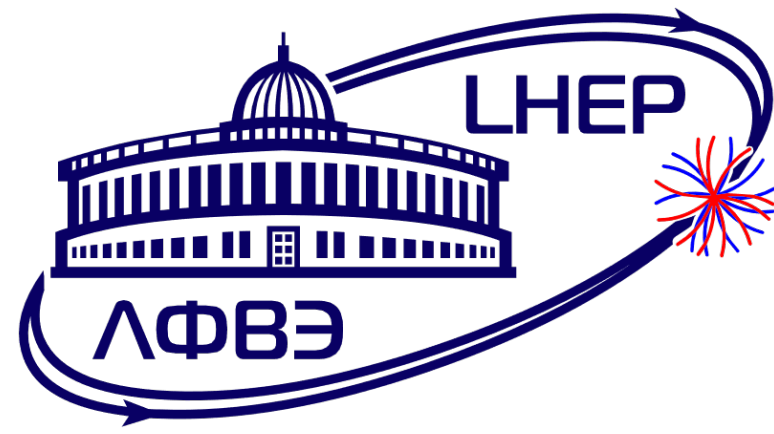


Научно-исследовательская работа аспиранта (2 курс)



Методика диагностики и калибровки сцинтилляционных детекторов с помощью рентгеновского сканирования

Аспирант: Дуров Андрей Ильич, А23-121

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

Москва, НИЯУ МИФИ, 27 июля 2025 г.

Цели и задачи

Ион-ионные исследования в первой фазе эксперимента SPD

Цели:

- Исследование применимости детекторов BBC и TS для ион-ионной программы, планирующейся во время первой фазы эксперимента SPD
- Предсказание результатов ион-ионной программы первой фазы эксперимента SPD

Задачи (за прошедший год):

- Моделирование загрузок детекторов BBC и TS в условиях p-p и ион-ионных столкновений
- Создание и калибровка методик определения однородности модулей детектора BBC
- Вычисление импульсных точностей детектора TS в различных условиях p-p и ион-ионных столкновений

Эксперимент SPD

- Spin Physics Detector (SPD) - эксперимент на NICA, предназначенный для изучения с использованием поляризованных пучков спиновой структуры протона и дейтрона, а также других явлений, связанных со спином. Разрабатывается как **универсальная 4π-установка** с системой трекинга, идентификации частиц и высокой светимостью (до $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)
- Straw Tracker (TS) - Входит в трековый детектор, отвечает за основное пространственное разрешение установки. Особенно важен при **ион-ионных столкновениях** с высокой множественностью частиц, где возможны **перекрытия сигналов**. Уязвим к перегрузке, так как электроника требует времени на обработку событий, что снижает точность при высокой нагрузке. Планируется к использованию на **всех этапах** эксперимента SPD

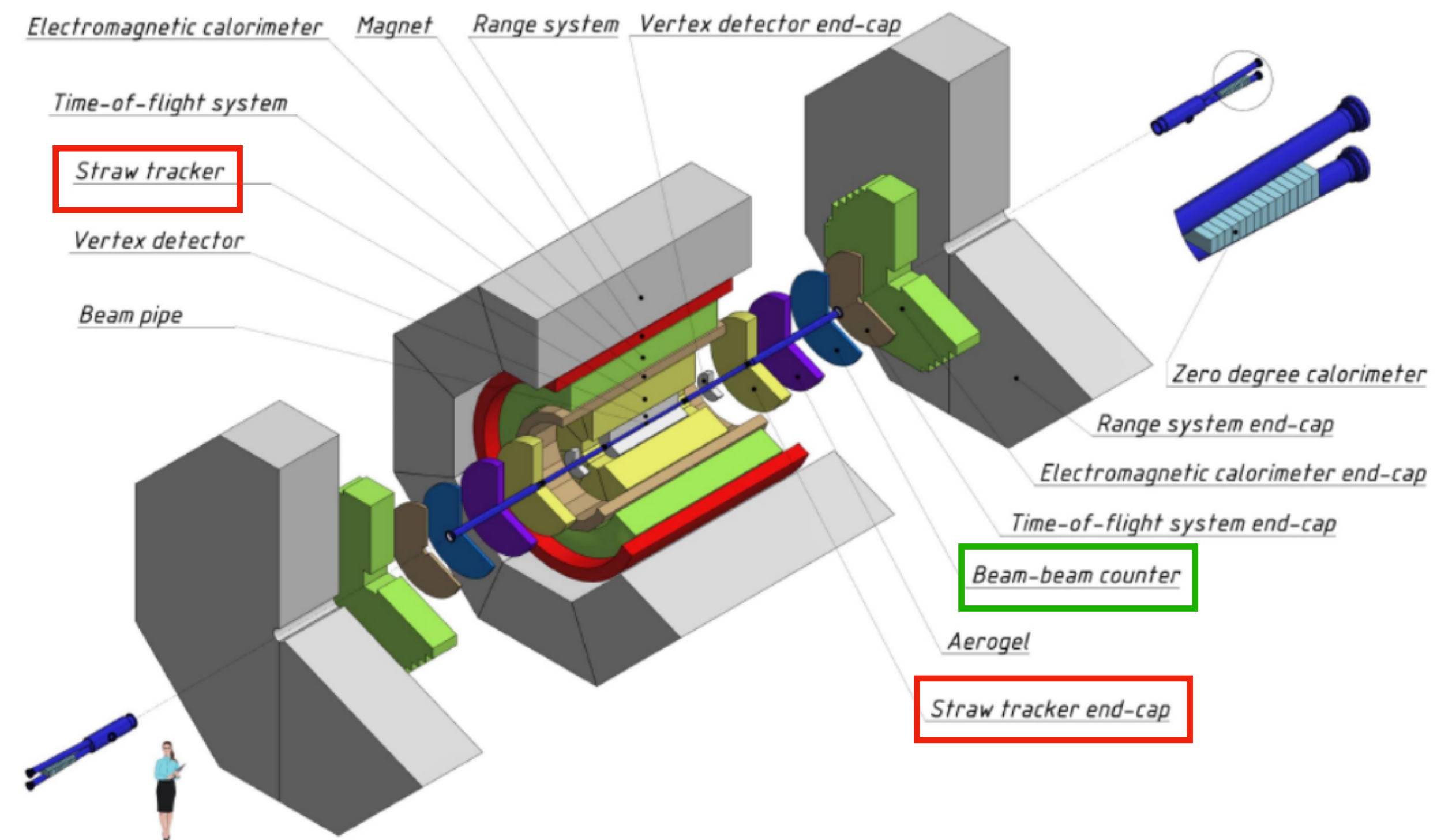


Рис. 1 - Эксперимент SPD

Эксперимент SPD

- Почему ионная программа?:

Исследование свойств кварк-глюонной материи в малых системах (p+p, d+d, O+O, Ar+Ar, Xe+Xe):

1. Влияние начального состояния на динамику системы
2. Динамика и эффекты конечного состояния, транспортные коэффициенты
3. Вихревая структура (доступ через распады различных частиц (гипероны, мезонные резонансы, J/ψ) в широкой области регистрации, энергетическая зависимость вихревой структуры)

Рождение тяжёлых кварков:

1. Диссоциация и рекомбинация, потеря энергии на уровне кварков
2. Доступ к J/ψ и другим чармониям через каналы распада на диэлектронные и димюонные пары

- Почему SPD?

- Высокая частота срабатываний триггера и высокая пространственная точность
- Широкая область по псевдобыстроте
- Дополняет установку MPD, но обладает уникальными физическими возможностями

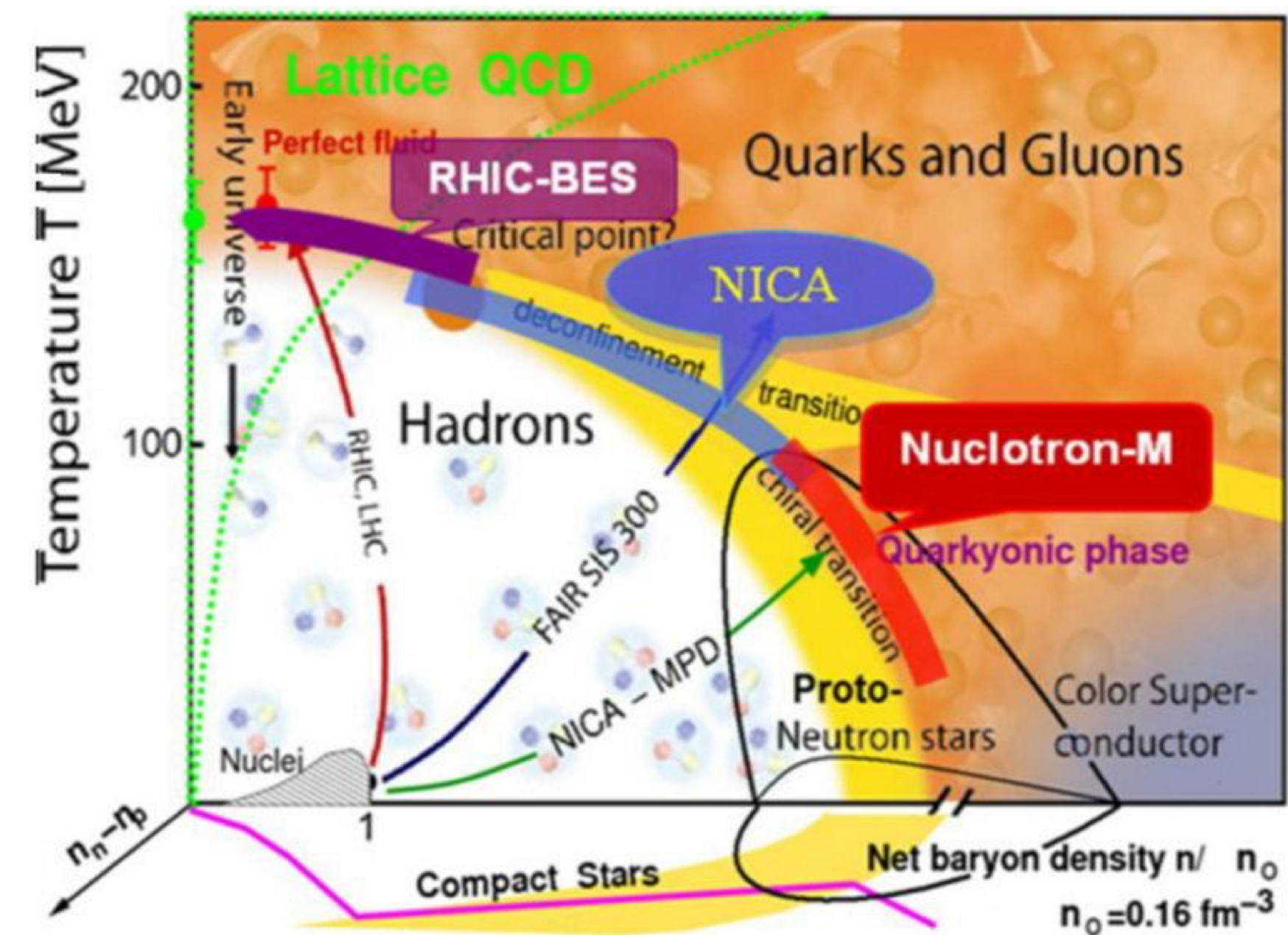


Рис. 2 - NICA position in fundamental physics

Трековый детектор Straw Tracker (TS)

- **Назначение:** восстановление треков частиц, измерение их импульсов по кривизне траектории в магнитном поле и идентификация частиц через энергосодержание (dE/dx).
- **Конструкция:**
 - Состоит из **barrel-части** (трекинг) и двух **end-caps** (идентификация).
 - **Barrel:** 8 модулей, каждый содержит ~3300 трубок (прямых и наклонных), всего ~26000 трубок.
 - **End-caps:** по 8 координатных плоскостей (диски), используются трубки с разной ориентацией и длиной.
- **Принцип работы:**
 - Заряженные частицы ионизируют газ (аргон) в трубке, образуются электроны, которые дрейфуют к аноду.
 - Сигнал усиливается (газовое усиление) и регистрируется на анодной проволоке.
 - **Поперечные координаты (x, y)** определяются номером трубки, **продольная (z)** — временем дрейфа.
 - Из набора точек строится **трек частицы**, что позволяет точно определить поперечный импульс.

