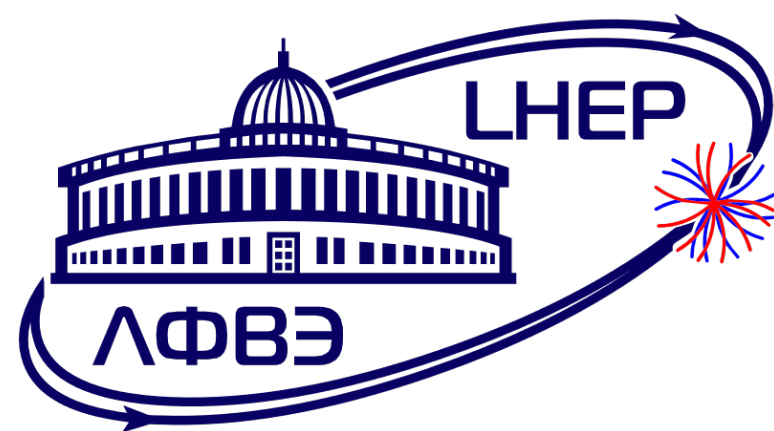


# Отчет по НИР аспиранта (3 курс)



## Методика диагностики и калибровки сцинтилляционных детекторов с помощью рентгеновского сканирования

Аспирант: **Дуров Андрей, А23-102**

Научный руководитель: **к.ф.-м.н. Солдатов Е.Ю.**

**НИЯУ МИФИ**

22-е Июня 2026, Москва

# Цели и задачи

## Новое название темы диссертационной работы:

### **Исследование ограничений ионной программы первой фазы эксперимента SPD на основе моделирования детектора Straw Tracker**

#### Цель:

- Оценка возможностей проведения ион-ионных исследований в первой фазе эксперимента SPD на установке NICA на основе моделирования загрузок детектора Straw Tracker, эффективности реконструкции треков и импульсного разрешения, необходимых для измерений поляризации гиперонов

#### Задачи:

- Оценить загрузки детектора Straw Tracker в p-p и ион-ионных столкновениях на основах моделирования
- Оценить эффективности реконструкции треков в p-p и ион-ионных столкновениях на моделировании и на результатах тестов на пучке прототипа Straw Tracker
- Оценить импульсное разрешение детектора Straw Tracker в p-p и ион-ионных столкновениях
- Сделать оценку возможных измерений поляризации гиперонов

# Эксперимент SPD

## 1-я фаза SPD:

- Подсистемы: Магнит, ST, BBC, MVD, ZDC
- Ожидаемые энергии: до  $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$  для  $p$  и  
до  $\sqrt{s_{NN}} = 10 \text{ GeV}$  для ионов
- Ожидаемая светимость: до  $L = 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- **Возможность запросить ион-ионные пучки**

## Straw Tracker в условиях большой загрузки:

- Ключевой детектор для трекинга частиц
- Высокая множественность частиц может приводить к перекрытию сигналов
- Front-end электроника имеет конечное время обработки сигналов
- Высокая загрузка детектора может влиять на качество реконструкции треков

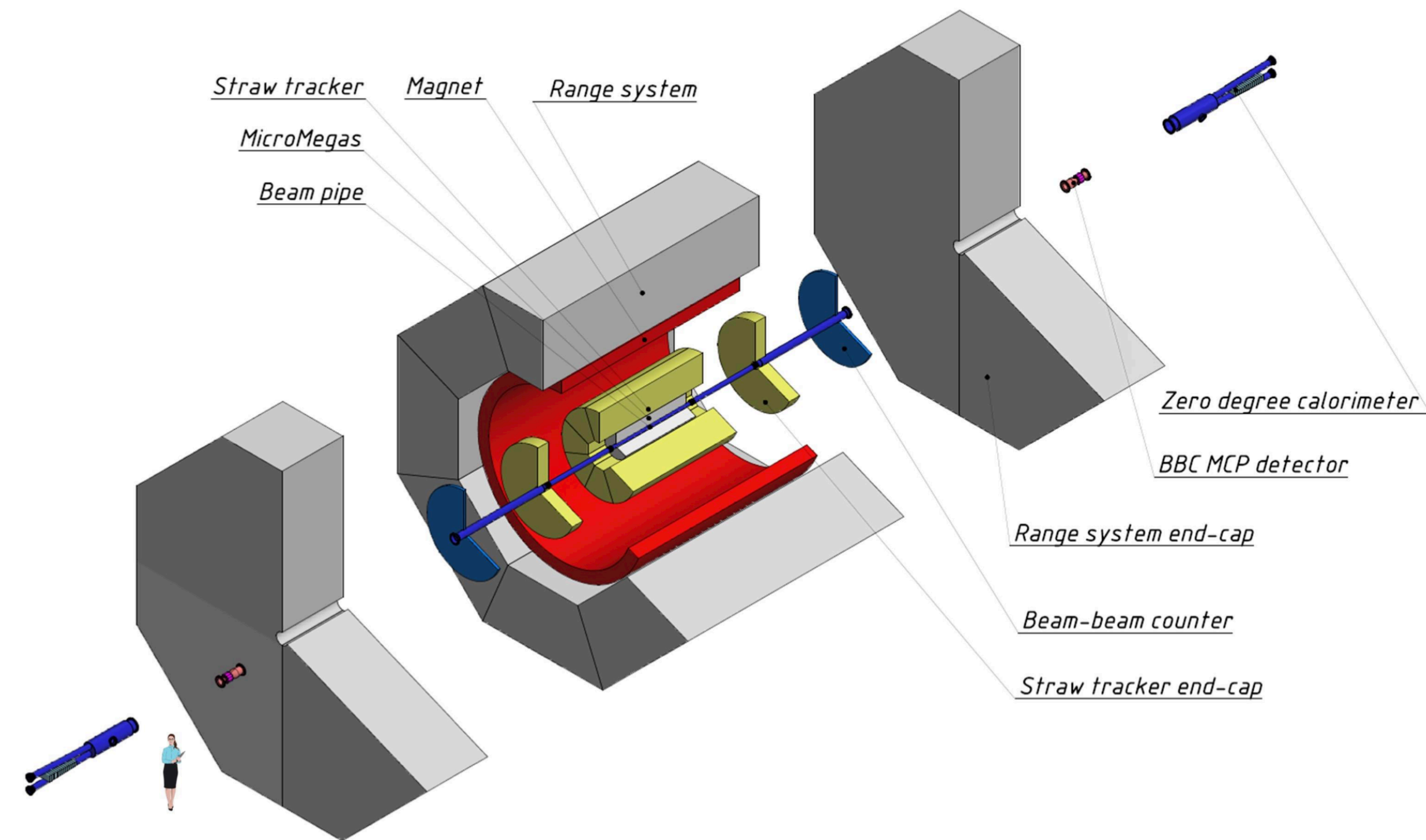


Рис. 1 - Эксперимент SPD (1-я фаза)

# Ионная программа в SPD

## Зачем нужна ионная программа?

- Извлечение ядерных PDF из данных ион-ионных столкновений
- Исследование свойств кварк-глюонной материи в малых системах (p-p, d-d, O-O, Ar-Ar, Kr-Kr, Xe-Xe)
- Рождение тяжёлых кварков

## Почему именно SPD?

- Дополняет детектор MPD и обладает уникальными физическими возможностями
- Высокая частота триггера и хорошее пространственное разрешение
- Широкий охват по псевдобыстроте

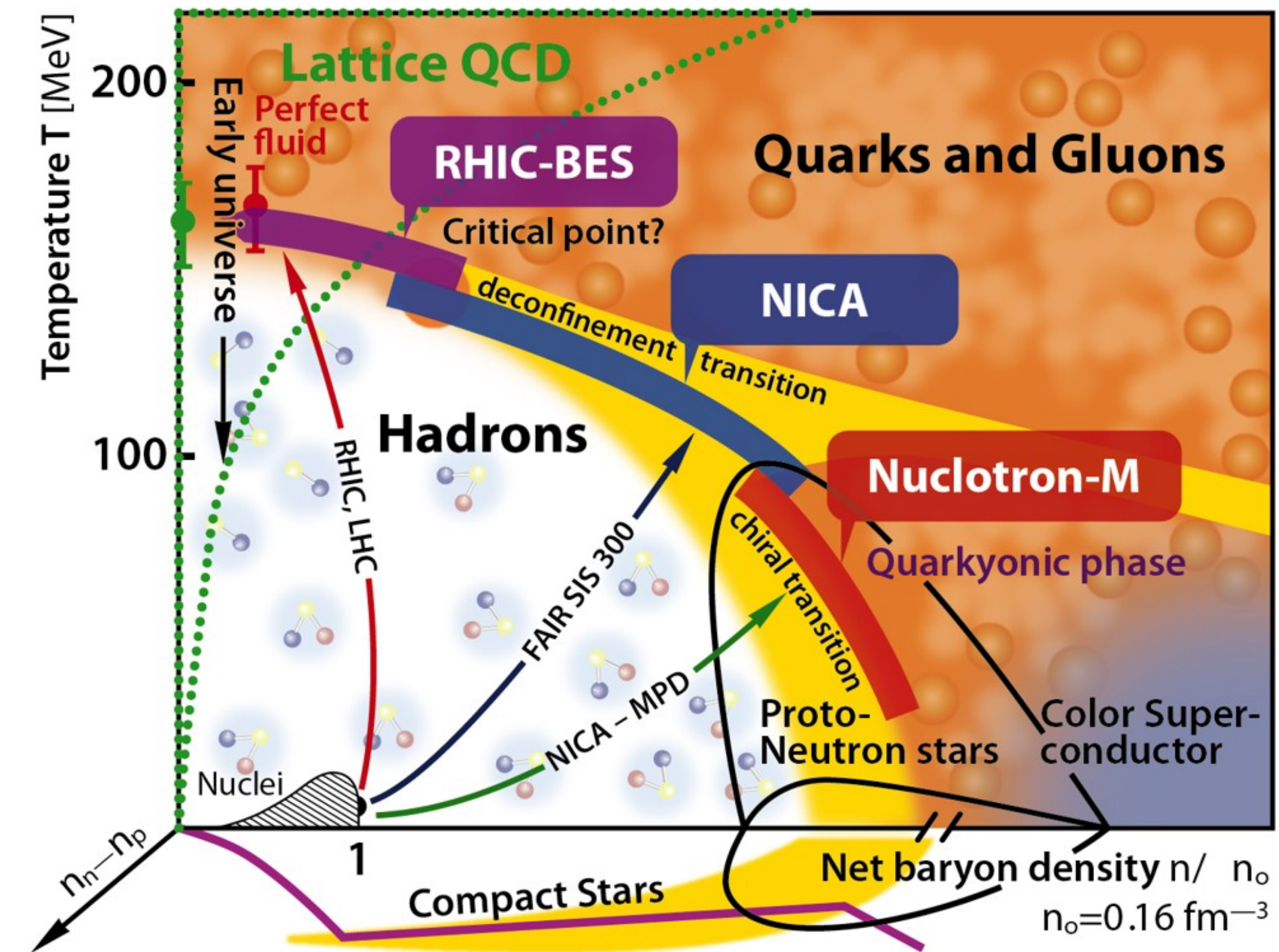


Рис. 2 - Область энергий NICA на фазовой диаграмме КХД

# Straw Tracker (ST) & цель исследования

## Конструкция:

1. **Barrel:** 6 модулей, каждый содержит около 3860 straw tubes: прямые и наклонные. Всего около 23 160 трубок - предназначены для трекинга
2. **End-caps:** по 8 координатных плоскостей (дисков) с каждой стороны, всего 16 дисков. Используются straw tubes различной ориентации и длины - предназначены для трекинга и идентификации частиц

## Общая цель исследования:

- Определить условия по загрузкам для разных сталкивающихся систем, при которых ST сохраняет устойчивую работу, и область, где трекинг начинает ухудшаться
- Использовать полученные результаты для выбора практических настроек детектора и алгоритмов реконструкции, обеспечивающих стабильную работу в рамках ионной программы

