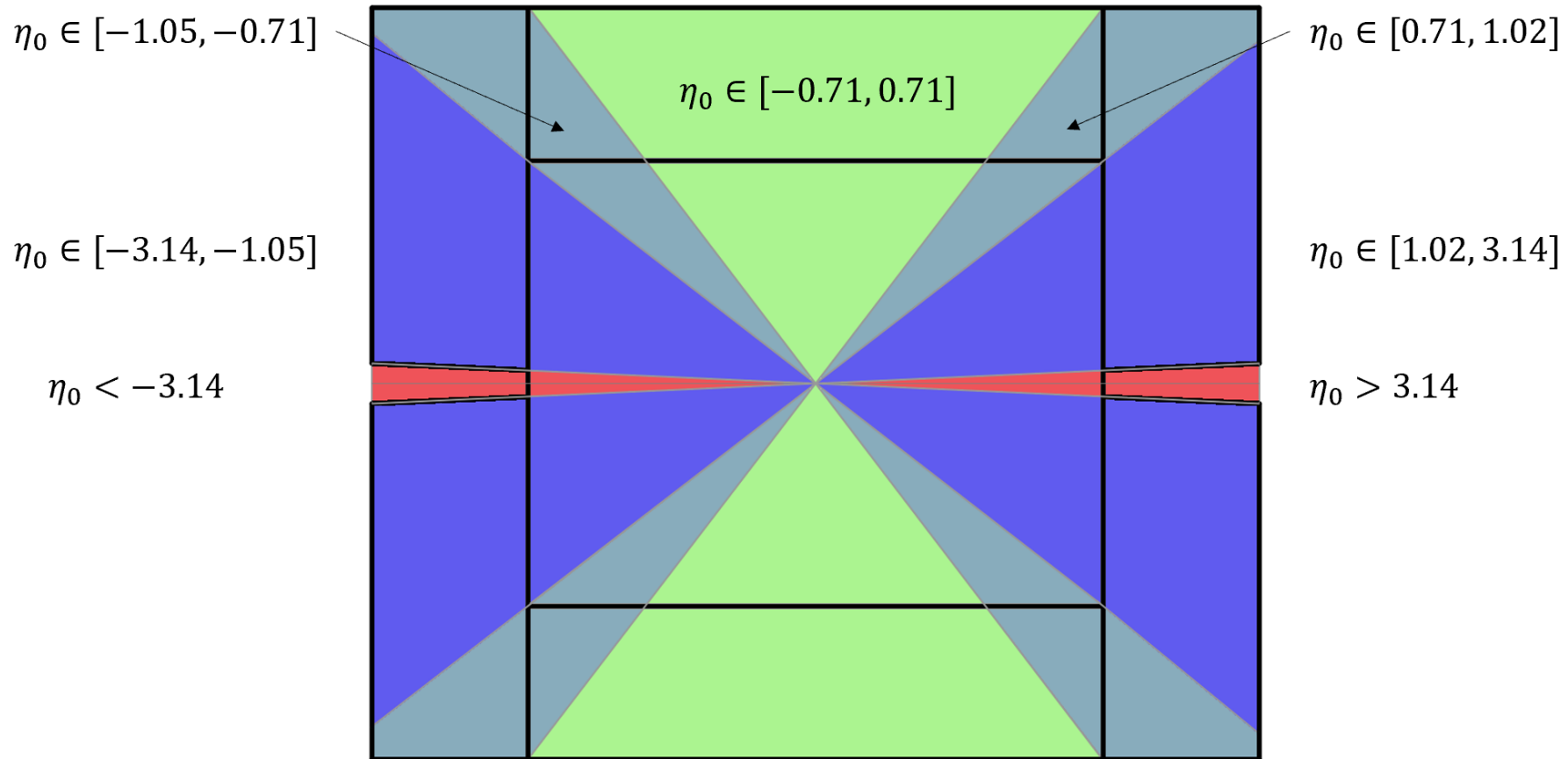
# Дополнительные слайды



# Дополнительные слайды



# Дополнительные слайды



$$\eta(\varphi) = \operatorname{arsinh}(\sinh(\eta_0) * \cos \varphi)$$

Barrel:  $\varphi \in [-22.5^\circ, 22.5^\circ]$  within each module

Endcap:  $\varphi \in [-45^\circ, 45^\circ]$  within each edge of the beam aperture