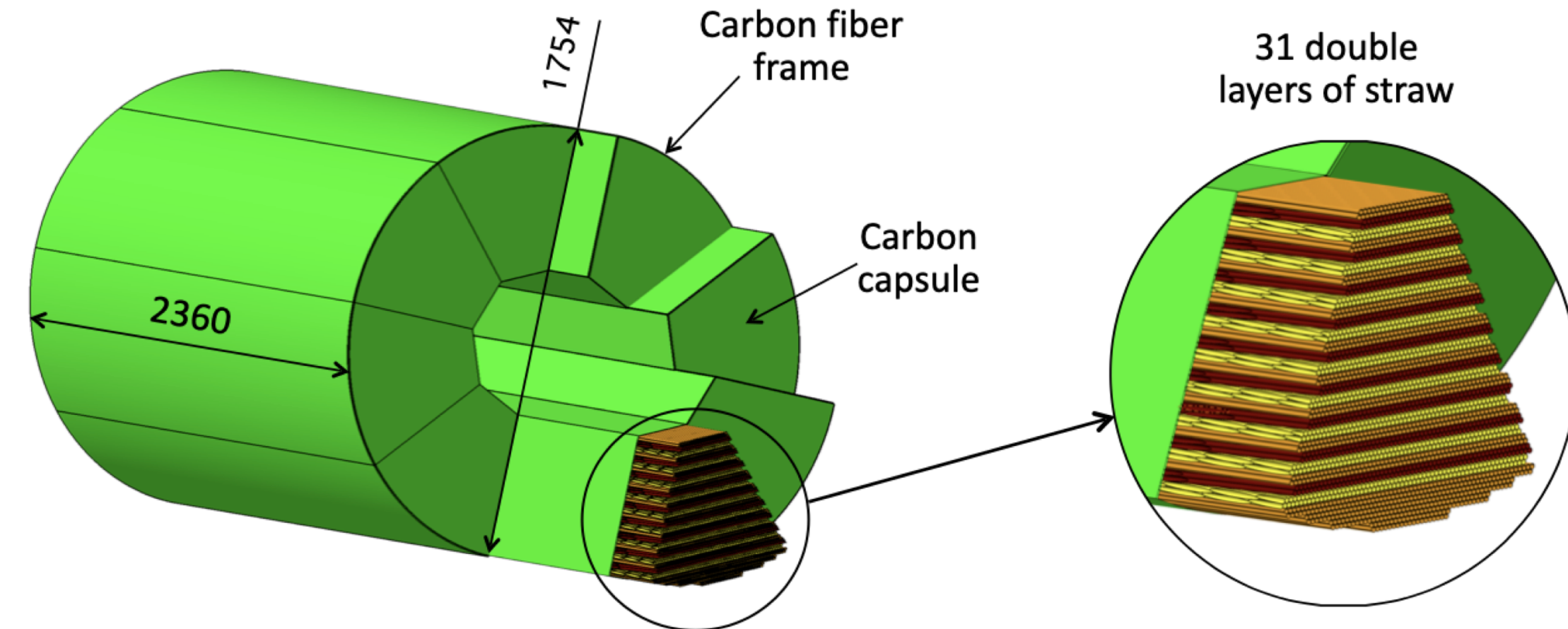


Рис. 3 - Straw Tracker (barrel)

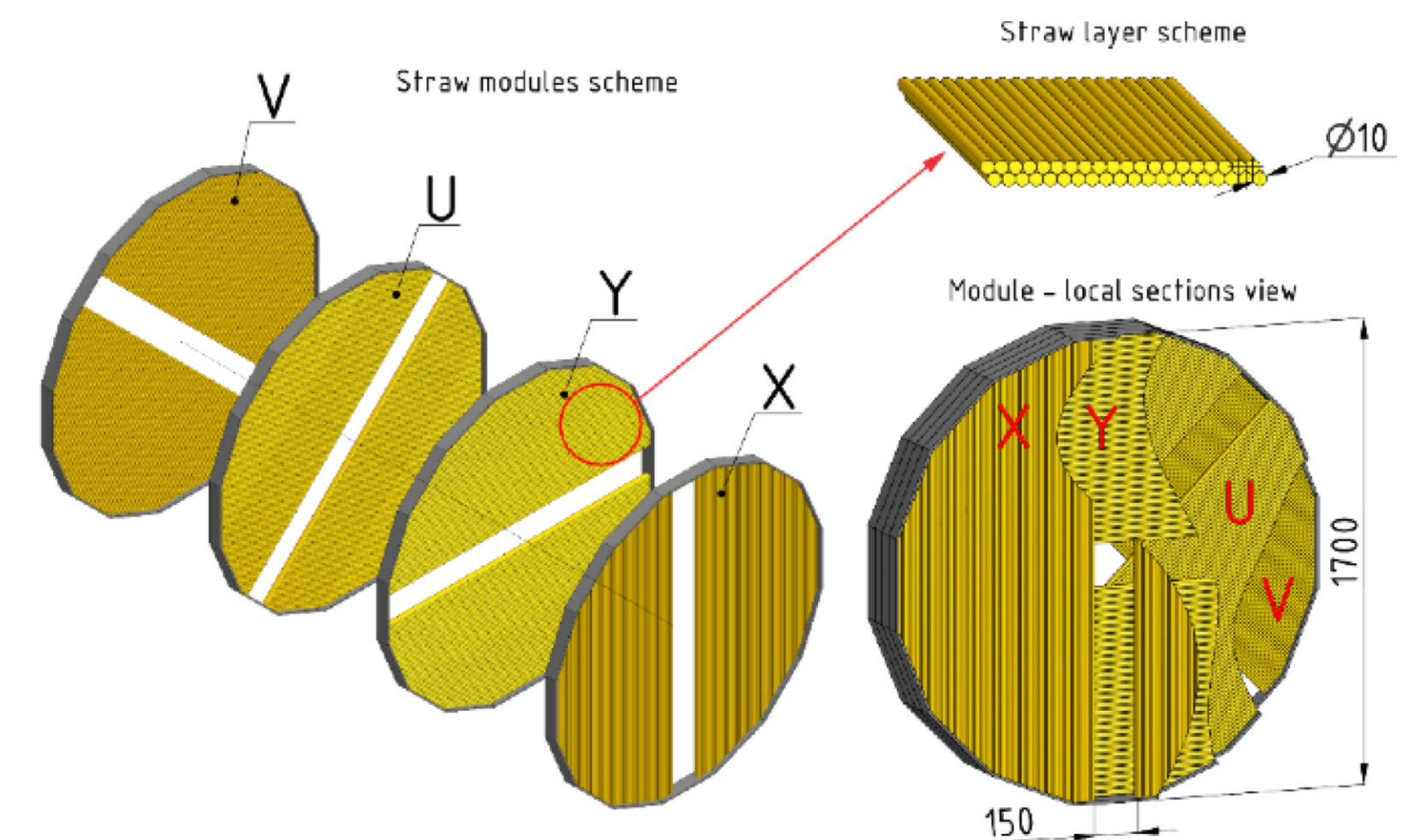


Рис. 4 - Straw Tracker (end-cap)

Общая загрузка TS в ион-ионных столкновениях

Также была посчитана общая загрузка всего детектора в различных ион-ионных столкновения. В частности, на Рис. 5 показана общая загрузка TS в О-О столкновениях

Параметры:

- Генератор - URQMD
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 10 000 О-О столкновений
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

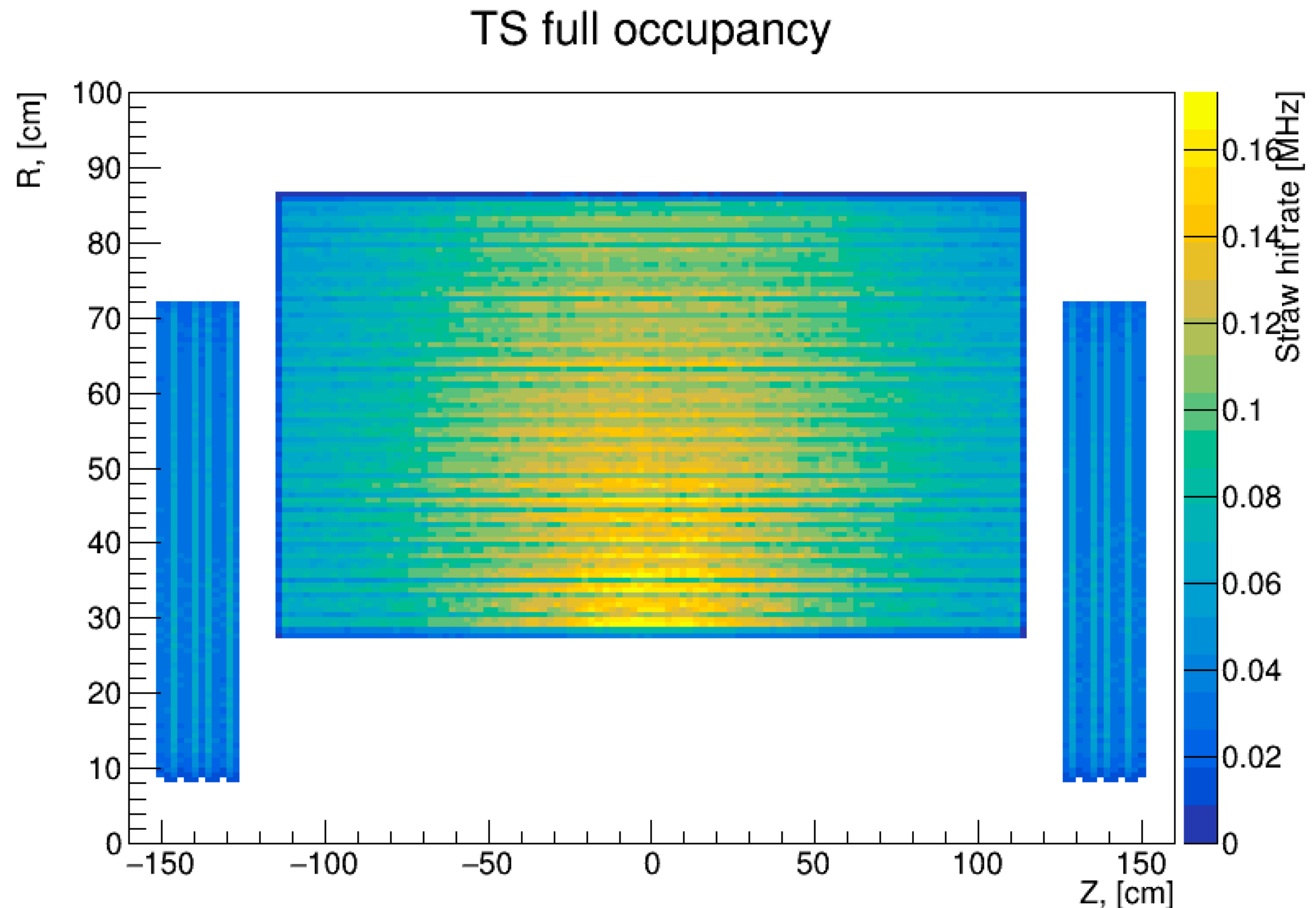


Рис. 5 - Общая загрузка в О-О столкновениях

Straw multiplicity в TS в ион-ионных столкновениях

Аналогично были исследованы задействованные и незадействованные straw для ион-ионных столкновений (в частности, показаны результаты для O-O). В частности, было определено относительное количество незадействованных straw, а также на Рис. 6 показано multiplicity срабатываний straw в среднем в каждом столкновении (усредненное по всем столкновениям). По оси X показано число хитов одного и того же straw в одном столкновении, а по оси Y - среднее число трубок в которых было столько хитов, сколько указано по оси X

Параметры:

- Генератор - URQMD
- $\sqrt{s} = 10 GeV$
- 10 000 O-O столкновений
- Minimum bias