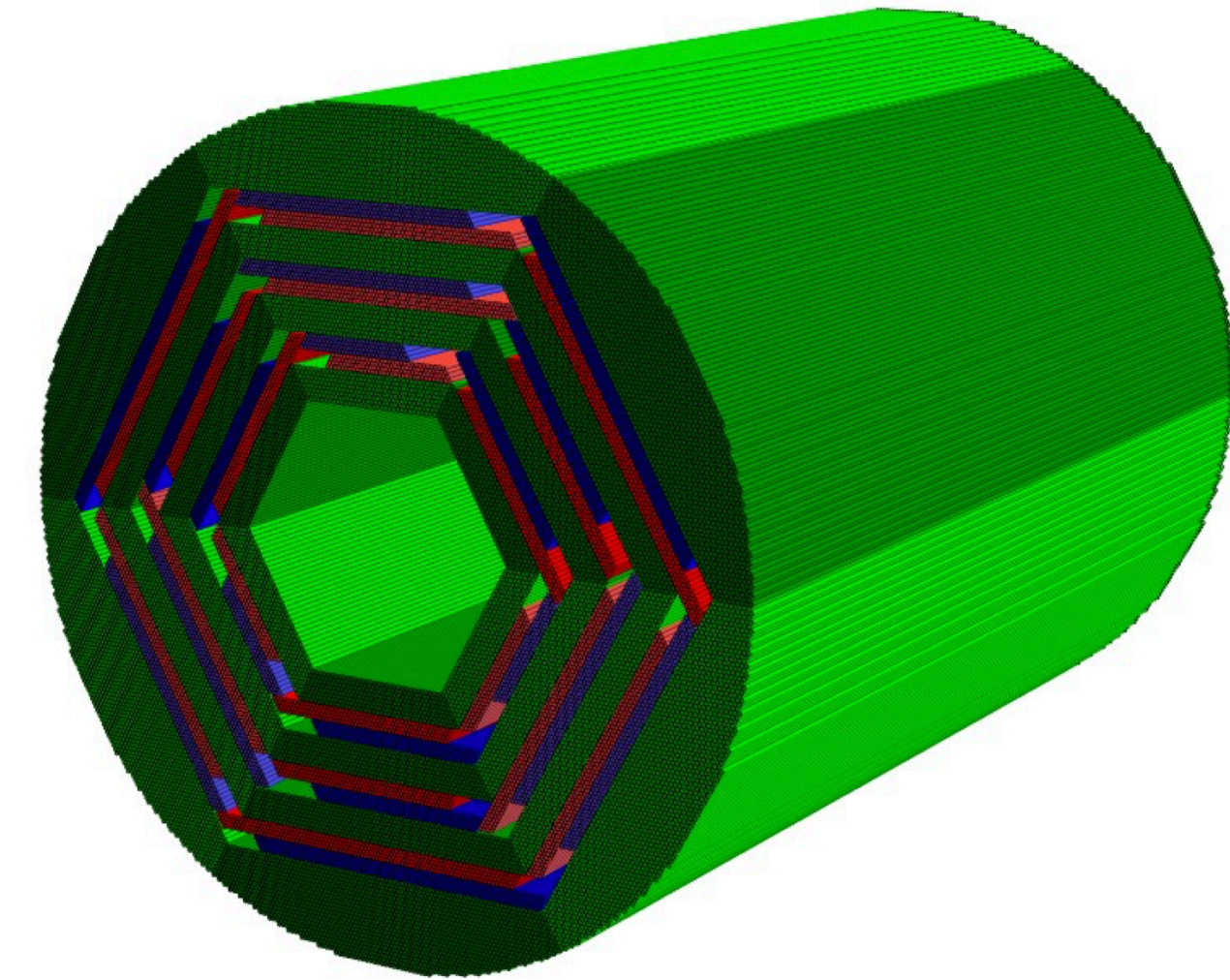


Рис. 3 - Straw Tracker (barrel)

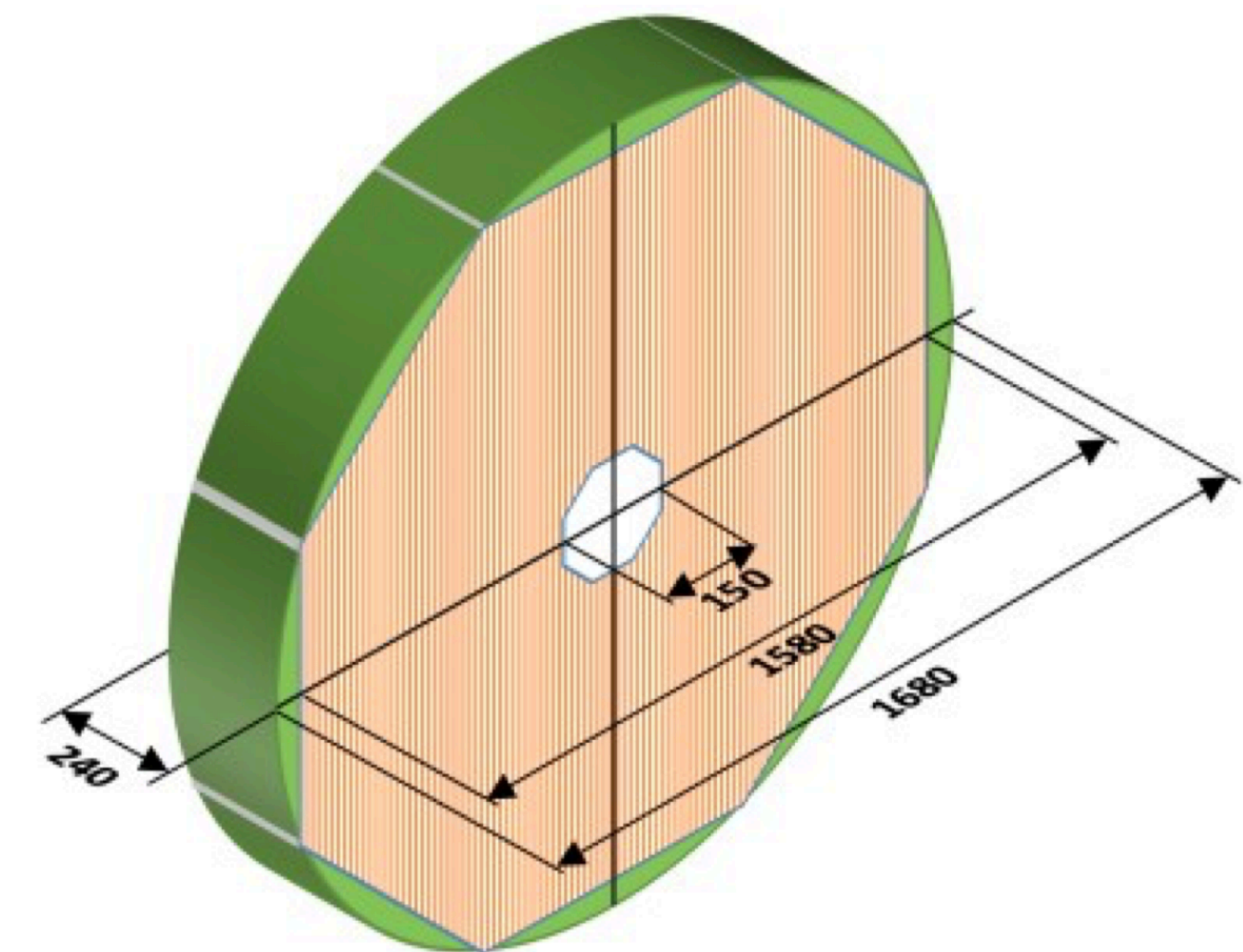


Рис. 4- Straw Tracker (end-cap)

# Загрузки ST и straw в p-p столкновениях

Рис. 5 - Цветовая карта ST (barrel и end-caps части) в p-p столкновениях

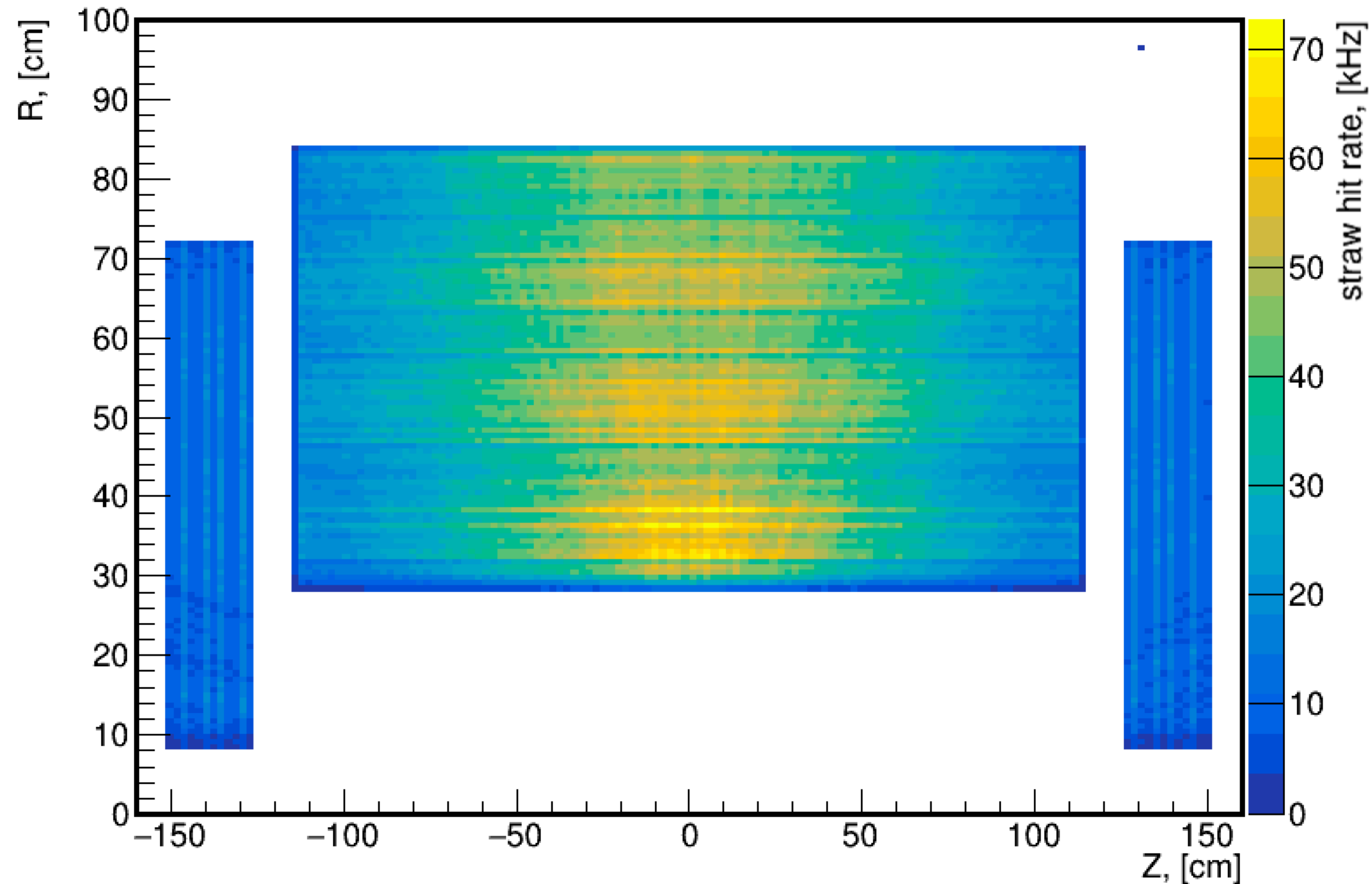
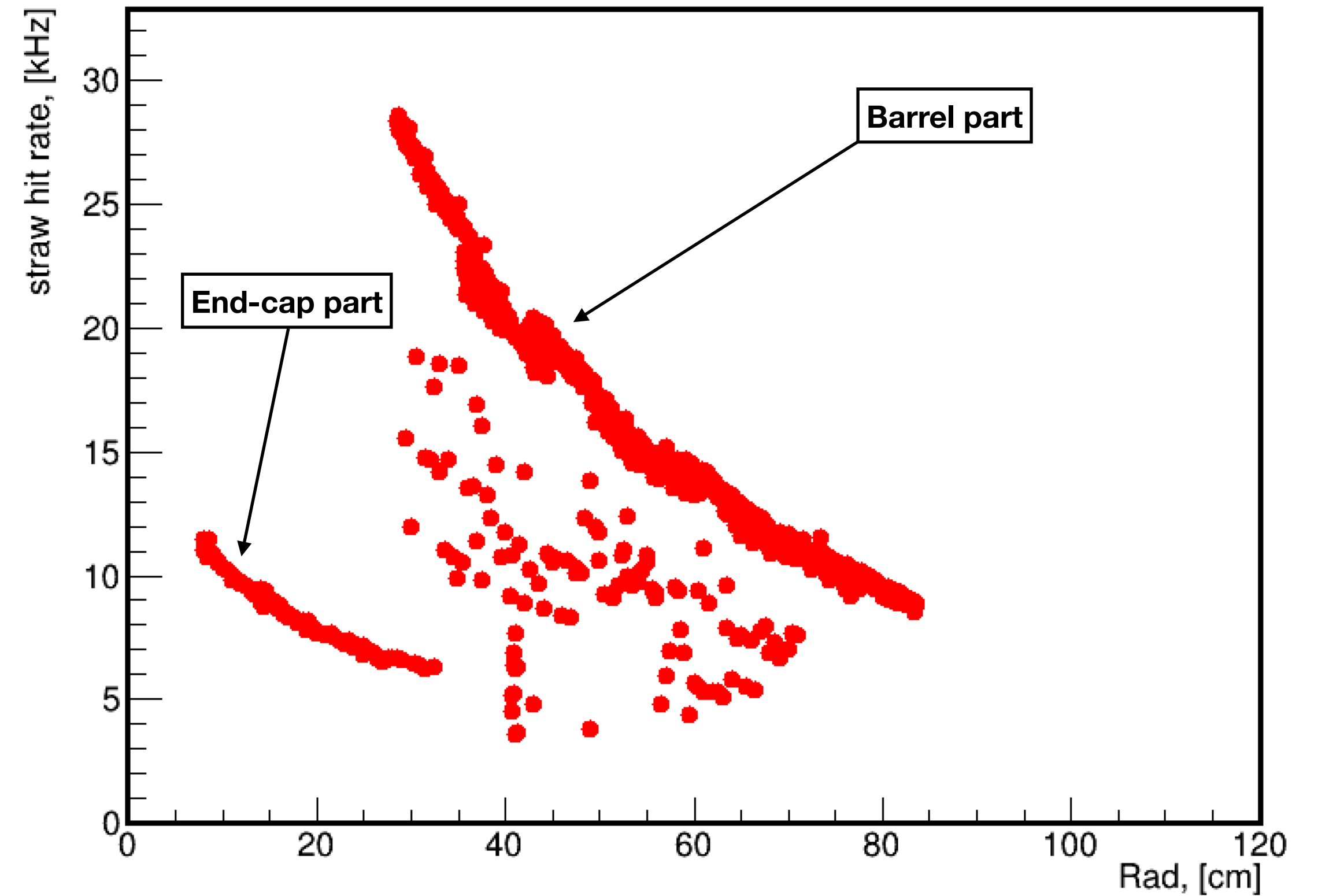