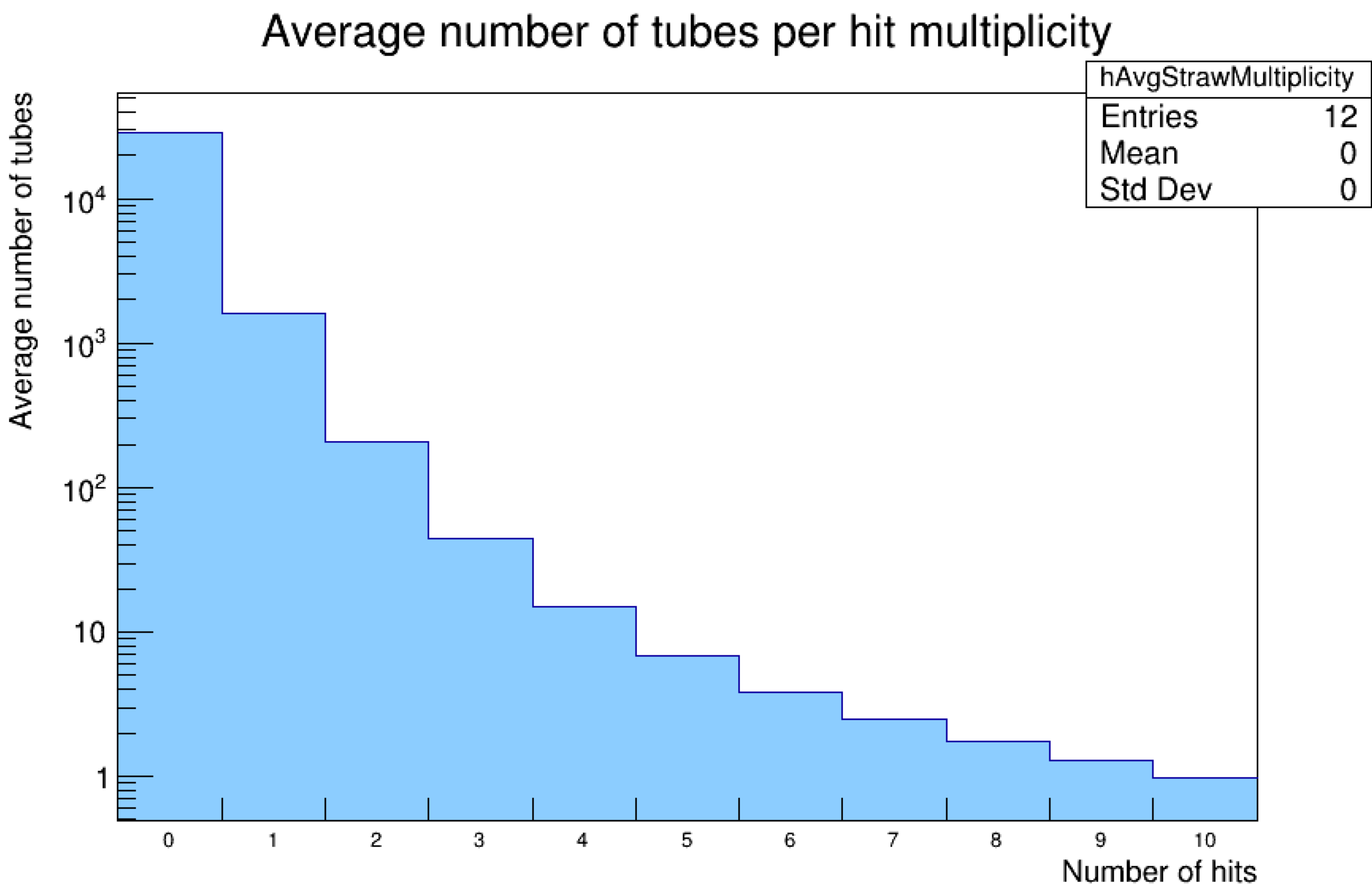


Рис. 6 - Straw hit multiplicity

Относительное количество незадействованных straw: 93.8%

Импульсное разрешение TS в ион-ионных столкновениях

Аналогично было получено импульсное разрешение для ион-ионных столкновений. В частности, на Рис. 7 показана общая карта загрузок всего TS^b в центральном регионе псевдобыстрот ($-1.1 < \eta < 1.1$) для O-O столкновений. На Рис. 8 также показаны импульсные разрешения для всего спектра Pt для O-O столкновений в идентичном центральном регионе псевдобыстрот ($-1.1 < \eta < 1.1$).

Параметры:

- Генератор - URQMD
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 500 O-O столкновений
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

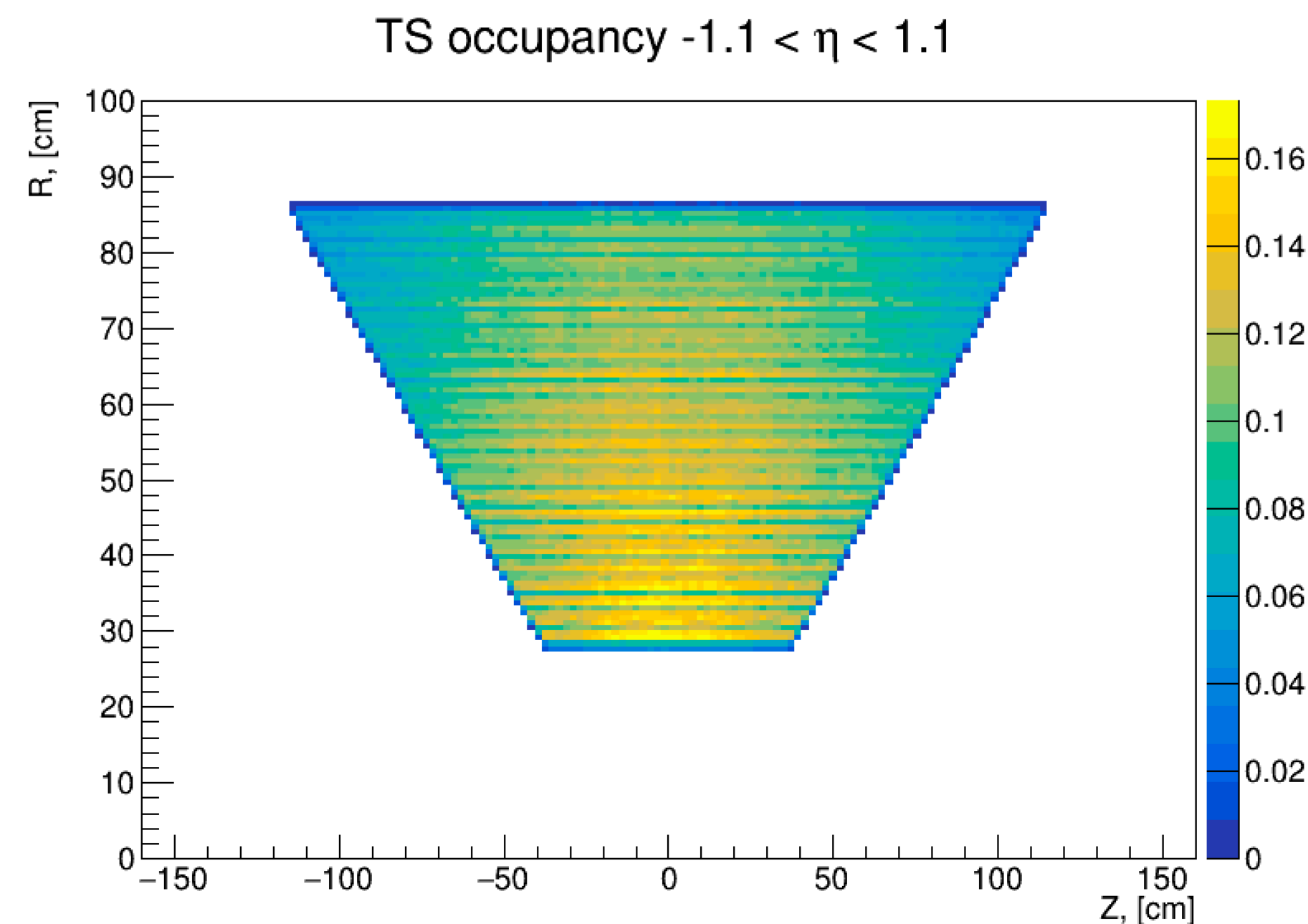


Рис. 7 - Общая загрузка TS в центральном регионе псевдобыстрот

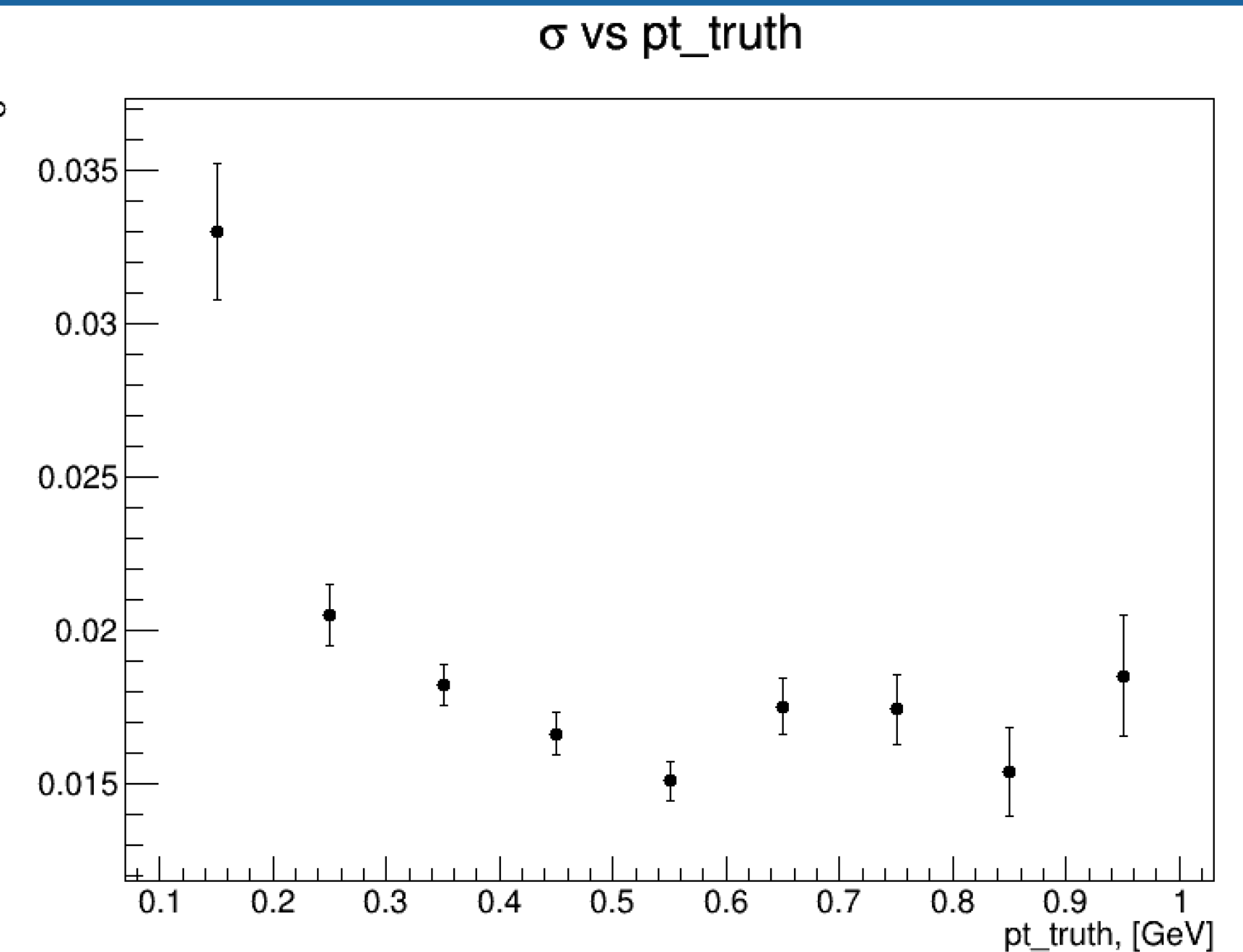


Рис. 8 - Импульсные разрешения TS в различных регионах Pt в центральном регионе псевдобыстрот

Деградация импульсного разрешения TS в р-р и ион-ионных столкновениях

Сравнивая распределения импульсных разрешений между р-р и разными ион-ионными столкновениями было получено суммарное распределение, наглядно показывающее деградацию импульсного разрешения при увеличении атомного номера сталкивающихся частиц

Параметры:

- Генераторы - Pythia8 & URQMD
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 500 р-р столкновений, 500 каждых ион-ионных столкновений
- Minimum bias

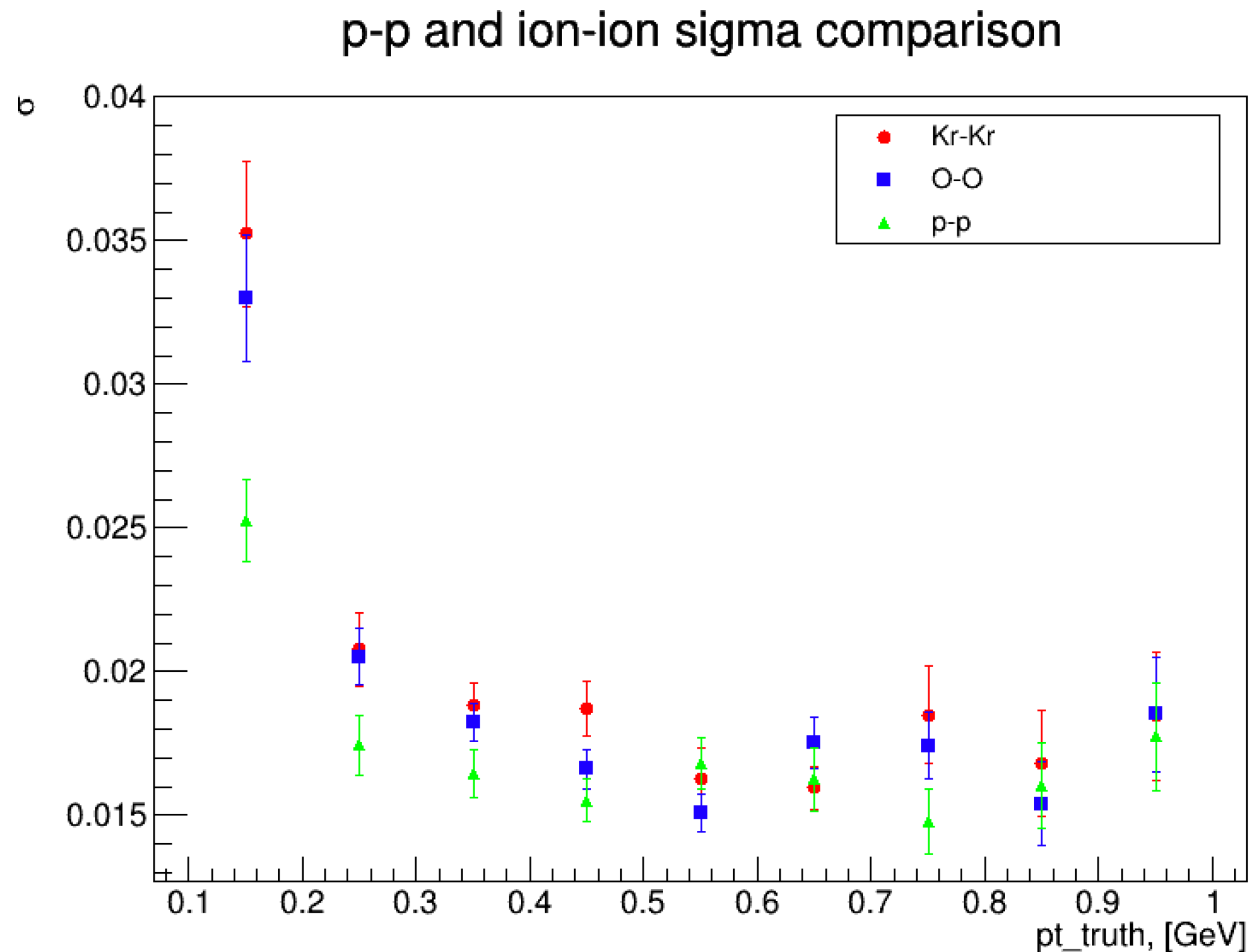


Рис. 9 - Деградация импульсного разрешения TS с увеличением атомного номера сталкивающихся частиц

Beam-beam counter (BBC)

- Назначение:

Локальная поляриметрия в SPD, основанная на измерениях азимутальных асимметрий поляризованных протонных пучков и мониторинг столкновений пучков

- Конструкция:

- SPD BBC будет состоять из **16 секторов с 26 тайлами в каждом секторе в одном колесе**. Каждый тайл представляет собой отдельный источник сигнала, считывающийся с помощью кремниевого фотоумножителя (SiPM), подведенного к торцу WLS оптоволокну.
- Одной из возможных опций FEE может быть используемая в данной работе система считывания **CAEN FERS-5200**, разработанная специально для больших массивов детекторов.
- Два торцевых детекторных колеса сцинтилляционных счетчиков пучковых столкновений Beam-Beam Counters (BBCs) планируется установить перед TOF системой установки SPD симметрично относительно точки взаимодействия.

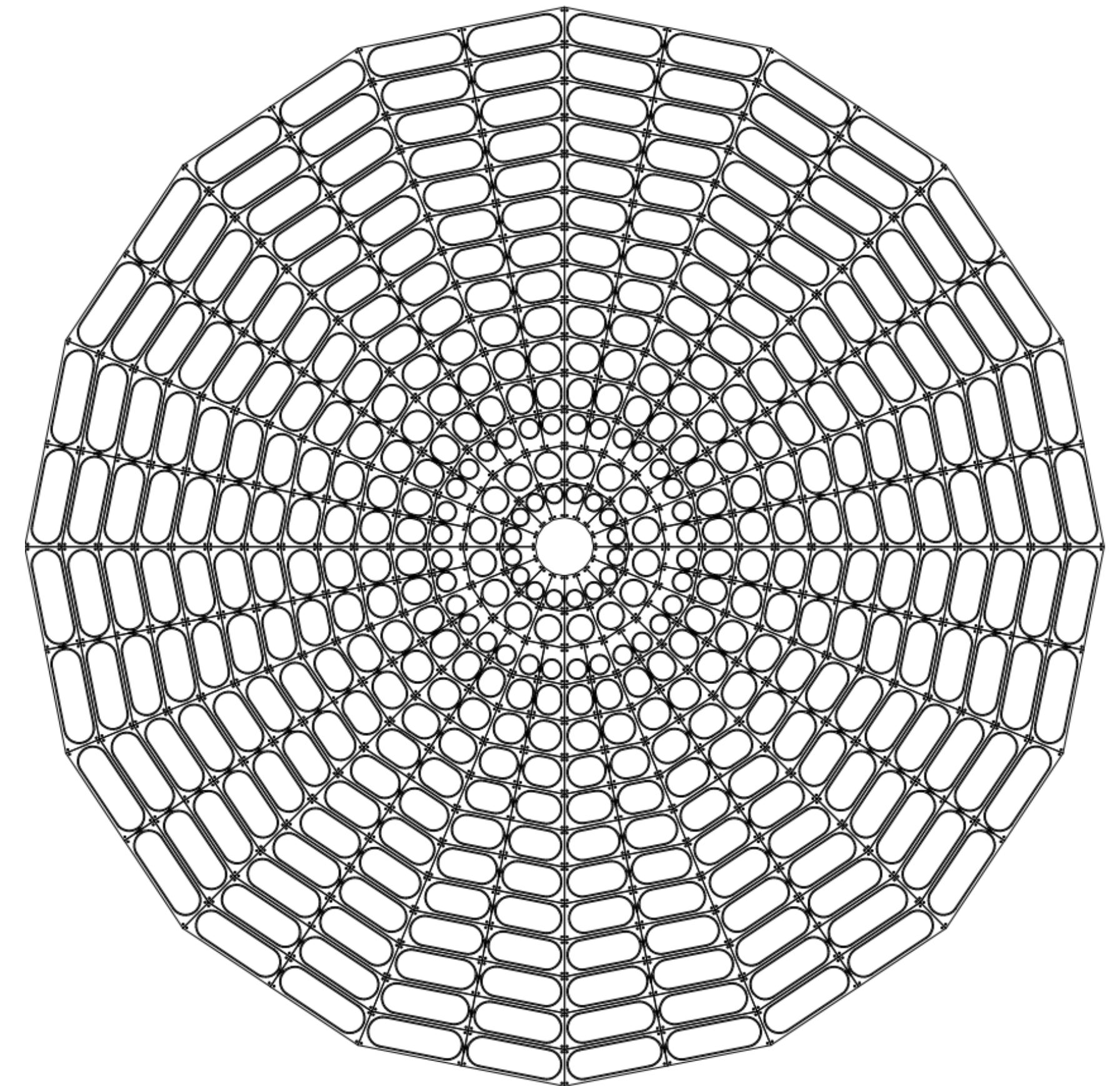


Рис. 10 - Beam-beam counter (BBC)

Рентгеновское сканирование тайлов

Рентгеновское сканирование необходимо для:

- Оценки пространственной однородности пластиковых сцинтилляторов для прототипа детектора BBC SPD.
- Методика может использоваться для входного контроля при сборке и масштабироваться на целые сектора.
- В дальнейшем планируется автоматизация анализа и расширение тестов на уровень сектора.

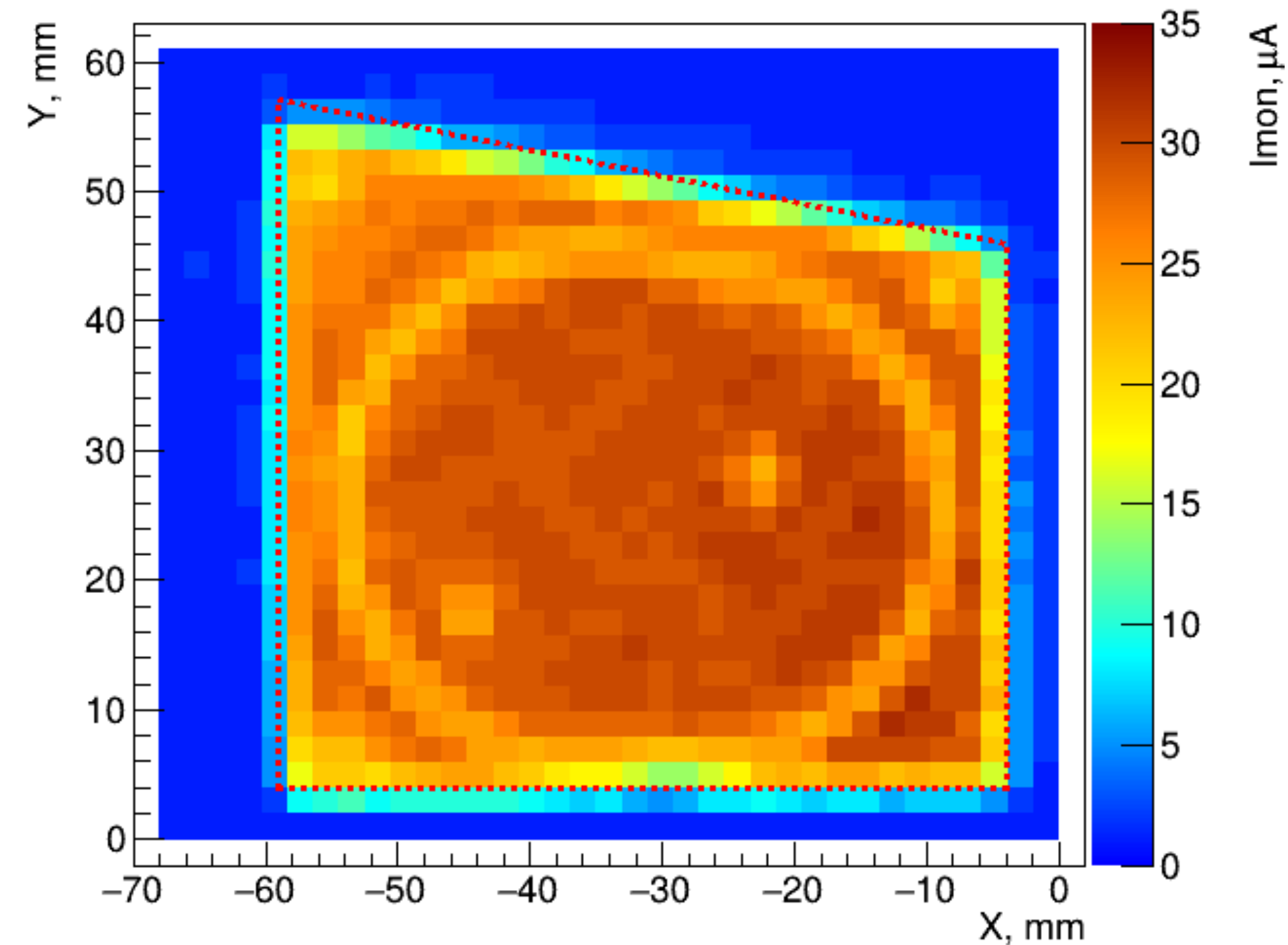


Рис. 11 - Пример результатов полного сканирования

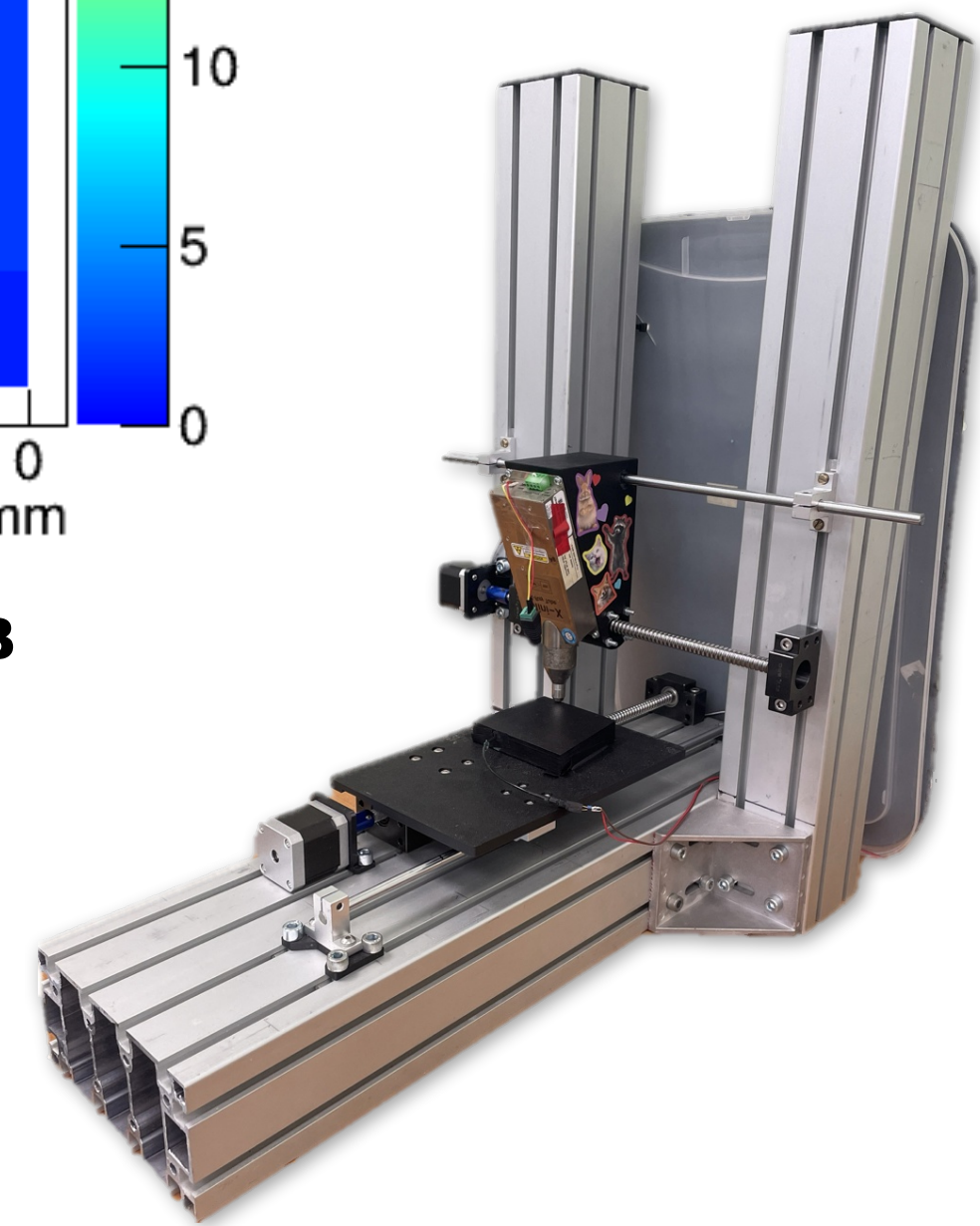


Рис. 12 - Установка для рентгеновского сканирования

Моделирование загрузок BBC в p-p и ион-ионных столкновениях

- Первые исследования загрузок были посвящены детектору BBC, принципам его работы в терминах моделирования с помощью SPDRoot
- С помощью интегрирования генератора URQMD были получены первые результаты моделирования загрузок не только в условиях p-p столкновениях, но и в ион-ионных столкновениях (пример для Xe-Xe, Minimum bias, с $\sqrt{s} = 12 \text{ GeV}$ с 50 000 столкновений представлен на Рис. 13, а для p-p с такими же условиями - на Рис. 14)