Рис. 6 - Зависимость частоты срабатываний straw с одинаковым радиальным расстоянием от радиального расстояния в p-p столкновениях



Параметры симуляций:

- Генератор: Pythia8
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

- 48 000 p-p столкновений
- Minimum bias
- Частота взаимодействий (для цветной Z-оси) = 400 kHz

Частота взаимодействий взята из SPD TDR:  
<https://arxiv.org/pdf/2404.08317>

# Загрузки ST и straw в O-O столкновениях

Рис. 7 - Цветовая карта ST (barrel и end-caps части) в O-O столкновениях

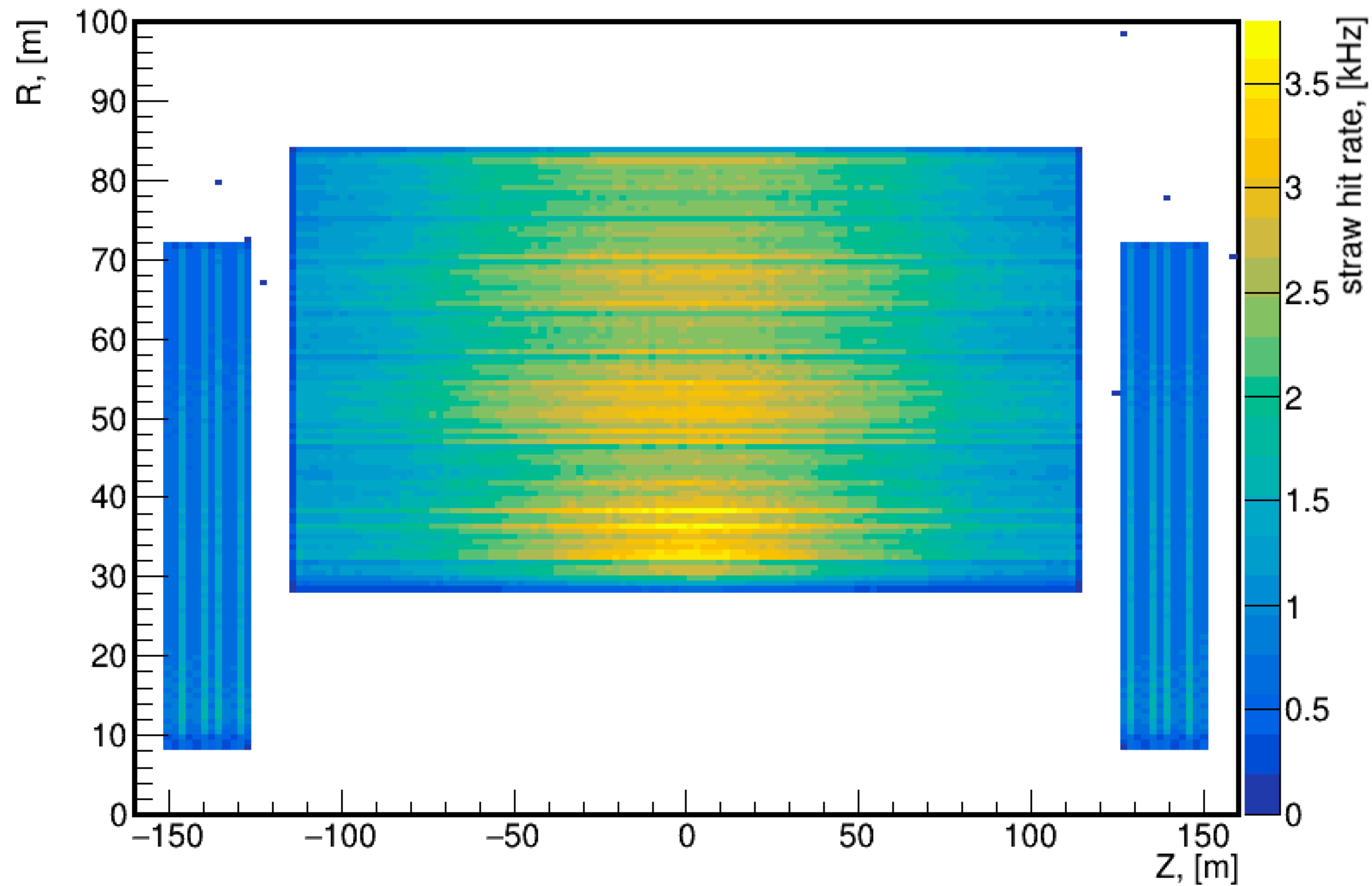
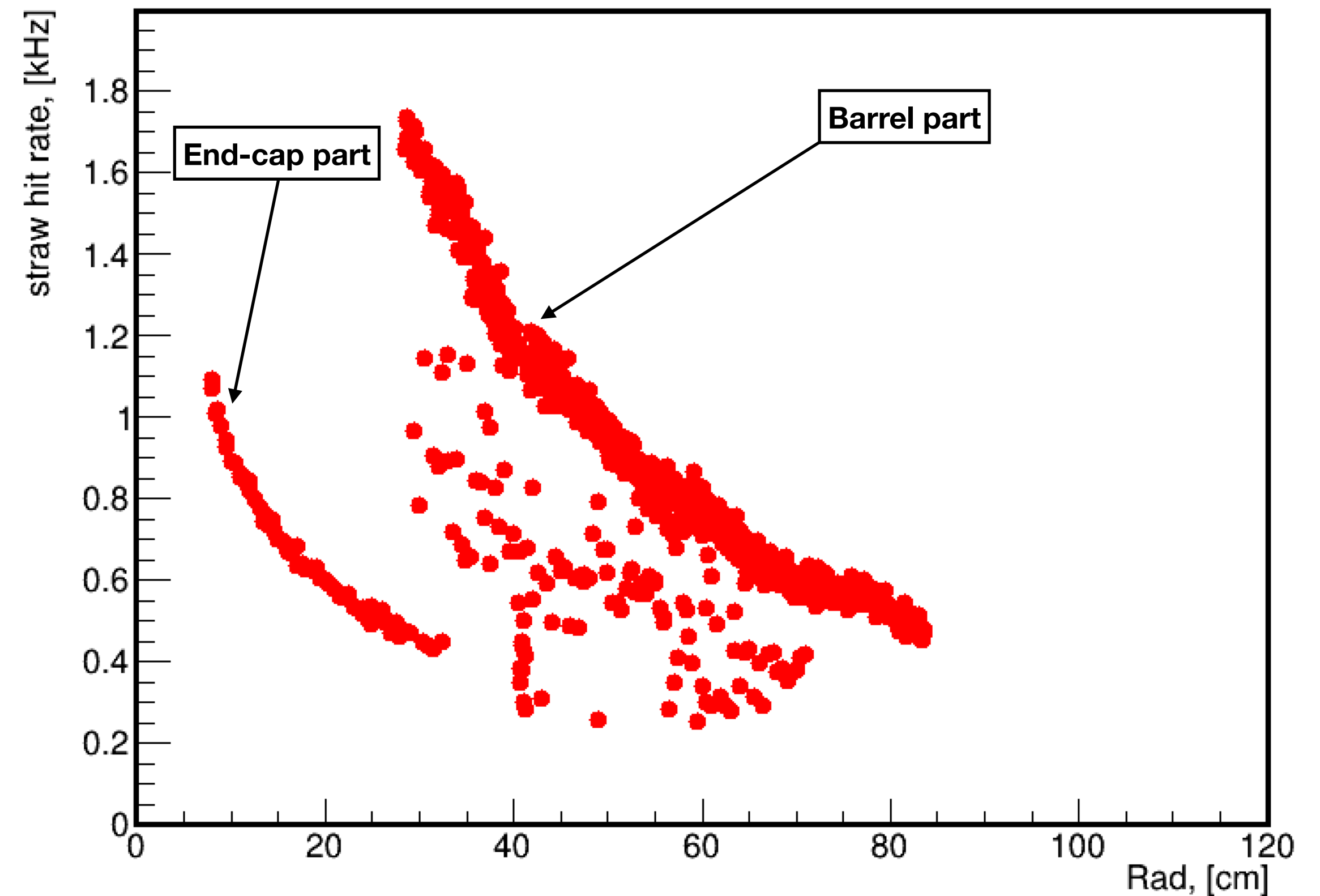


Рис. 8 - Зависимость частоты срабатываний straw с одинаковым радиальным расстоянием от радиального расстояния в O-O столкновениях



Параметры симуляций:

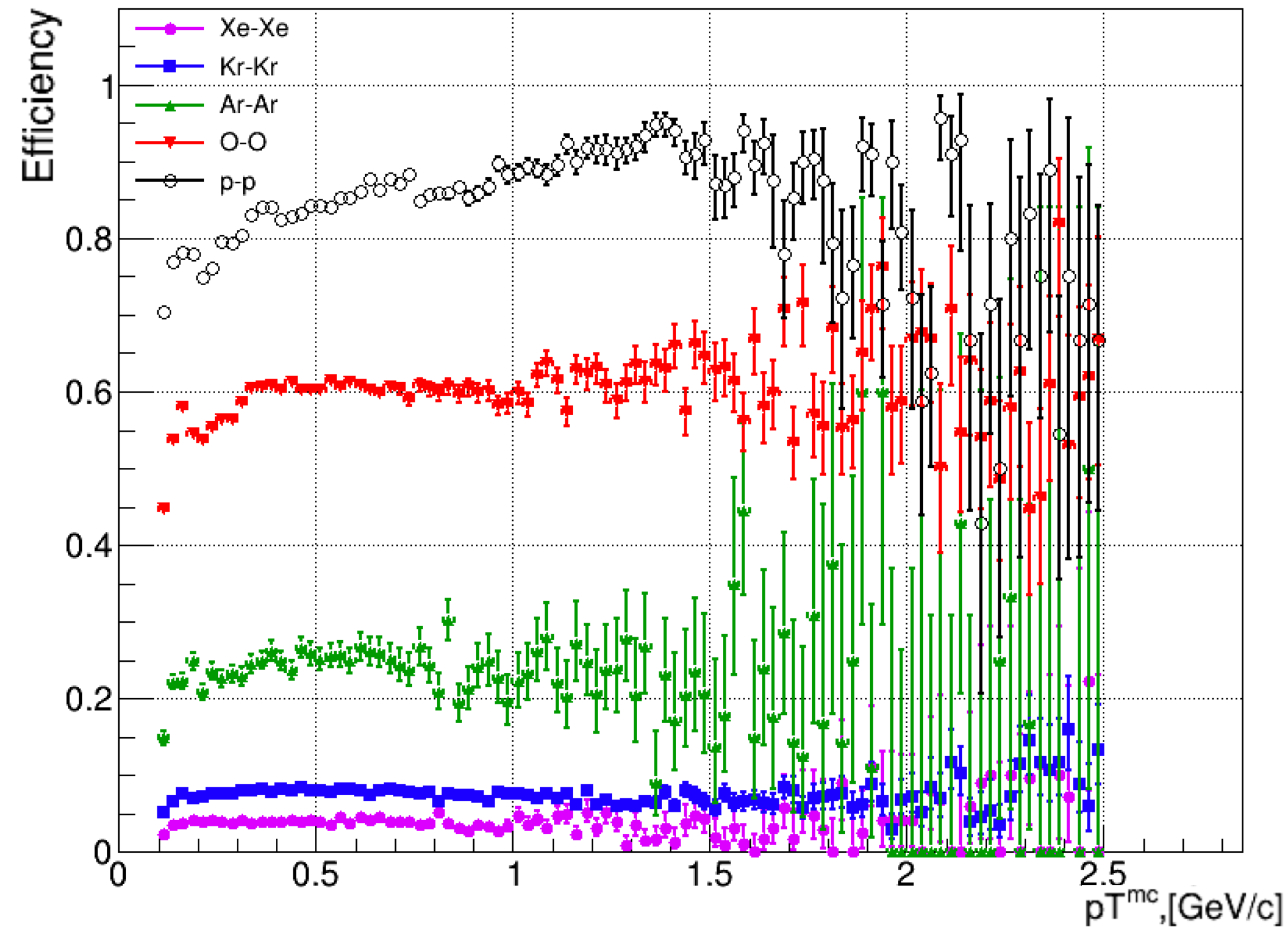
- Генератор: UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