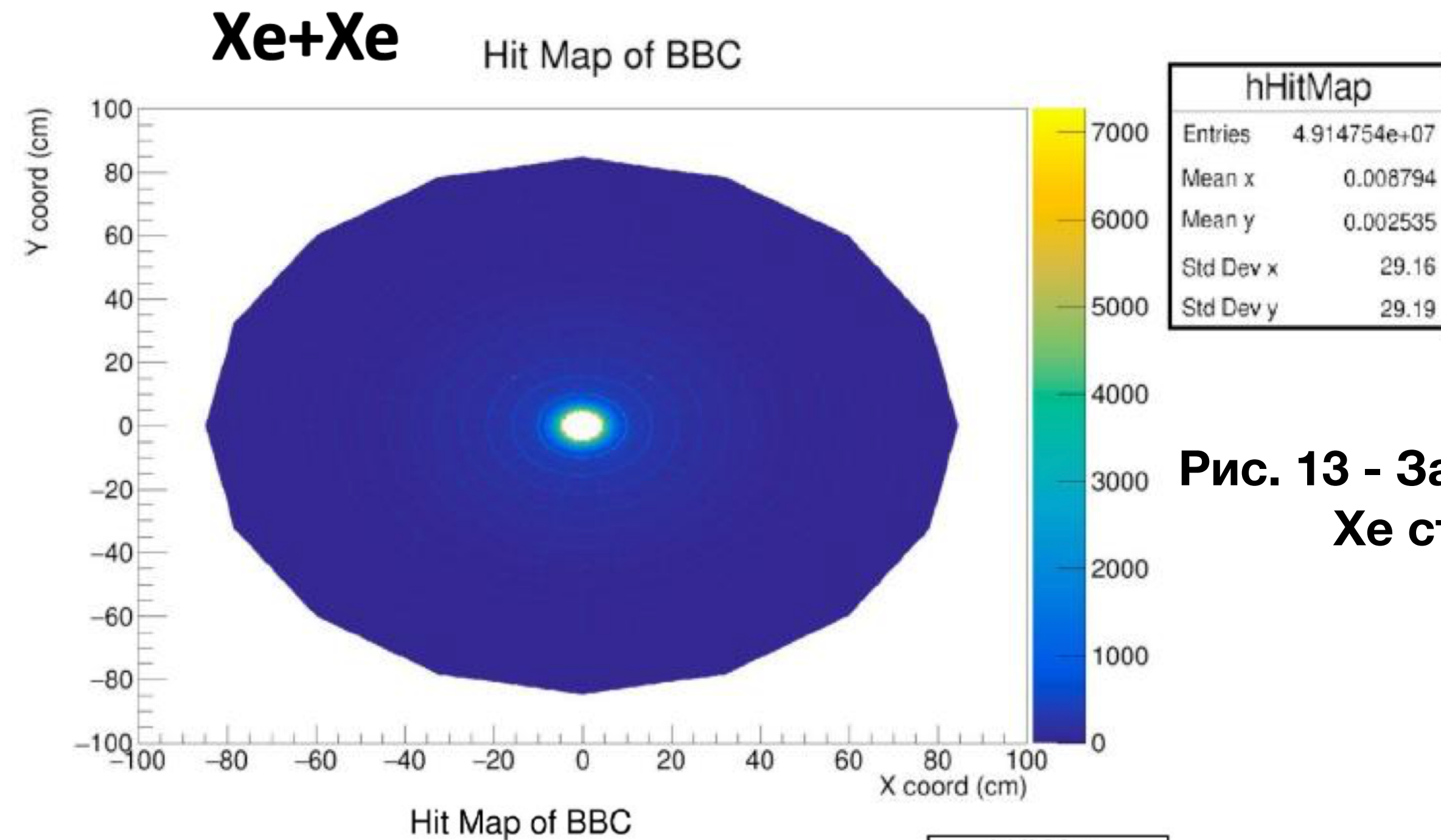


Рис. 13 - Загрузки BBC при Xe-Xe столкновениях

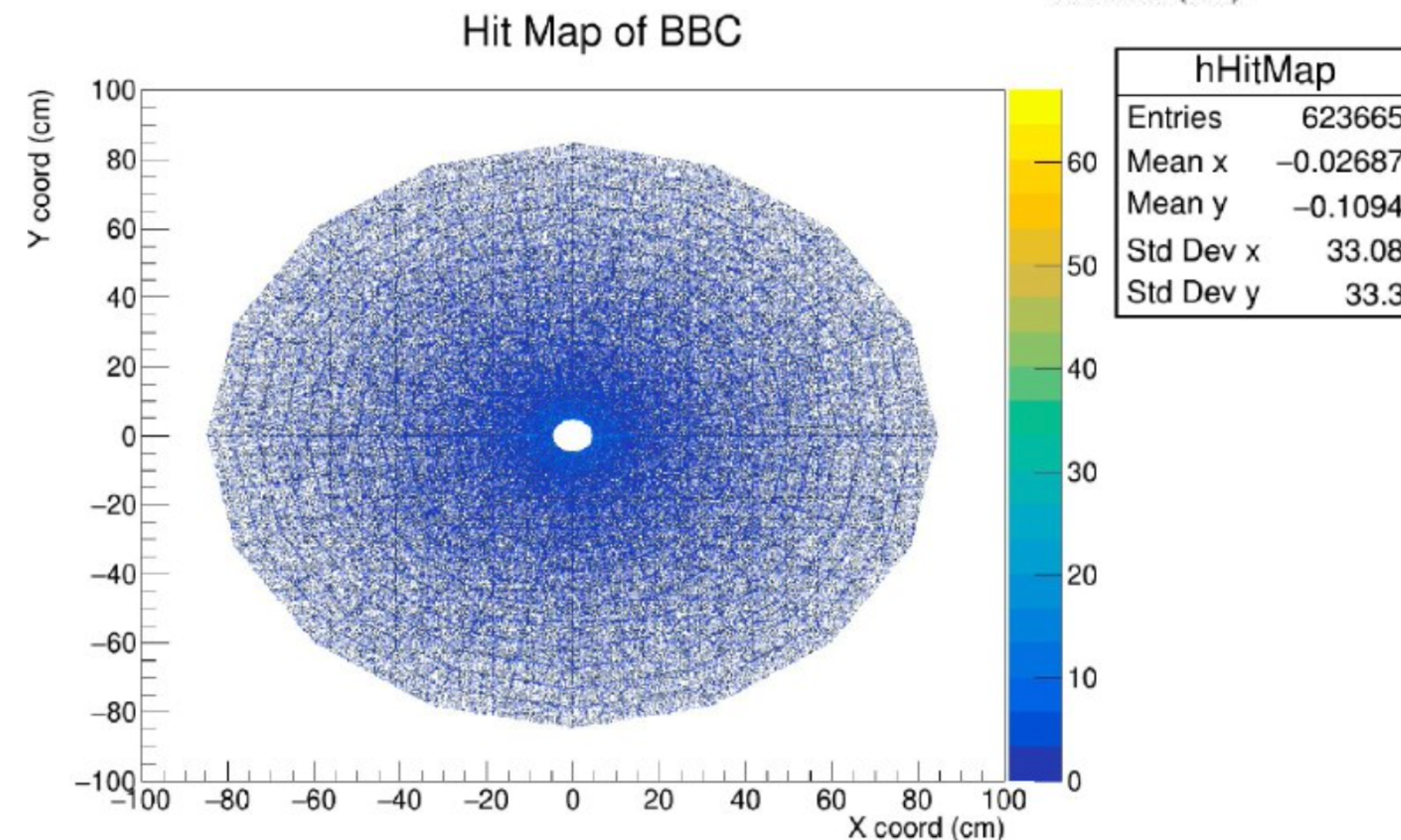


Рис. 14 - Загрузки BBC при p-p столкновениях

Результаты и дальнейшие планы

- Результаты были (и будут представлены) на:

1. **XII Международная молодежная научная школа-конференция «Современные проблемы физики и технологий» (03.04.2025 - 05.04.2025)**, «Моделирование загрузок детектора BBC (Beam-Beam Counters) эксперимента SPD на установке NICA в условиях p-p и ион-ионных столкновений»
2. **IX SPD Collaboration Meeting (12.05.2025 - 16.05.2025)**, «Ongoing BBC detector activities in MEPhI»
3. **LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии» (01.06.2025 - 06.06.2025)**, «Моделирование загрузок детектора Straw Tracker эксперимента SPD на установке NICA в условиях ион-ионных и p-p столкновений»

- Дальнейшие планы:

1. Подготовка (моделирование процессов, создание прототипа) к тест-биму BBC и анализ результатов
2. На основе проделанной в этом году работе (а также на будущих результатах тест-бима) предсказания о работе детектора BBC в p-p и ион-ионных столкновениях
3. Дальнейшее исследование TS в p-p и ион-ионных столкновениях в условиях первой фазы
4. Написание статьи по результатам конференции ЯДРО-2025, по подготовке и результатам тестбима для BBC и по исследованию применимости ион-ионной программы в первой фазе эксперимента SPD

Заключение

- Были получены общие карты загрузок TS (а также помодульные и послойные загрузки) и BBC в р-р и ион-ионных столкновениях
- Были получены распределения импульсных разрешений в центральном секторе псевдобыстрот и различных секторов P_t для р-р и ион-ионных столкновений
- Было произведено сравнение импульсных разрешений в р-р и ион-ионных столкновениях и сделан предварительный вывод о деградации точности с ростом атомного номера ядра в столкновениях

Спасибо за внимание!

Общая загрузка TS в p-p столкновениях

Общая загрузка всего детектора в p-p столкновениях

Параметры:

- Генератор - Pythia8
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 100 000 p-p столкновений
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

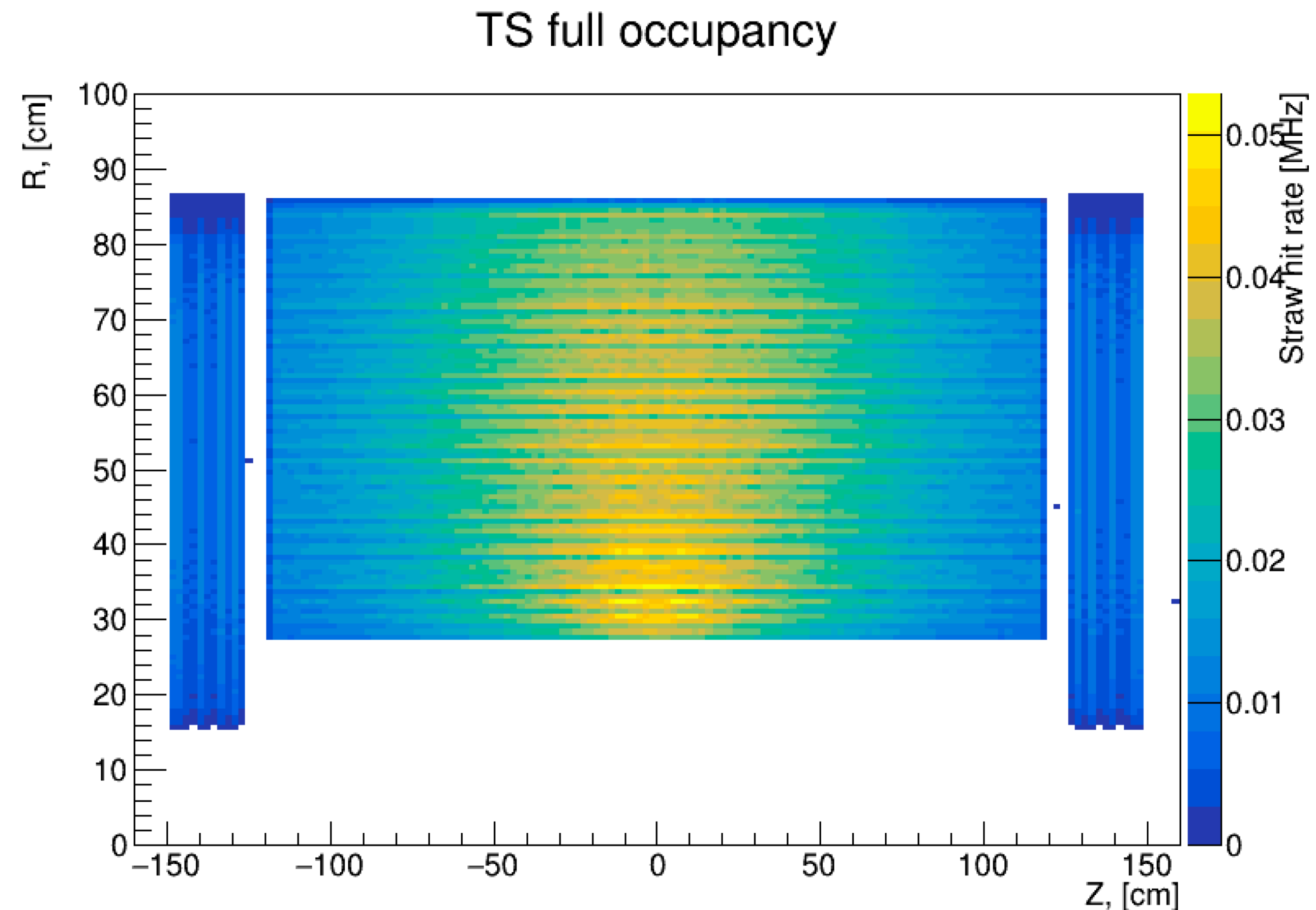


Рис. 15 - Общая загрузка (в barrel и end-caps частях детектора) в p-p столкновениях

Среднее число хитов в каждом straw в TS в p-p столкновениях

Было получено распределение среднего числа хитов в каждую straw среди всех straw, имеющих хотя бы один хит во всем TS

Параметры:

- Генератор - Pythia8
- $\sqrt{s} = 10 GeV$
- 100 000 p-p столкновений
- Minimum bias

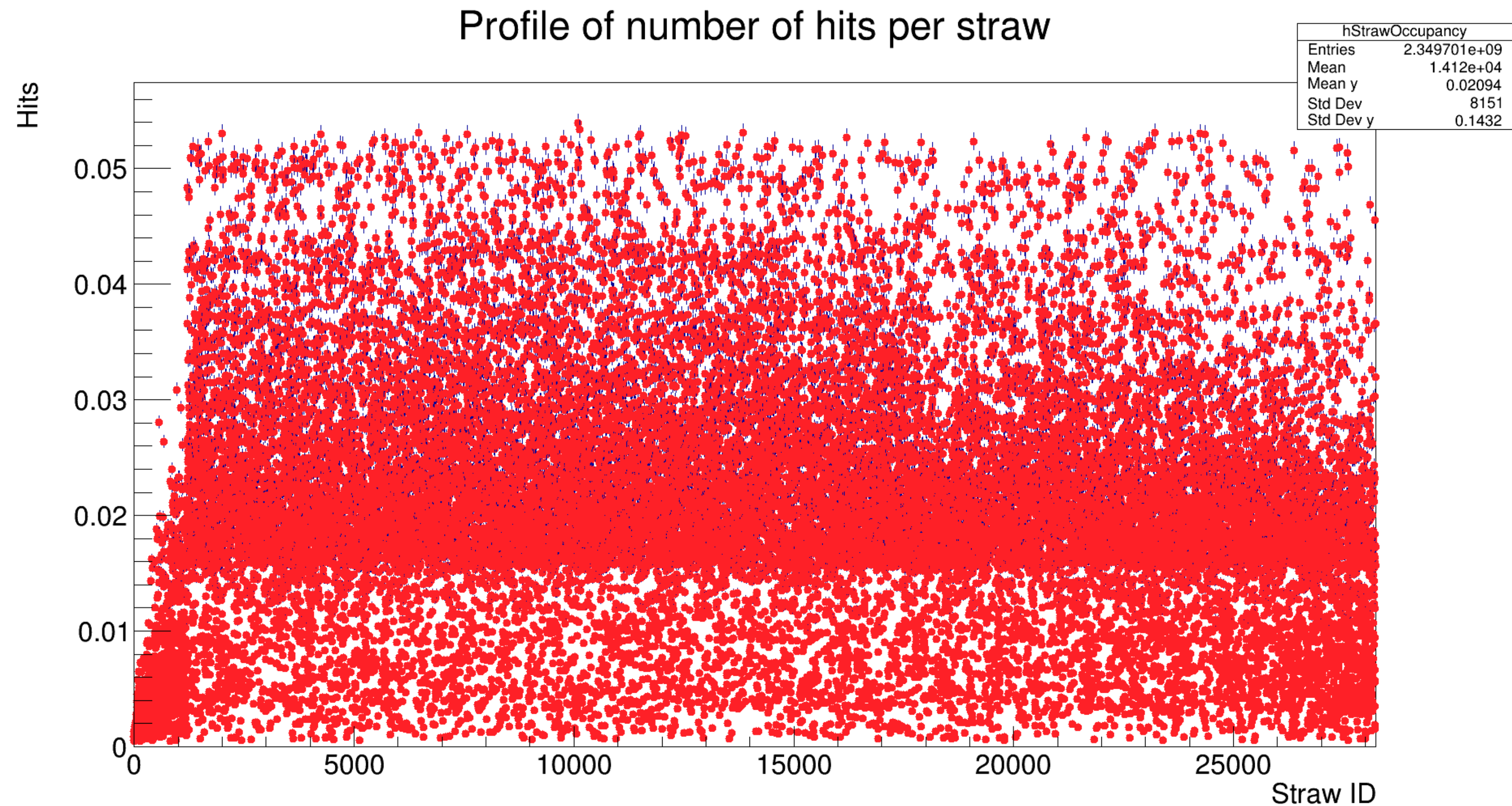


Рис. 16 - Среднее число хитов в каждом straw в p-p столкновениях

Straw multiplicity в TS в p-p столкновениях

Были исследованы задействованные и незадействованные straw. В частности, было определено относительное количество незадействованных straw, а также на Рис. 17 показано multiplicity срабатываний straw в среднем в каждом столкновении (усредненное по всем столкновениям). По оси X показано число хитов одного и того же straw в одном столкновении, а по оси Y - среднее число трубок в которых было столько хитов, сколько указано по оси X

Параметры:

- Генератор - Pythia8
- $\sqrt{s} = 10 GeV$
- 100 000 p-p столкновений
- Minimum bias

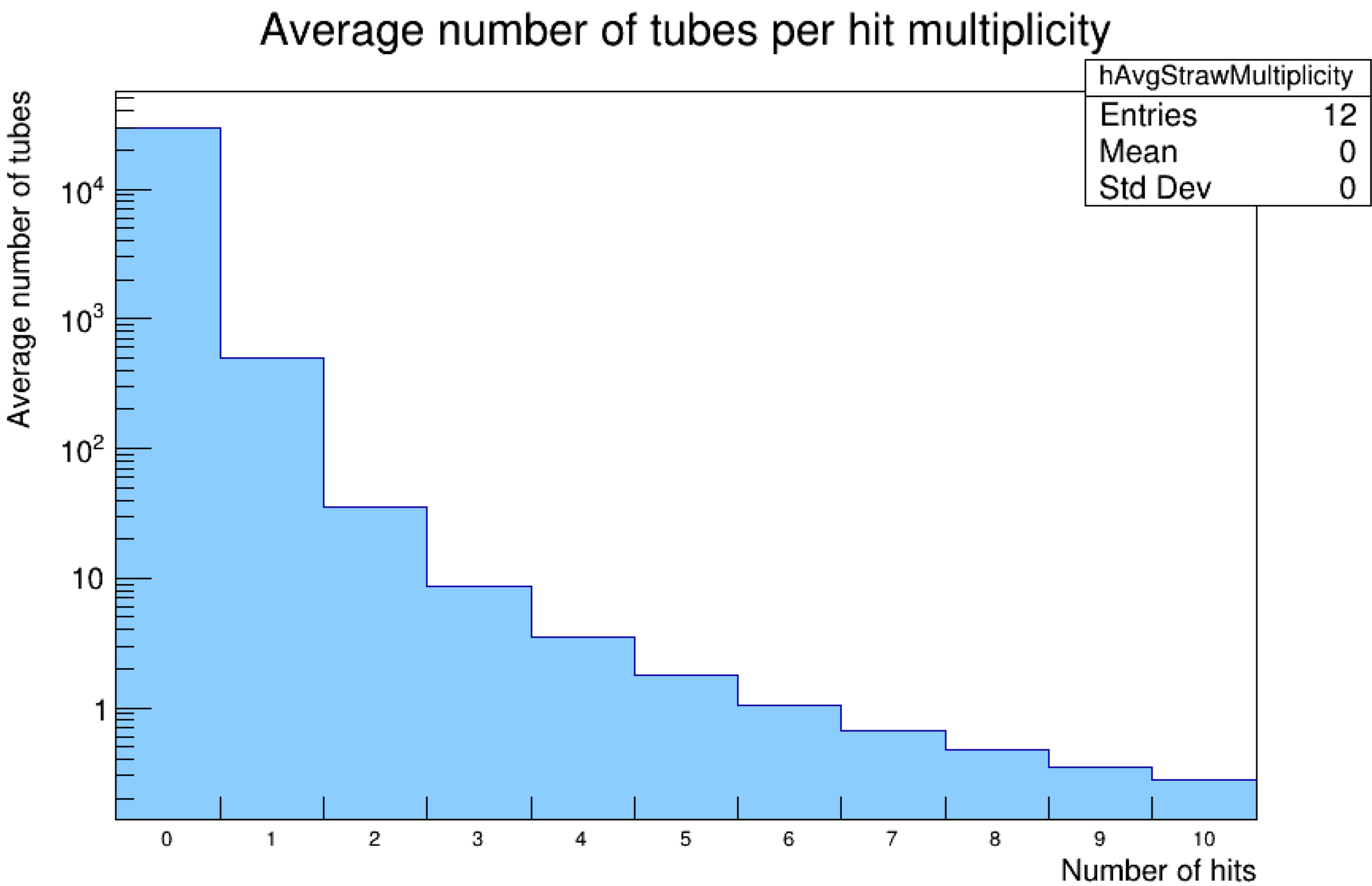


Рис. 17 - Straw hit multiplicity в p-p столкновениях

Относительное количество незадействованных straw: 98.2%

Импульсное разрешение TS в p-p столкновениях

Особый интерес в реконструкции событий в TS представляет регион псевдобыстрот $-1.1 < \eta < 1.1$, так как именно в этом регионе ожидается наиболее точная регистрация частиц. На Рис. 18 показана общая карта загрузок всего TS в этом регионе псевдобыстрот. Для вычисления импульсного разрешения были получены распределения относительных точностей реконструкции Pt ($Pt_{reco} - Pt_{truth})/Pt_{truth}$ для различных регионов Pt . Далее полученные распределения были профитированы распределениями Гаусса и были вычислены среднеквадратичные отклонения, которые и представляли собой импульсное разрешение. На Рис. 19 показаны импульсные разрешения для всего спектра Pt

Параметры:

- Генератор - Pythia8
- $\sqrt{s} = 10 GeV$
- 5 000 p-p столкновений
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