- 75 000 O-O столкновений ( $O_8^{16}$ )
- Minimum bias
- Частота взаимодействий (для цветной Z-оси) = 7 kHz

Частота взаимодействий взята из MPD CDR:  
[https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD\\_CDR\\_en.pdf](https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD_CDR_en.pdf)

# Эффективности реконструкции

Рис. 9 - Сравнение эффективностей реконструкций



Данный критерий  
обеспечивает исключение  
«ЛОЖНЫХ»  
реконструированных треков

## Параметры симуляций:

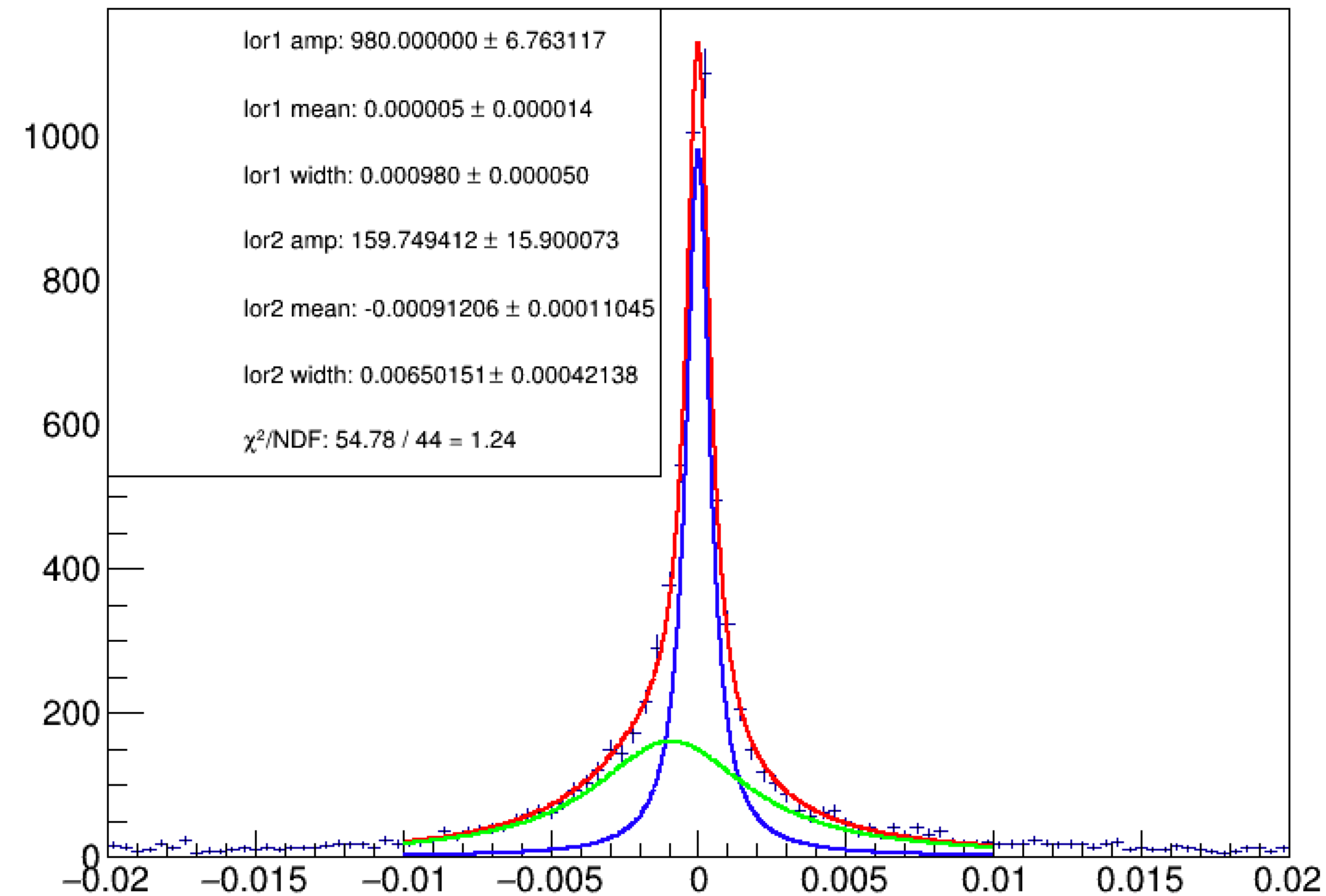
- Генераторы: Pythia8 & UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

- p-p, O-O, Ar-Ar, Kr-Kr и Xe-Xe столкновения
- Minimum bias
- $-2 < \eta < 2$

- $pT \geq 0.1 \text{ GeV}$
- **МС треки and reso треки имеют более 51% общих ХИТОВ**

# Исследование импульсного разрешения Straw Tracker

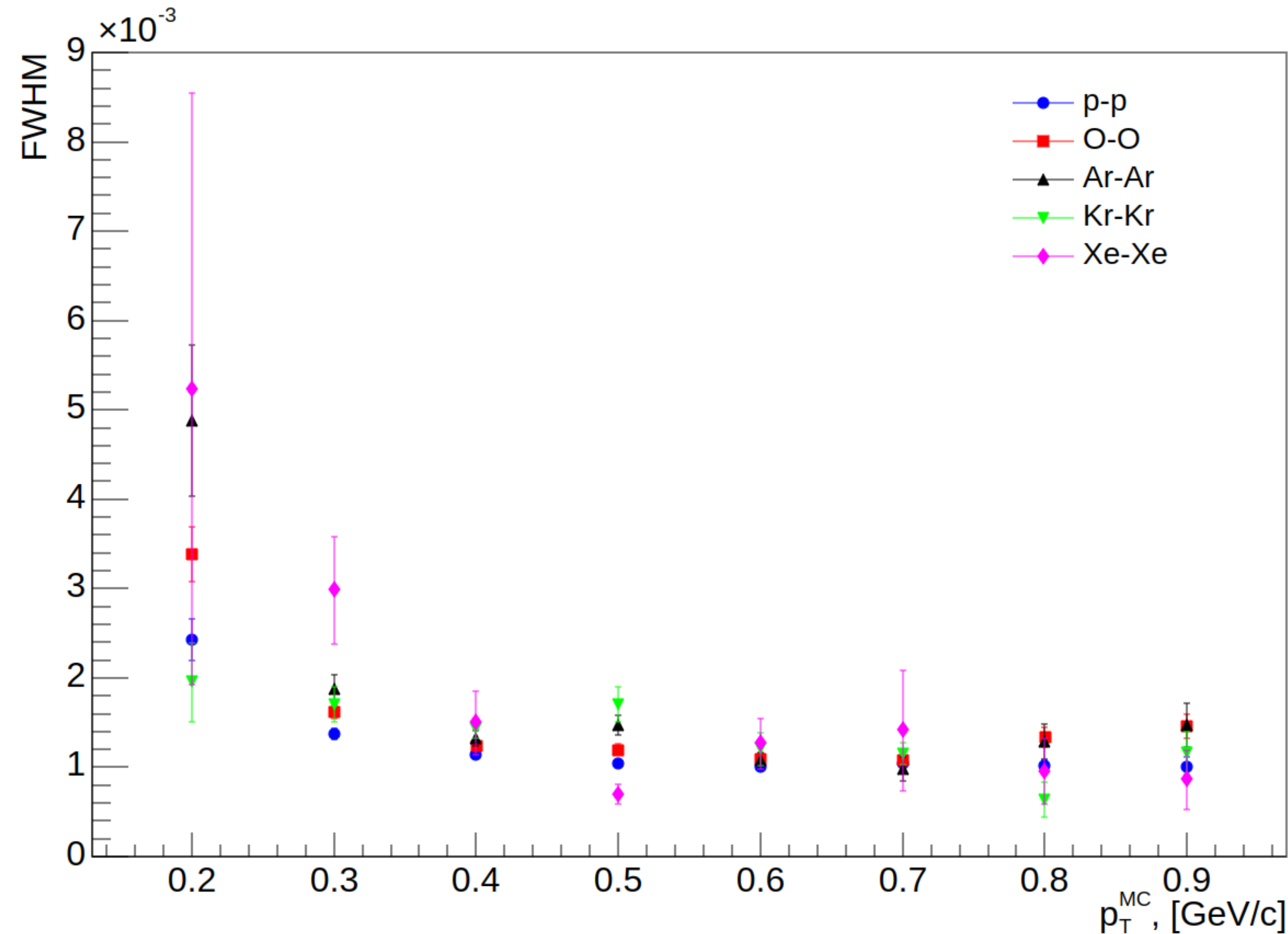
Рис. 10 - Пример  
фитирования в одном из  
регионов по  $pT_{MC}$



- Особый интерес для реконструкции событий в Straw Tracker представляет область  $-2 < \eta < 2$
- Относительное импульсное разрешение предлагается оценивать по распределениям  $(pT_{reco} - pT_{MC})/pT_{MC}$
- Эти распределения аппроксимировались функцией **Lorentz + Lorentz**, а **FWHM** полученных аппроксимаций использовалась как мера импульсного разрешения

# Сравнительное импульсное разрешение Straw Tracker

Рис. 11 - Зависимость  
относительного  
импульсного разрешения  
от  $pT_{MC}$



- Особый интерес для реконструкции событий в Straw Tracker представляет область  $-2 < \eta < 2$
- Относительное импульсное разрешение предлагается оценивать по распределениям  $(pT_{reco} - pT_{MC})/pT_{MC}$
- Эти распределения аппроксимировались функцией **Lorentz + Lorentz**, а **FWHM** полученных аппроксимаций использовалась как мера импульсного разрешения

# Дальнейшие планы

## Дальнейшие планы:

1. Анализ результатов теста на пучке прототипа Straw Tracker - проверка алгоритмов реконструкции на данных с теста на пучке прототипа Straw Tracker
2. На основе результатов моделирования сделать финальные ограничения с точки зрения электроники и физики на возможность ионной программы
3. На основе результатов анализа результатов теста на пучке прототипа ST сделать вывод о применимости алгоритмов реконструкции в ион-ионных столкновениях
4. Сделать выводы о возможности проведения измерений поляризации гиперонов

# Педагогическая практика

1. Были проведены семинары по предмету «Математическая статистика»
2. Было проведено ассистирование в руководстве НИРС бакалавра
3. Было принято участие в защитах НИРС бакалавров
4. Было принято участие в защитах НИРС магистров
5. Были проведены семинары по предмету «Введение в Linux и языки программирования»

# Заключение

- Получены общие карты загрузок Straw Tracker, зависимости частоты срабатываний straw от радиальных координат, эффективности реконструкций и импульсного разрешения в  $p$ - $p$  и ион-ионных столкновениях
- Пройдена педагогическая практика
- Начата работа по анализу результатов тестирования на пучке прототипа Straw Tracker
- Выпущена публикация «**Simulation of the SPD Straw Tracker Performance in  $p$ - $p$  and Ion-Ion Collisions at NICA**» и принято участие в других рукописях
- Выступления на различных конференциях