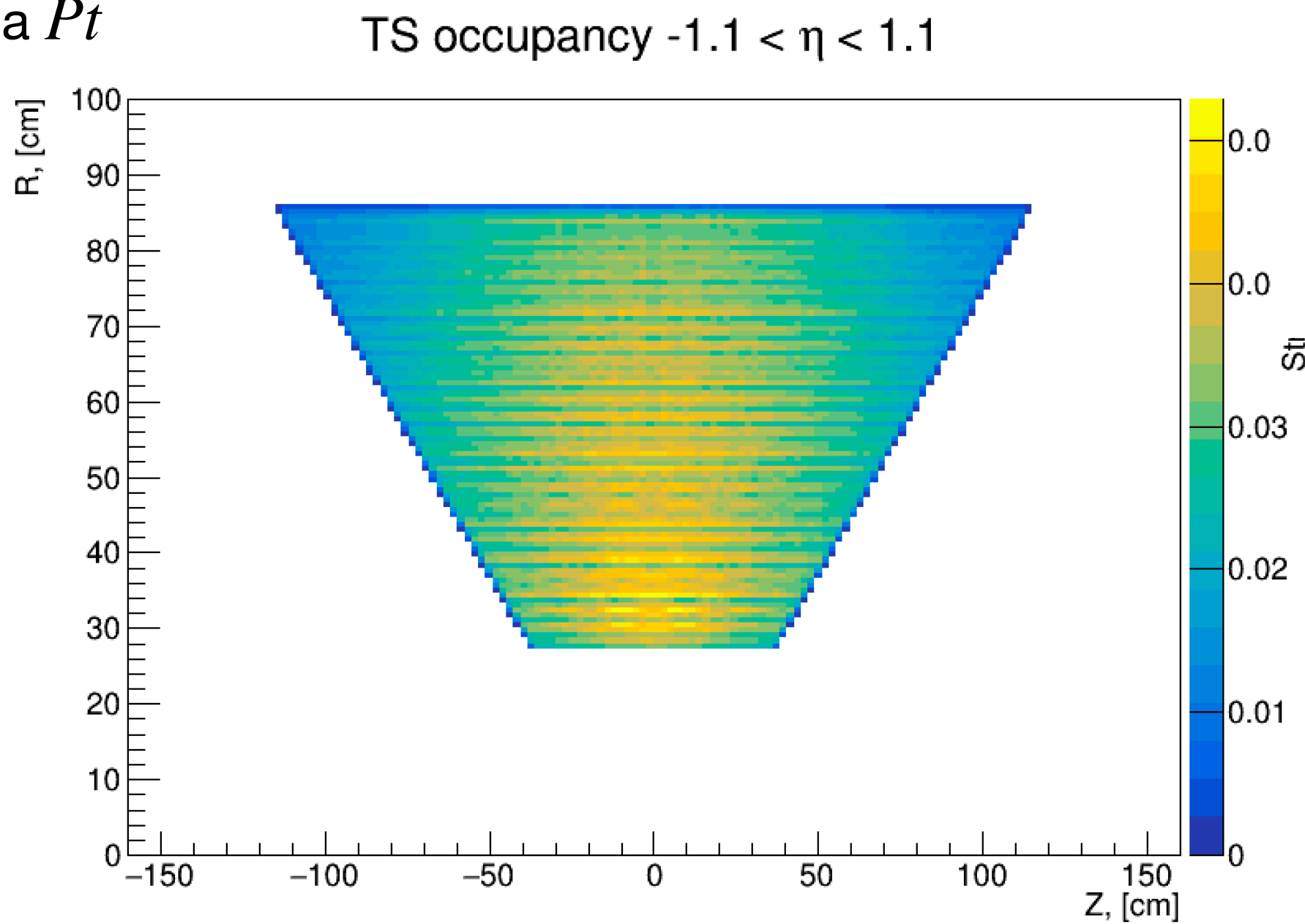


Рис. 18 - Общая загрузка TS в центральном регионе псевдобыстрот

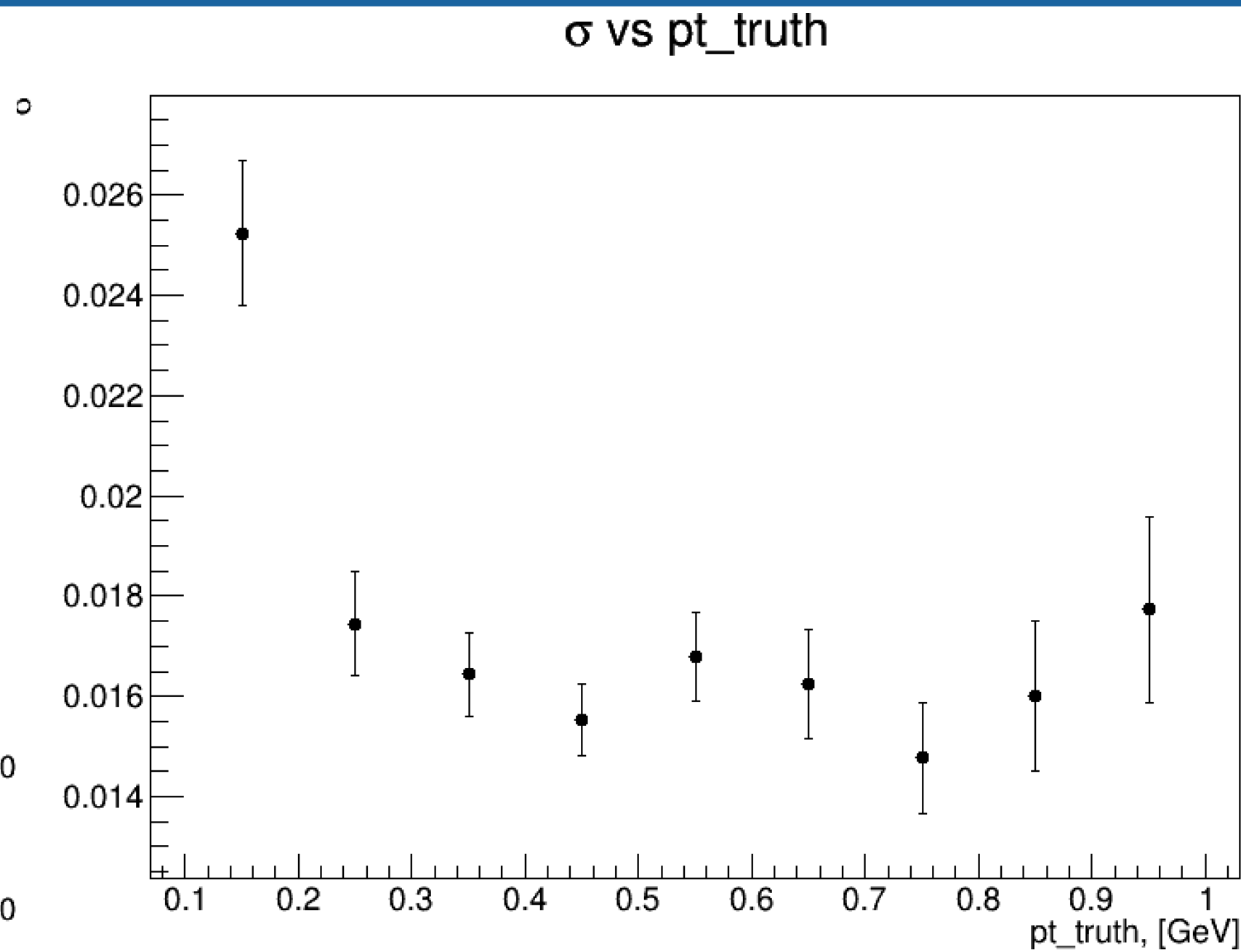


Рис. 19 - Импульсные разрешения TS в различных регионах Pt в центральном регионе псевдобыстрот

Загрузки по модулям TS в p-p столкновениях

Также были получены аналогичные карты загрузок для p-p столкновений для каждого из модулей TS

Параметры:

- Генератор - Pythia8
- $\sqrt{s} = 10 GeV$
- 100 000 p-p столкновений
- Номер модуля - 5
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

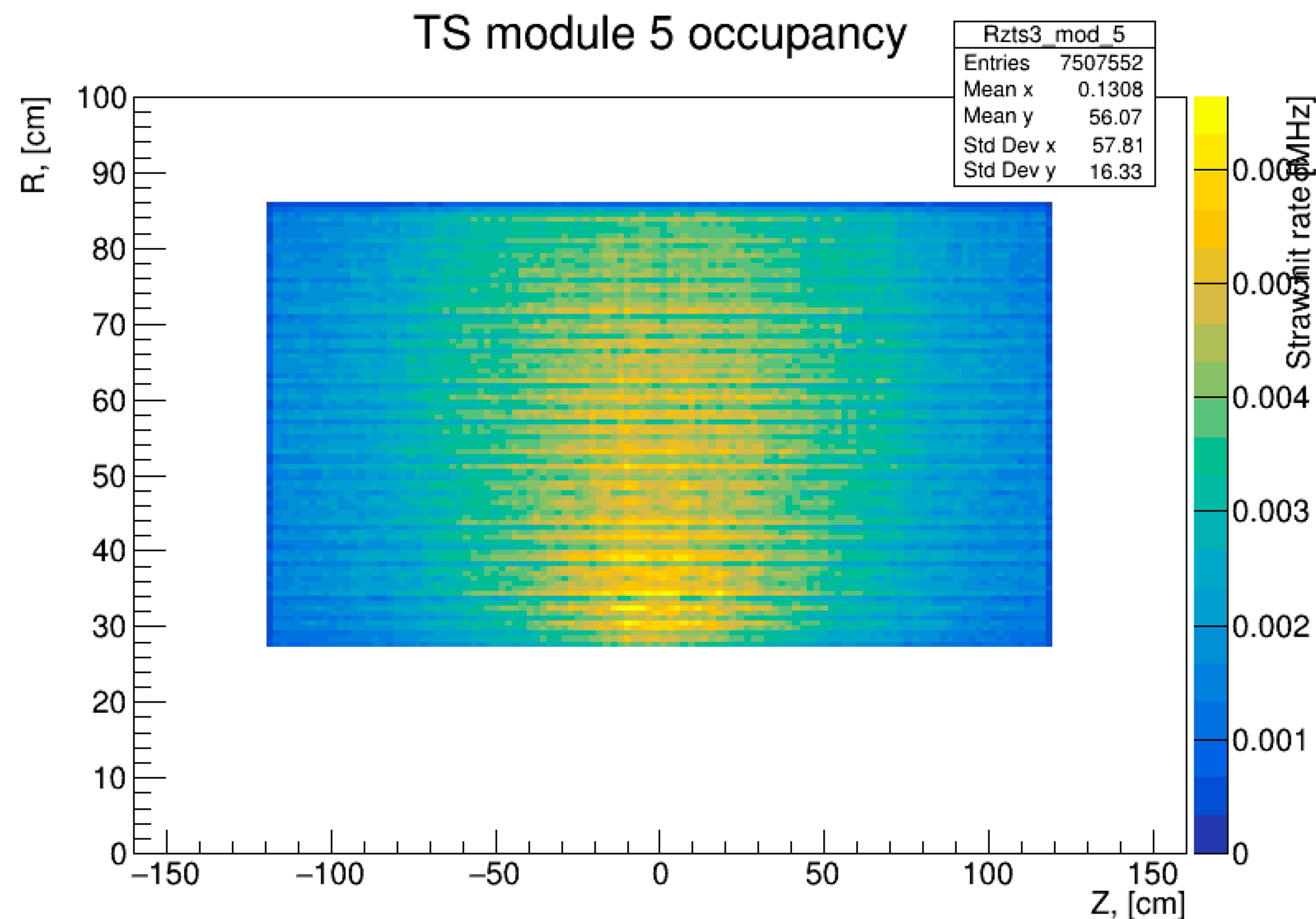


Рис. 20 - Загрузка 5-го модуля в barrel части для p-p столкновений

Загрузки по слоям TS в p-p столкновениях

Также были получены аналогичные карты загрузок для p-p столкновений для каждого из слоев TS

Параметры:

- Генератор - Pythia8
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 100 000 p-p столкновений
- Номер слоя - 15
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

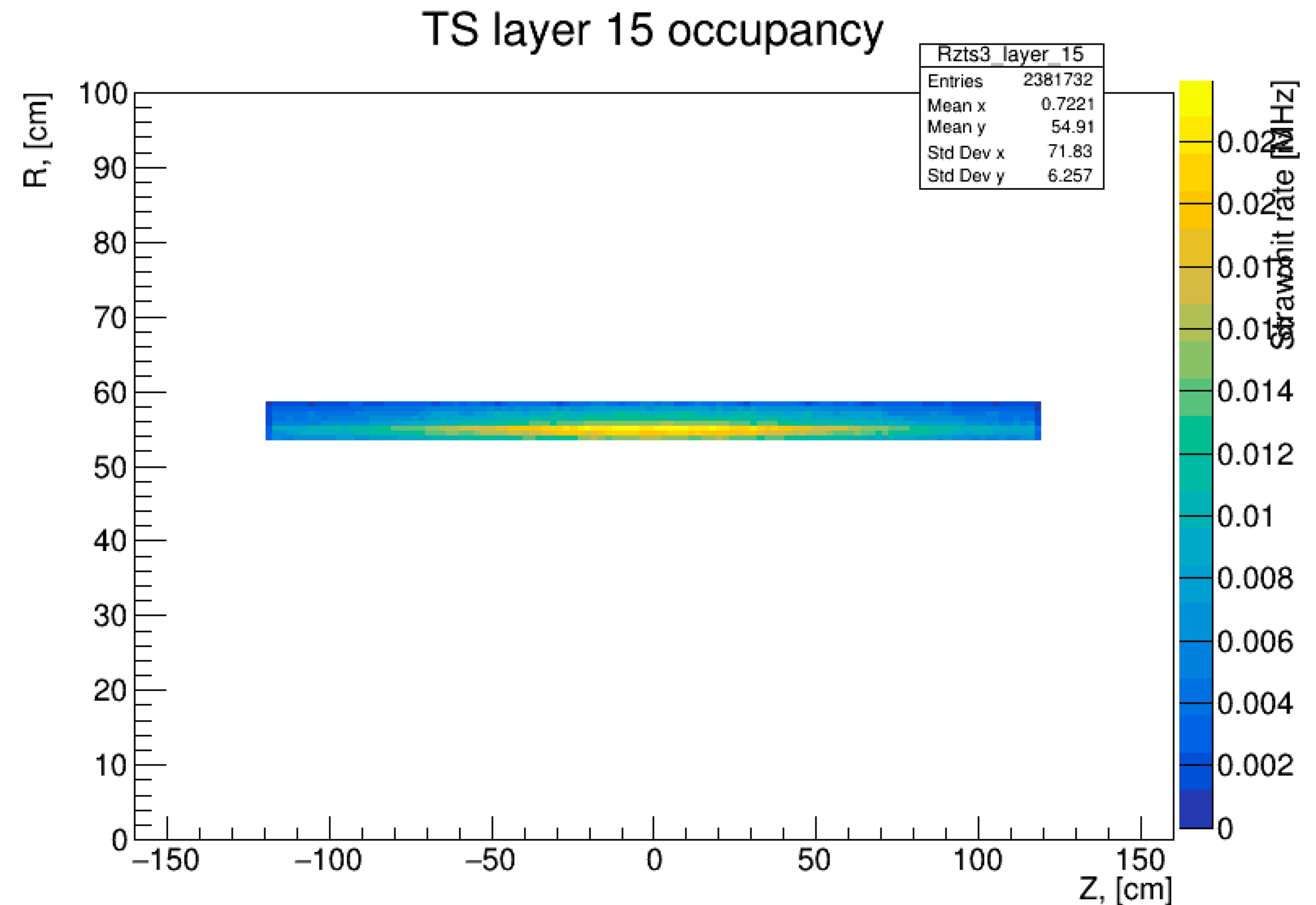


Рис. 21 - Загрузка 15-го слоя в barrel части для p-p столкновений

Загрузки по модулям TS в ион-ионных столкновениях

Также были получены аналогичные карты загрузок для ион-ионных (показано для O-O) столкновений для каждого из модулей TS