**Спасибо за внимание!**

# BACK-UP SLIDES

# Положения на защиту

## Положения на защиту:

- «Предложен подход к определению ограничений на сталкивающиеся системы для первой фазы эксперимента SPD, основанный на моделировании загрузок детектора Straw Tracker, оценке эффективности реконструкции треков и импульсного разрешения, необходимый для проведения измерений поляризации гиперонов»
- «Предложены ограничения на параметры алгоритмов реконструкции треков, необходимые для корректной работы детектора Straw Tracker для первой фазы эксперимента SPD на основе данных, полученных с теста на пучке прототипа детектора Straw Tracker»

# Новизна и практическая значимость работы

## Новизна:

Предложен подход к оценке применимости различных ионных систем в первой фазе эксперимента SPD, основанный на совместном анализе загрузки Straw Tracker, эффективности реконструкции треков и импульсного разрешения. В работе ионные системы рассматриваются не только с точки зрения физического интереса, но и с учётом детекторных ограничений, связанных с высокими загрузками и устойчивостью реконструкции треков

## Практическая значимость:

Полученные результаты могут быть использованы при формировании ионной программы первой фазы SPD и выборе сталкивающихся систем, для которых Straw Tracker сохраняет стабильную работу. Проведённые оценки позволяют определить условия, при которых качество реконструкции остаётся достаточным для последующего анализа поляризации гиперонов, а также могут быть использованы при настройке алгоритмов реконструкции и рабочих параметров детектора

# Апробация результатов научной деятельности

## Публикации:

1. Durov, A.I., Soldatov, E.Y. & Lazareva, A.V. **Simulation of the SPD Straw Tracker Performance in  $p$ - $p$  and Ion-Ion Collisions at NICA.** *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **90**, 970–977 (2026). <https://doi.org/10.1134/S1062873826700681>
2. Tishevsky, A.V., Volkov, I.S., Dubinin, F.A. *et al.* **The Method for Estimating the Performance of the Optical and Electronic Path of the BBC Subsystem in the SPD Detector.** *Phys. Part. Nuclei* **57**, 234–237 (2026). <https://doi.org/10.1134/S1063779625701199>
3. Dubinin, F.A., Durov, A.I., Isupov, A.Y. *et al.* **Study of Wave Length Shifters for SPD BBC Scintillation Tiles Readout.** *Phys. Atom. Nuclei* **88**, 312–316 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1063778825700383>

# Апробация результатов научной деятельности

## Участие в конференциях:

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»
4. **X SPD Collaboration Meeting (20.10.2025 - 23.10.2025)**, «Updates on studies of simulation of the SPD Straw Tracker performance in p-p and ion-ion collisions»
5. **XI SPD Collaboration Meeting (18.05.2026 - 22.05.2026)**, «Simulation of the Straw Tracker Performance in pp and ion-ion collisions / UrQMD integration»

# Апробация результатов научной деятельности

- Планируемые публикации:

1. **Research and development on SPD scintillation local polarimetry detector BBC** (this autumn)
2. **Simulation study of the SPD Straw Tracker performance limits for ion–ion collisions at NICA** (this autumn)

- Планируемые публикации выступления на конференциях:

1. **30th International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2026) (17.10.2026 - 21.10.2026)**, «Simulation study of the SPD Straw Tracker performance limits for ion–ion collisions at NICA»
2. The 8th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (ICPPA-2026) (27.10.2026 - 30.10.2026)
3. **XII SPD Collaboration Meeting**

# Загрузки ST и straw в Ar-Ar столкновениях

Рис. 12 - Цветовая карта ST (barrel и end-caps части) в Ar-Ar столкновениях

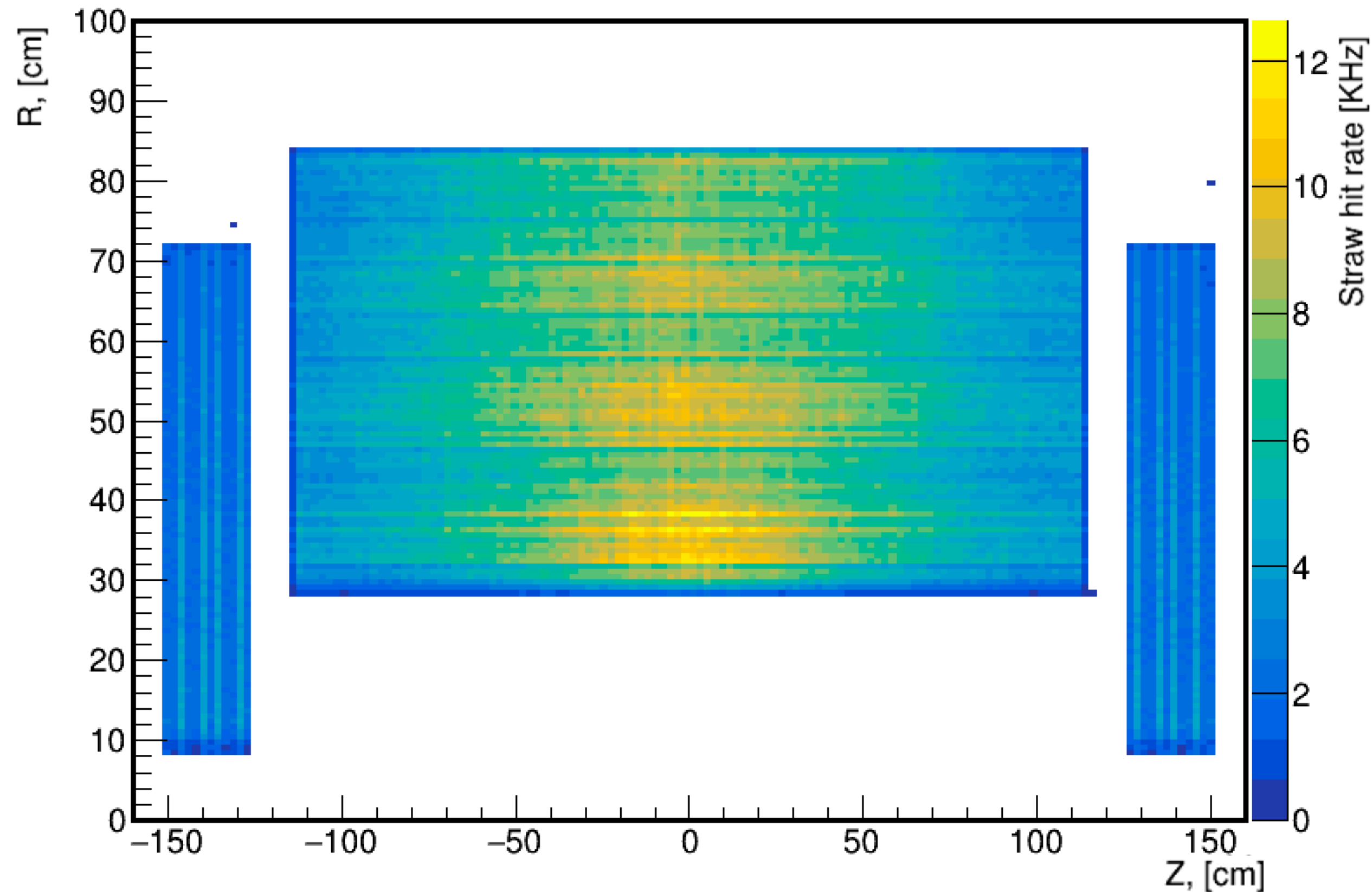
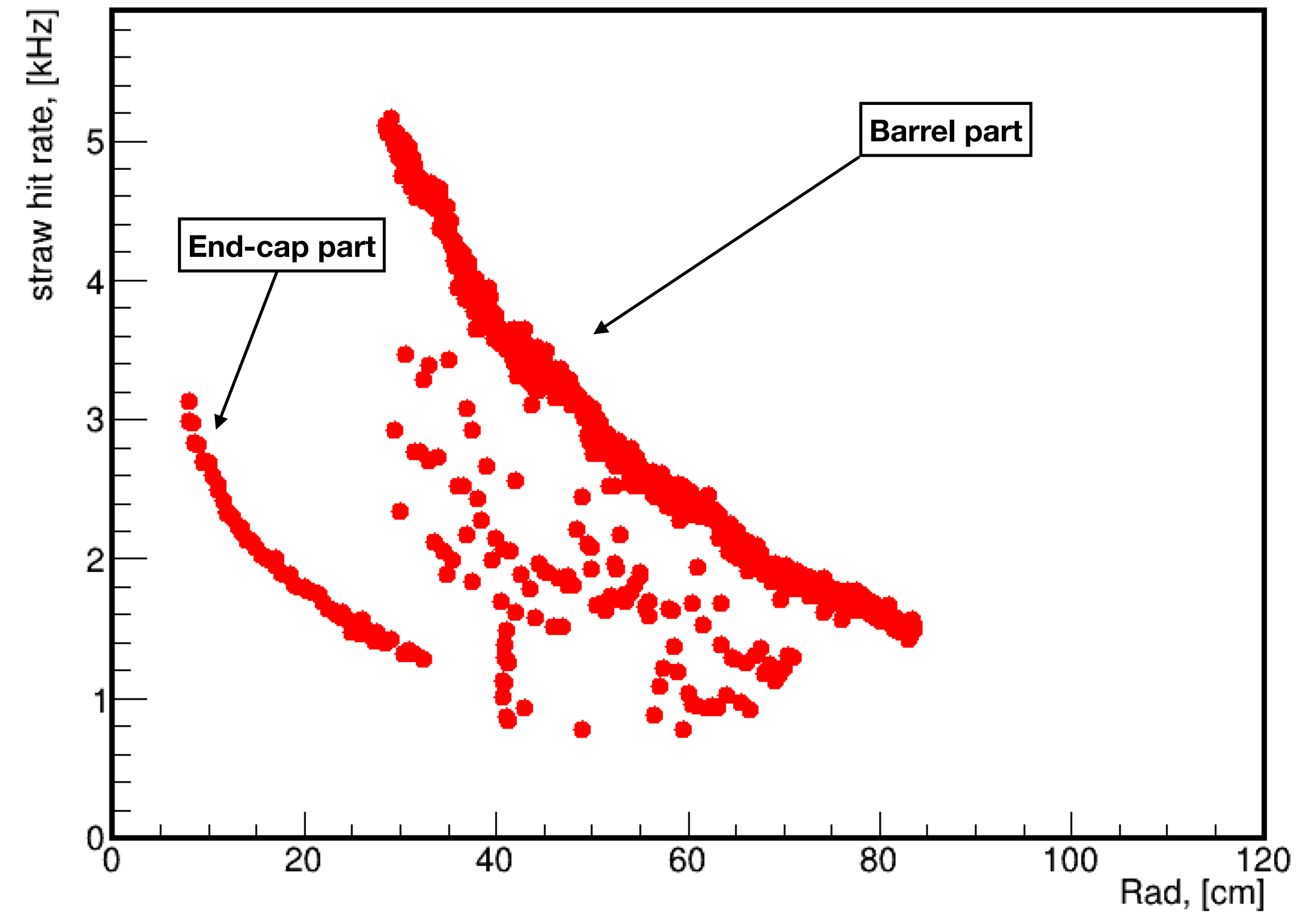


Рис. 13 - Зависимость частоты срабатываний straw с одинаковым радиальным расстоянием от радиального расстояния в Ar-Ar столкновениях



Параметры симуляций:

• Генератор: UrQMD 4.0

•  $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

• 40 000 O-O столкновений ( $Ar_{18}^{40}$ )

• Minimum bias

• Частота взаимодействий (для цветной Z-оси) = 7 kHz

Частота взаимодействий взята из MPD CDR:  
[https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD\\_CDR\\_en.pdf](https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD_CDR_en.pdf)

# Загрузки ST и straw в Kr-Kr столкновениях

Рис. 14 - Цветовая карта ST (barrel и end-caps части) в Kr-Kr столкновениях

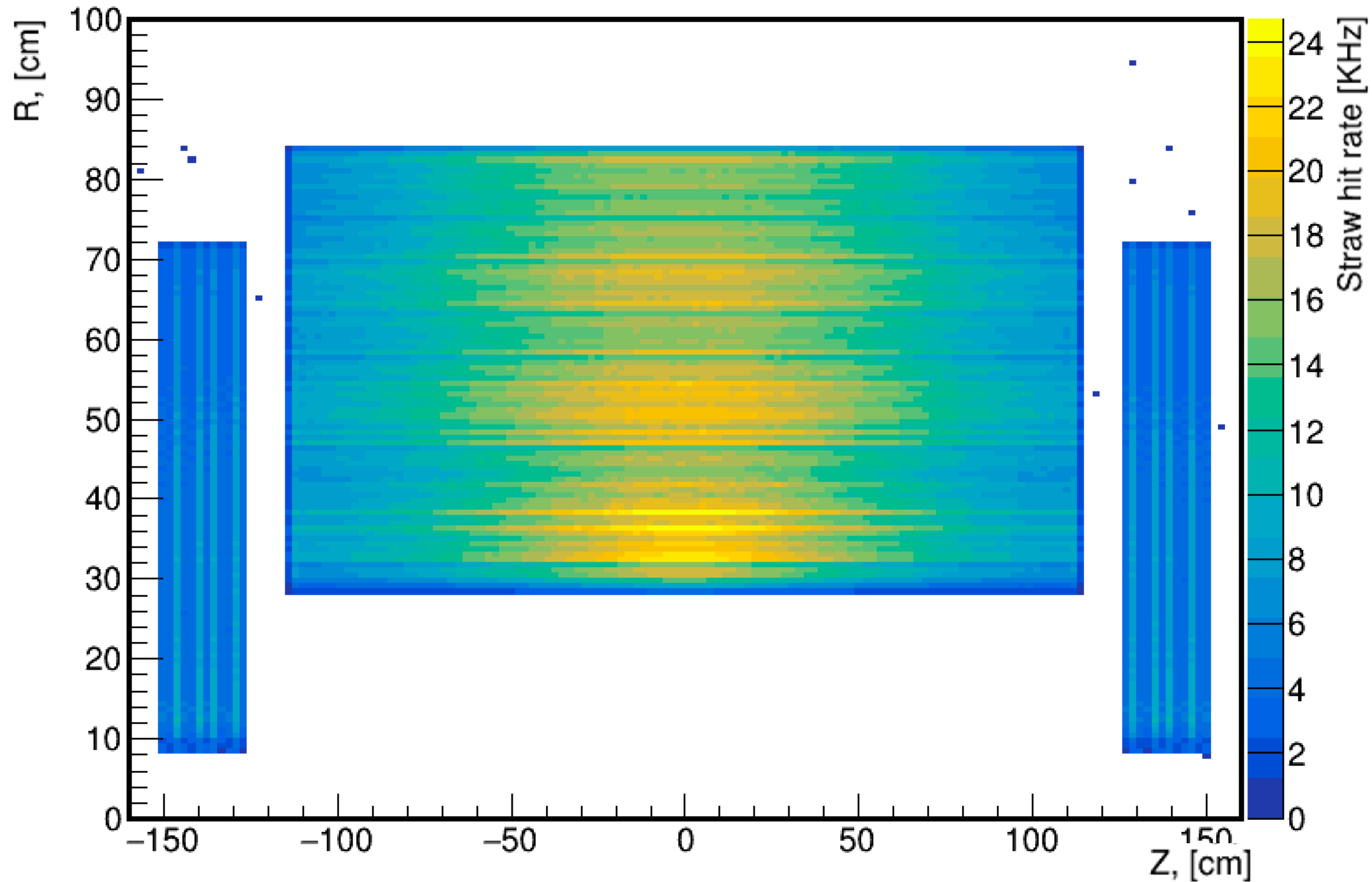
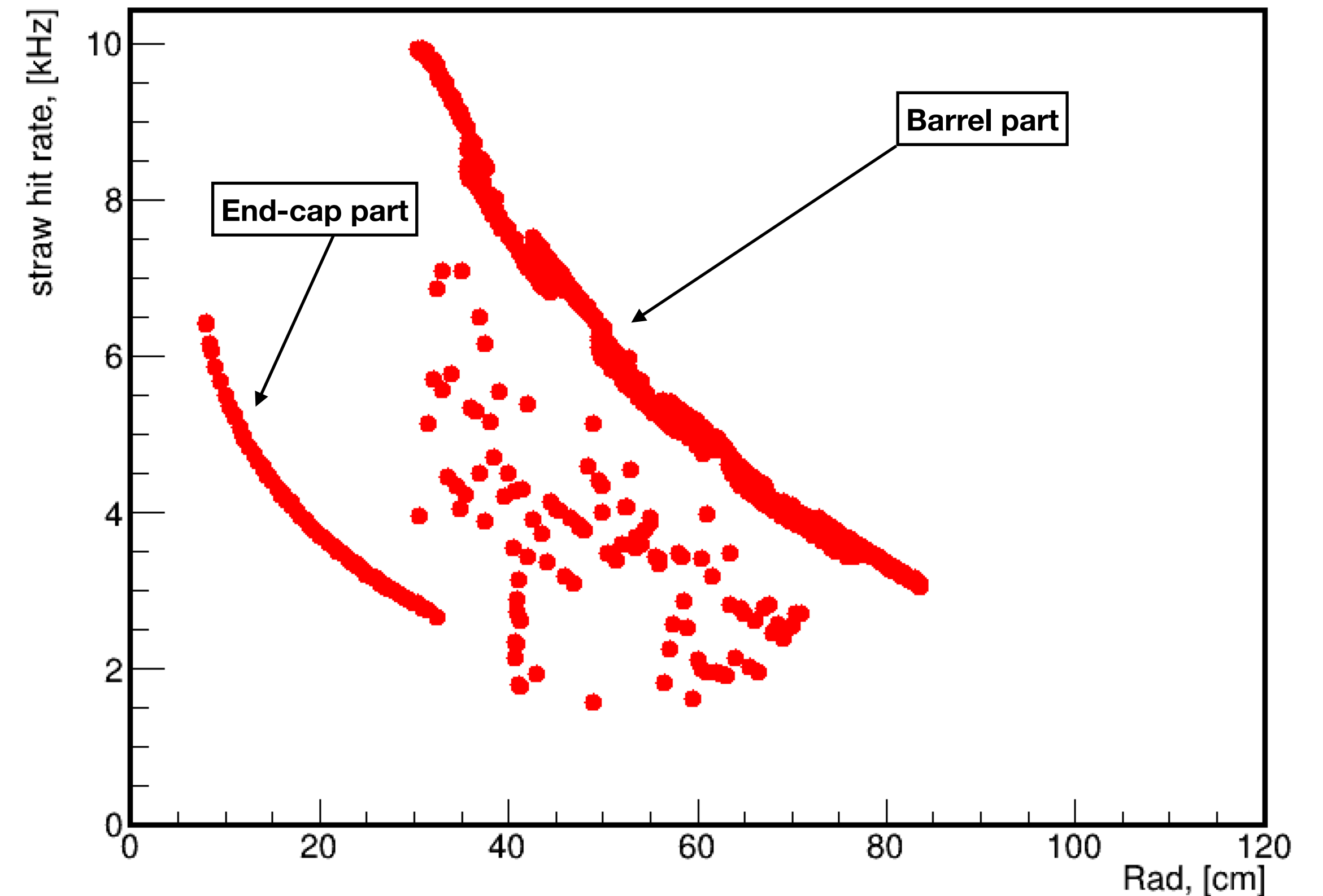


Рис. 15 - Зависимость частоты срабатываний straw с одинаковым радиальным расстоянием от радиального расстояния в Kr-Kr столкновениях



Параметры симуляций:

- Генератор: UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

- 10 000 O-O столкновений ( $Kr_{36}^{84}$ )
- Minimum bias
- Частота взаимодействий (для цветной Z-оси) = 7 kHz

Частота взаимодействий взята из MPD CDR:  
[https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD\\_CDR\\_en.pdf](https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD_CDR_en.pdf)

# Загрузки ST и straw в Xe-Xe столкновениях

Рис. 16 - Цветовая карта ST (barrel и end-caps части) в Xe-Xe столкновениях

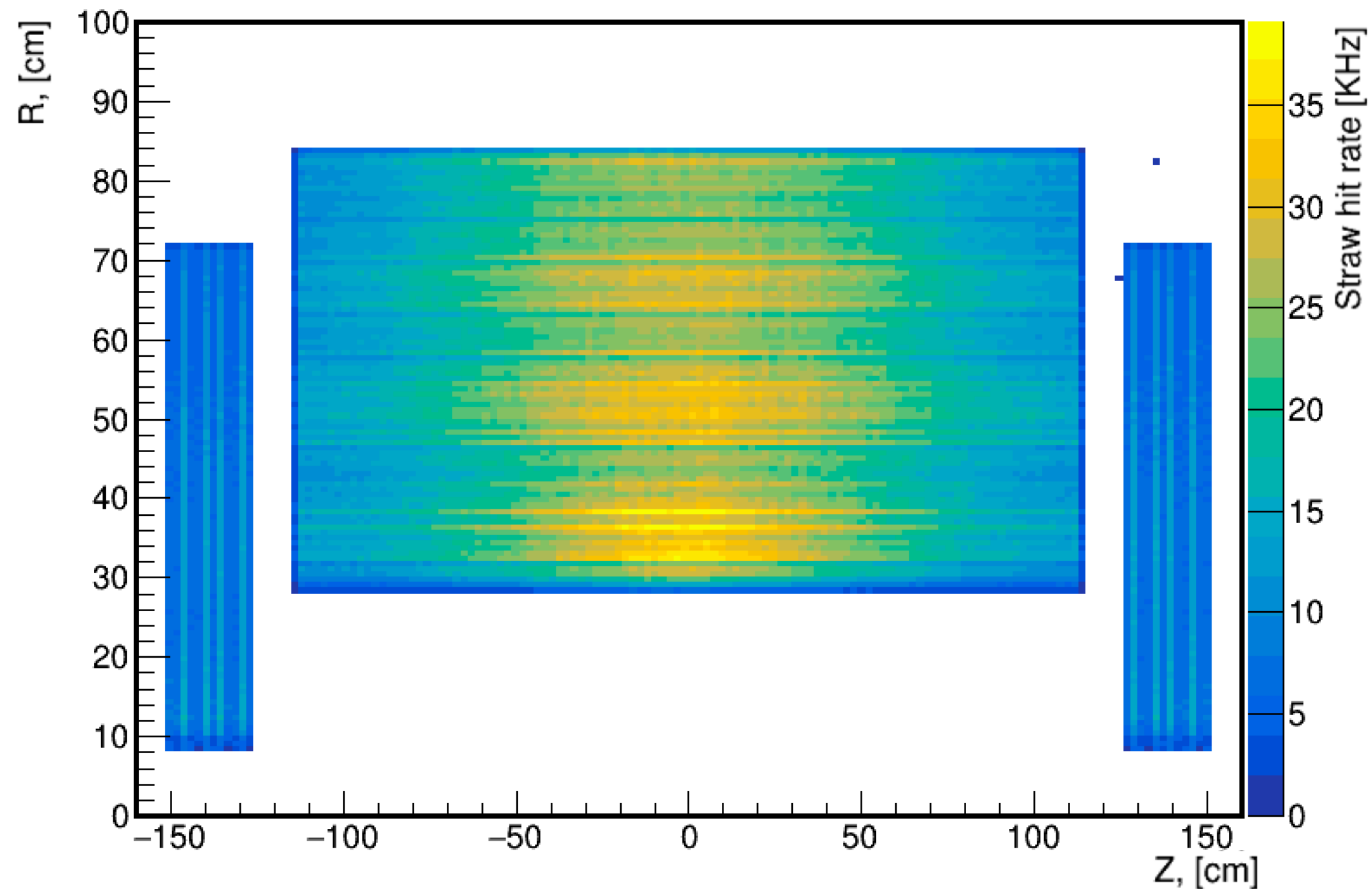
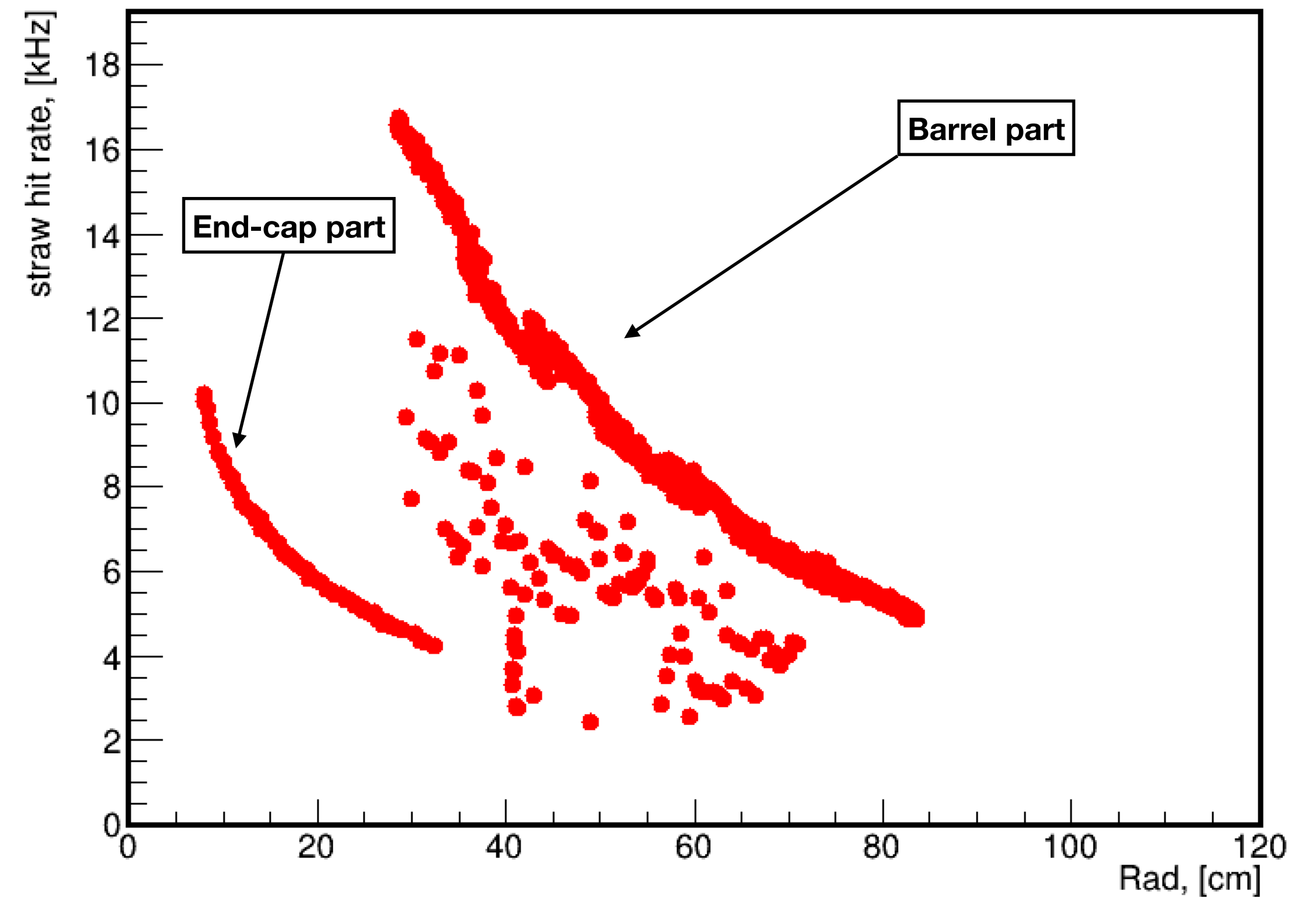