Параметры:

- Генератор - URQMD
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 10 000 O-O столкновений
- Номер модуля - 5
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

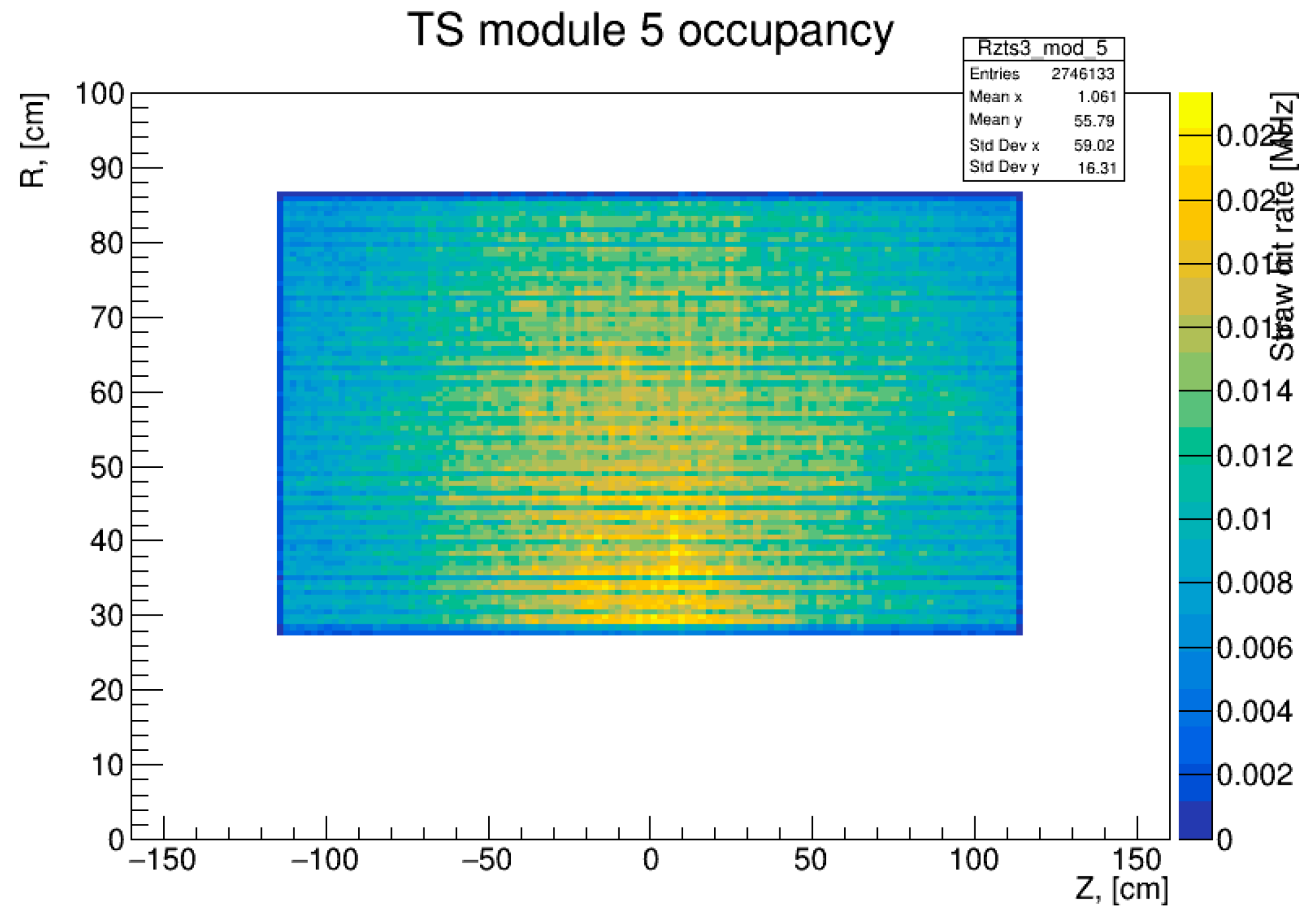


Рис. 22 - Загрузка 5-го модуля в barrel части для O-O столкновений

Загрузки по слоям TS в ион-ионных столкновениях

Также были получены аналогичные карты загрузок для ион-ионных (показано для O-O) столкновений для каждого из слоев TS

Параметры:

- Генератор - URQMD
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 10 000 O-O столкновений
- Номер слоя - 15
- Minimum bias
- Interaction rate (для цветной Z-оси) = 0.4 MHz

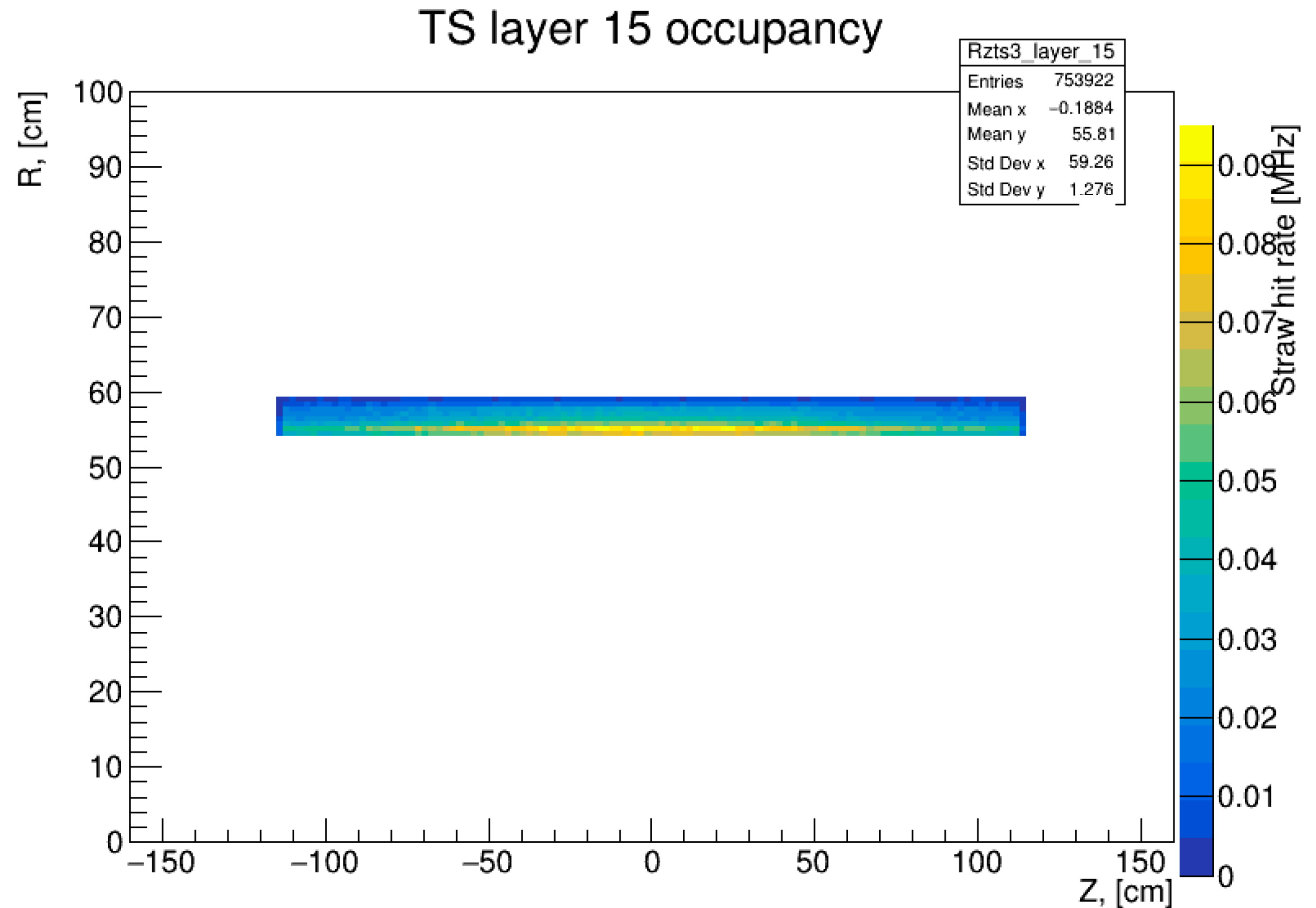


Рис. 23 - Загрузка 15-го слоя в barrel части для O-O столкновений

Среднее число хитов в каждом straw в TS в ион-ионных столкновениях

Было получено распределение среднего числа хитов в каждую straw среди всех straw, имеющих хотя бы один хит во всем TS

Параметры:

- Генератор - URQMD
- $\sqrt{s} = 10\text{GeV}$
- 10 000 O-O столкновений
- Minimum bias

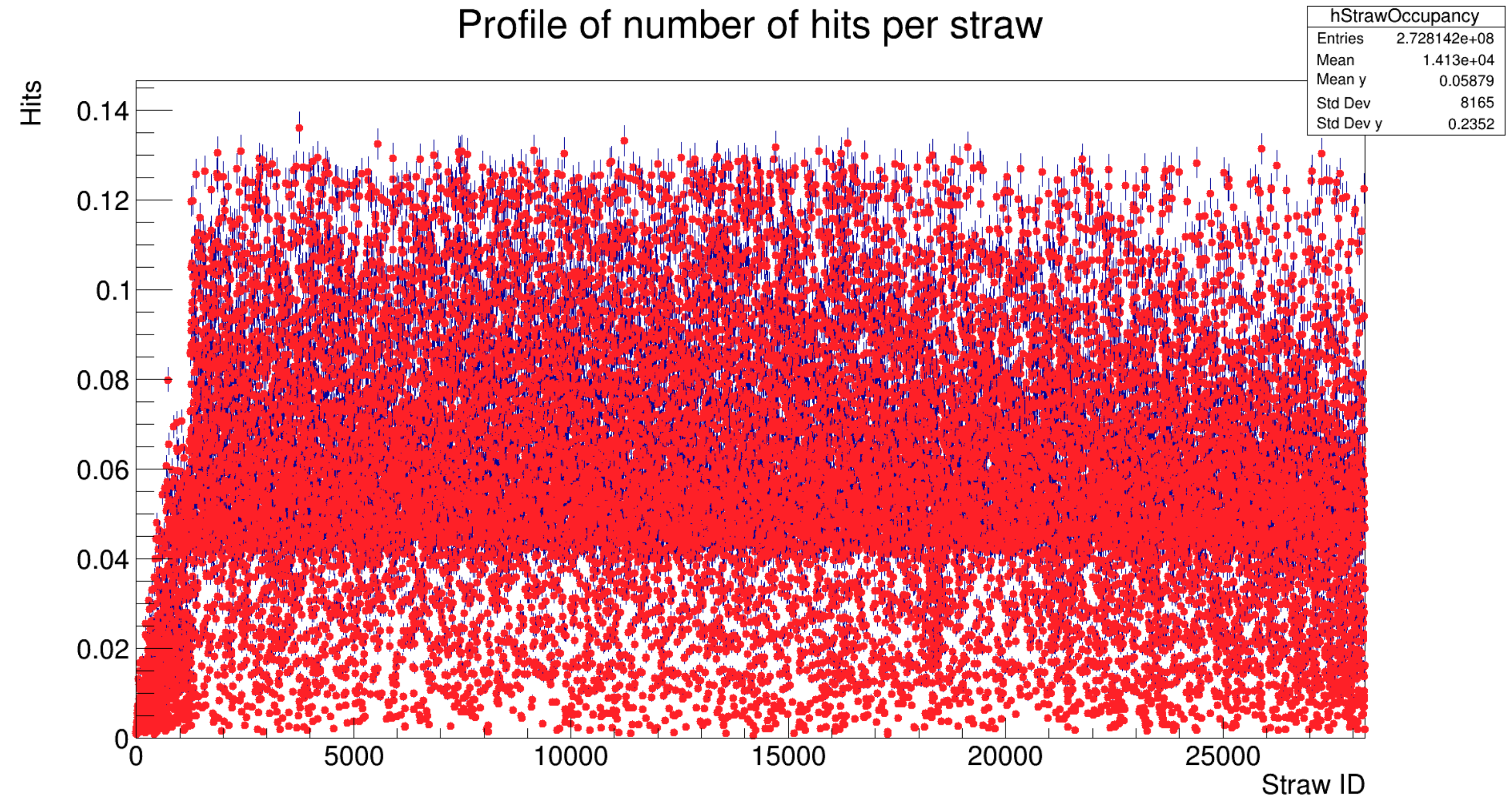


Рис. 24- Среднее число хитов в каждом straw в O-O столкновениях