Рис. 17 - Зависимость частоты срабатываний straw с одинаковым радиальным расстоянием от радиального расстояния в Xe-Xe столкновениях



Параметры симуляций:

• Генератор: UrQMD 4.0

•  $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

• 1 000 O-O столкновений ( $Xe_{54}^{131}$ )

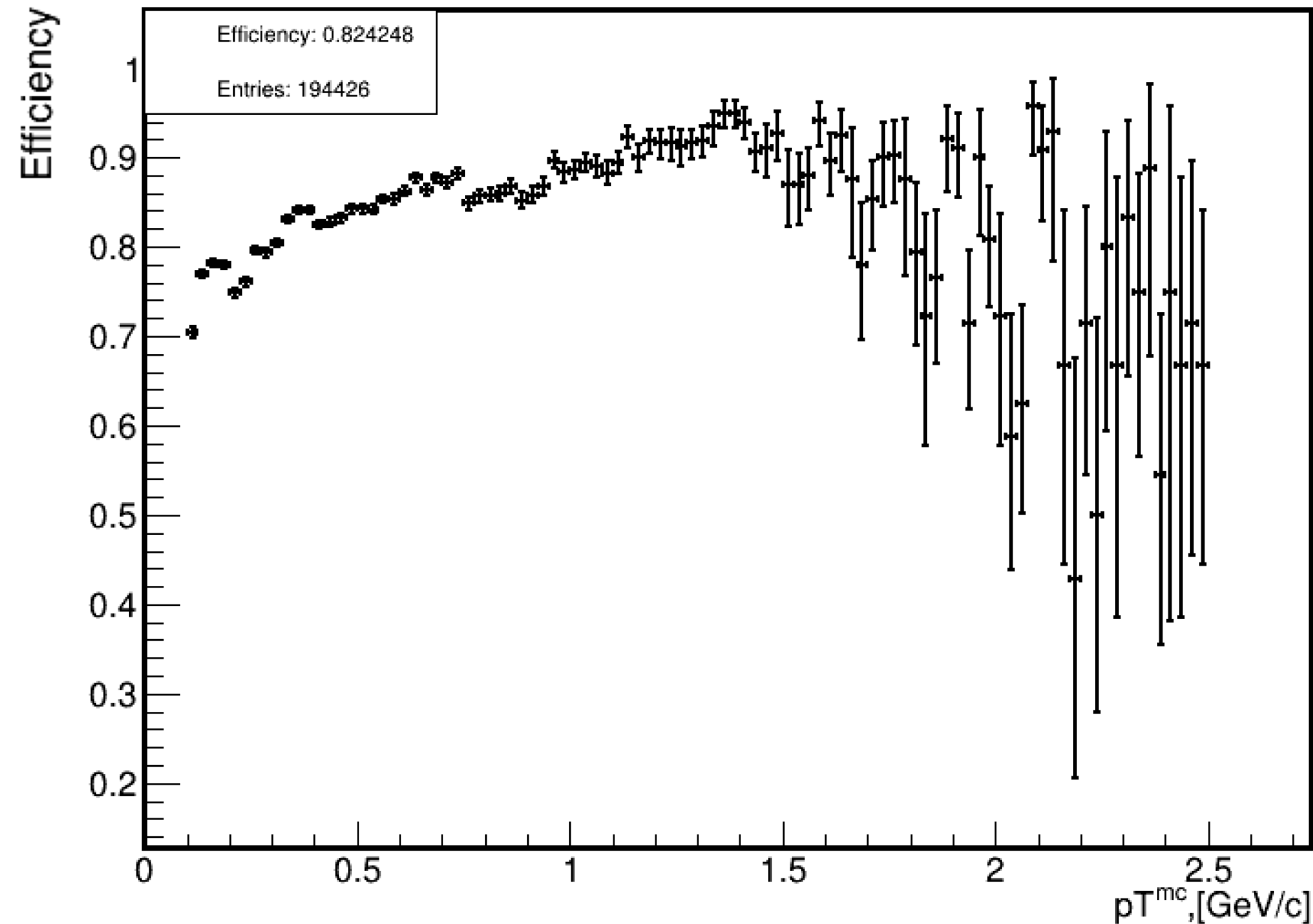
• Minimum bias

• Частота взаимодействий (для цветной Z-оси) = 7 kHz

Частота взаимодействий взята из MPD CDR:  
[https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD\\_CDR\\_en.pdf](https://mpd.jinr.ru/wp-content/uploads/2023/11/MPD_CDR_en.pdf)

# Эффективность реконструкции в p-p столкновениях

Рис. 18 - Эффективность vs  $pT^{MC}$



Эффективность (p-p) ~ 82.4%

Параметры симуляций: • 48 000 p-p столкновений •  $pT \geq 0.1 \text{ GeV}$

• Генератор: Pythia8 • Minimum bias

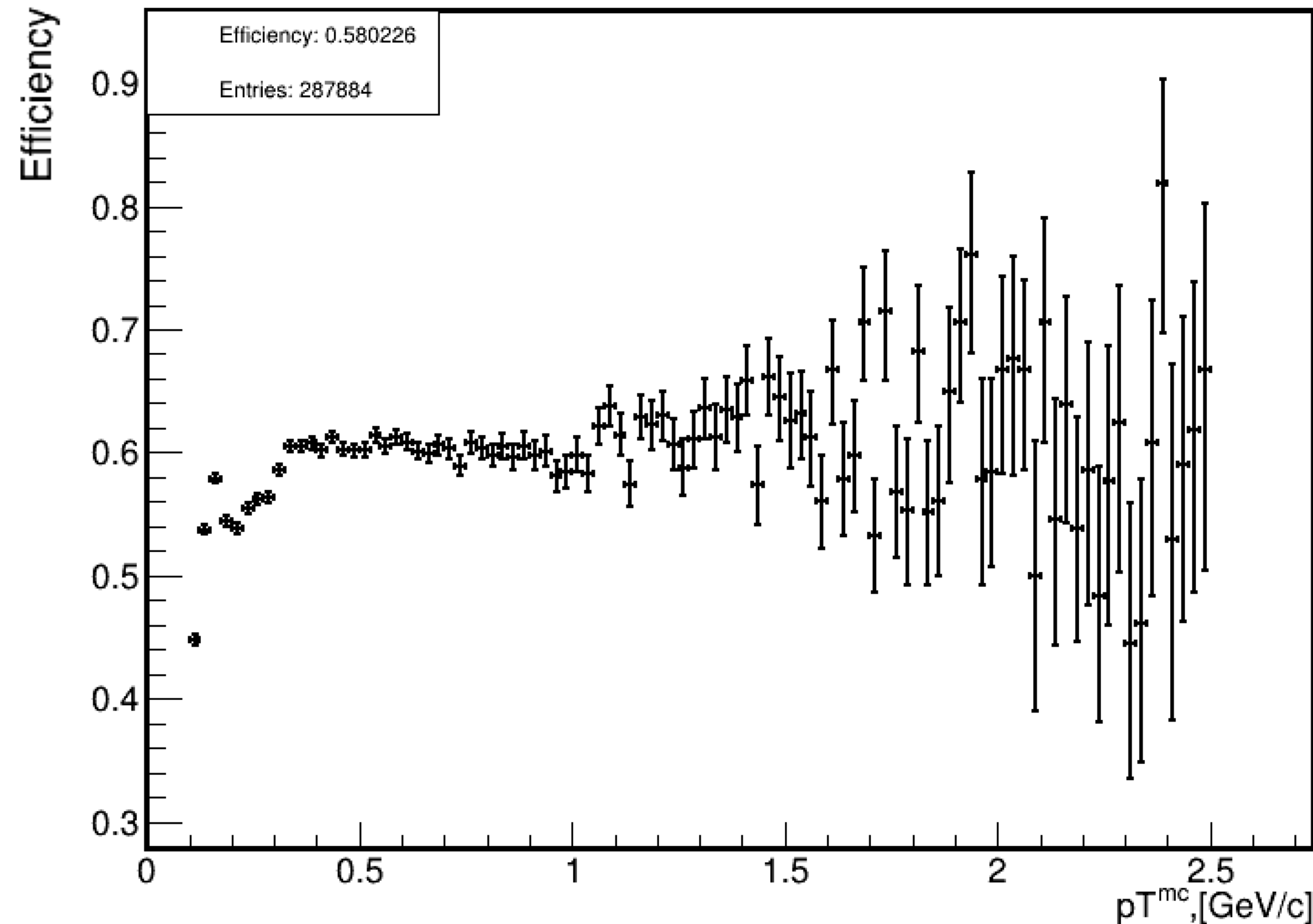
•  $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$  •  $-2 < \eta < 2$

• **MC треки and reso треки имеют более 51% общих ХИТОВ**

Данный критерий  
обеспечивает исключение  
«ЛОЖНЫХ»  
реконструированных треков

# Эффективность реконструкции в О-О столкновениях

Рис. 19 - Эффективность vs  $pT^{MC}$



Эффективность (О-О) ~ 58.02%

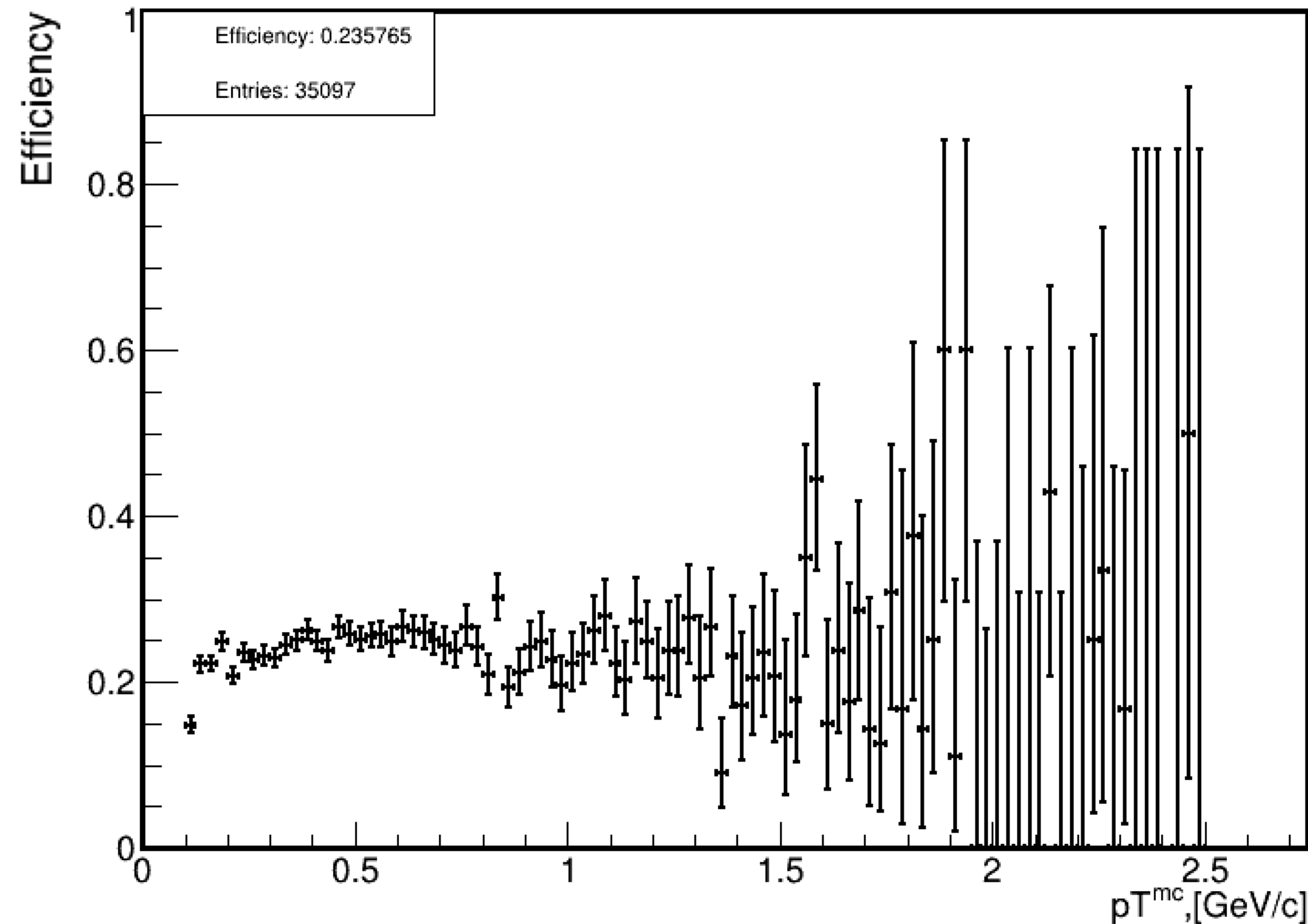
## Параметры симуляций:

- Генератор: UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$
- 75 000 О-О столкновений ( $O_8^{16}$ )
- Minimum bias
- $-2 < \eta < 2$
- $pT \geq 0.1 \text{ GeV}$
- **МС треки and reso треки имеют более 51% общих ХИТОВ**

Данный критерий  
обеспечивает исключение  
«ЛОЖНЫХ»  
реконструированных треков

# Эффективность реконструкции в Ar-Ar столкновениях

Рис. 20 - Эффективность vs  $pT^{MC}$



Efficiency (Ar-Ar) ~ 23.6%

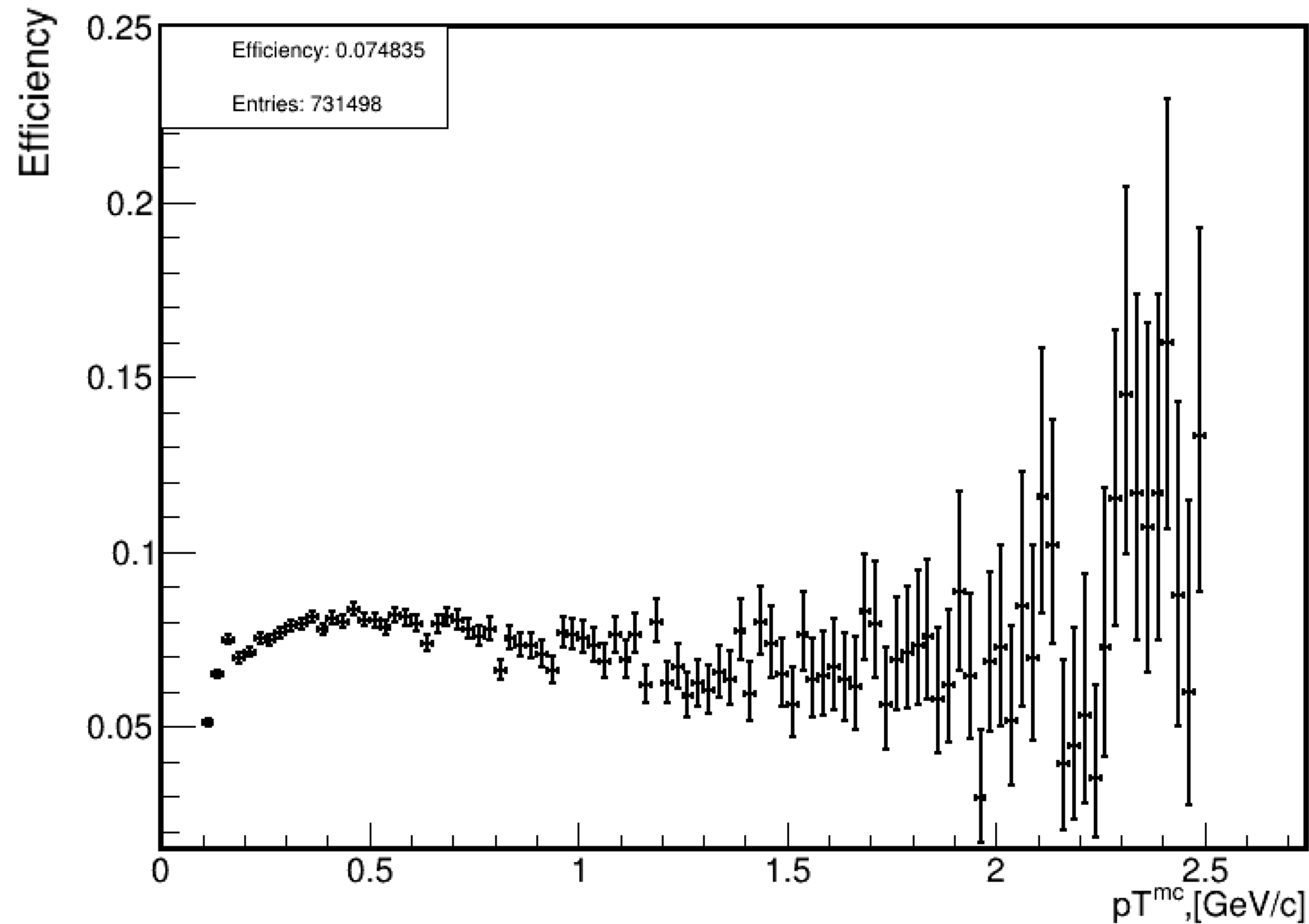
## Параметры симуляций:

- Генератор: UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$
- 40 000 O-O столкновений ( $Ar_{18}^{40}$ )
- Minimum bias
- $-2 < \eta < 2$
- $pT \geq 0.1 \text{ GeV}$
- **MC треки and reso треки имеют более 51% общих ХИТОВ**

Данный критерий  
обеспечивает исключение  
«ЛОЖНЫХ»  
реконструированных треков

# Эффективность реконструкции в Kr-Kr столкновениях

Рис. 21 - Эффективность vs  $pT^{MC}$



Эффективность (Kr-Kr) ~ 7.5%

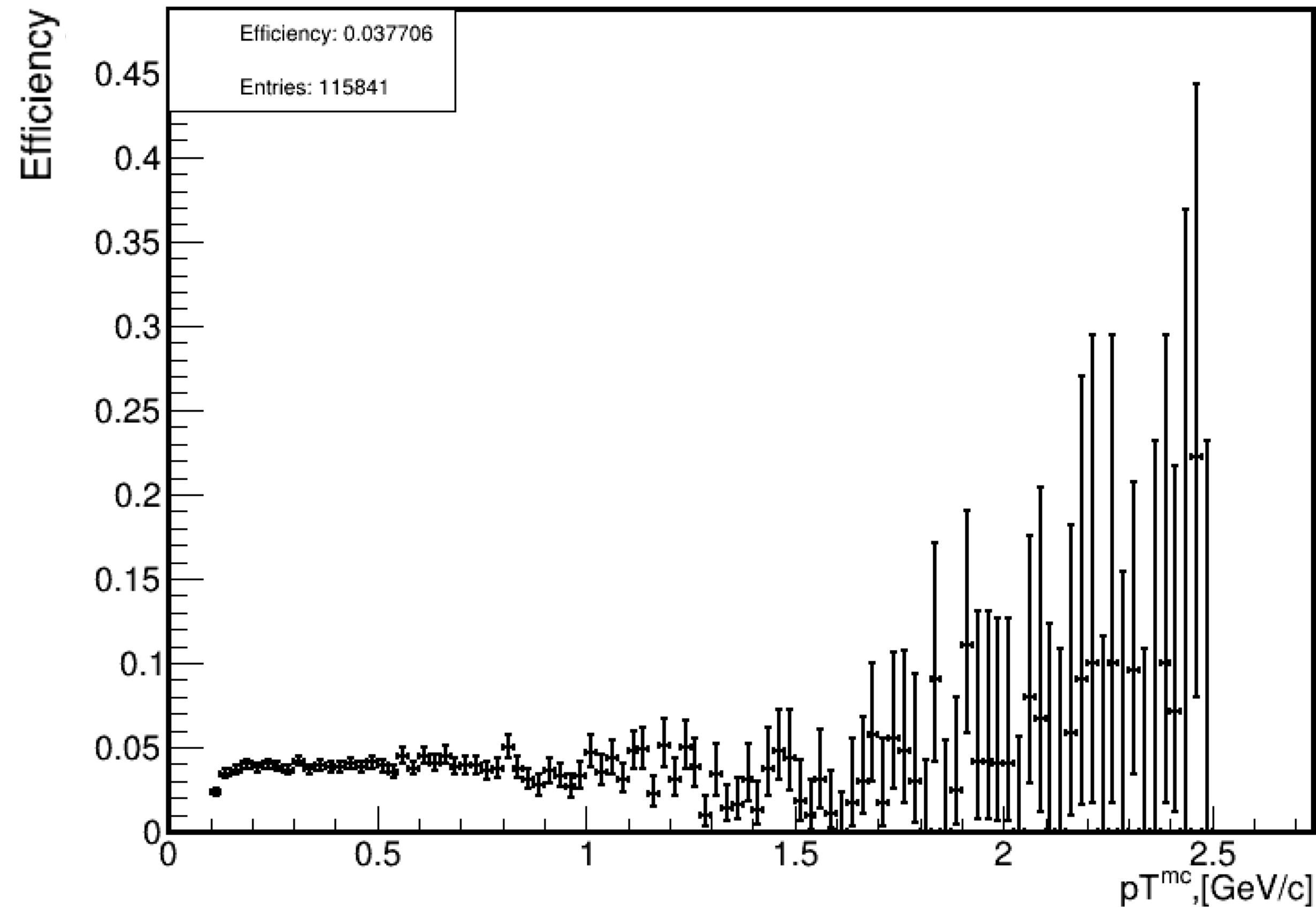
## Параметры симуляций:

- Генератор: UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$
- 10 000 O-O столкновений ( $Kr_{36}^{84}$ )
- Minimum bias
- $-2 < \eta < 2$
- $pT \geq 0.1 \text{ GeV}$
- **MC треки and reso треки имеют более 51% общих ХИТОВ**

Данный критерий  
обеспечивает исключение  
«ЛОЖНЫХ»  
реконструированных треков

# Эффективность реконструкции в Хе-Хе столкновениях

Рис. 22 - Эффективность vs  $pT^{MC}$



Эффективность (Хе-Хе) ~ 3.8%

## Параметры симуляций:

- Генератор: UrQMD 4.0
- $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$
- 1 000 О-О столкновений ( $Xe_{54}^{131}$ )
- Minimum bias
- $-2 < \eta < 2$
- $pT \geq 0.1 \text{ GeV}$
- **МС треки and reso треки имеют более 51% общих ХИТОВ**

Данный критерий  
обеспечивает исключение  
«ЛОЖНЫХ»  
реконструированных треков