



Joint Institute for Nuclear
Research

SCIENCE BRINGING NATIONS
TOGETHER

Диссертационный совет ОИЯИ.02.01.2024.П по физике частиц
при Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина

Плотников Василий Александрович

Рождение π^+ и K^+ -мезонов в аргон-ядерных
взаимодействиях при энергии пучка 3.2 АГэВ в
эксперименте $BM@N$ на Нуклотроне



ДИССЕРТАЦИЯ на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
Специальность: 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Руководитель: д. ф.-м. н. М. Н. Капишин

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

Актуальность темы



Экспериментальное и теоретическое изучение свойств сильно взаимодействующей ядерной материи при высоких плотностях и температурах является одним из наиболее интересных исследовательских направлений ядерной физики высоких энергий. По современным теоретическим моделям процессы при столкновении тяжелых ионов описываются **уравнением состояния** ядерной материи при высоких барионных плотностях. Теоретические предсказания предполагают возникновение условий, при которых произойдет фазовый переход с образованием состояния, называемого **«кварк-глюонной плазмой»**. В качестве процессов, по которым можно отслеживать состояние ядерной материи, предпочтительными, но не единственными, являются процессы рождения частиц со странными кварками, которые не входят в состав первичных нуклонов, а возникают в процессе взаимодействия ядер. Кинематические распределения по таким переменным, как продольная быстрота, поперечный импульс и множественность частиц в конечном состоянии, являются наблюдаемыми для исследования.

В настоящее время эксперименты по столкновению тяжелых ионов проводятся на ускорителях **LHC** и **SPS** в европейском центре ядерных исследований CERN, Женева, **RHIC** в лаборатории BNL, Брукхейвен, и **SIS18** в институте GSI. Строящиеся масштабные установки, такие как Facility for Antiproton and Ion Research (**FAIR**) в Дармштадте, Германия, и Nuclotron-based Ion Collider Facility (**NICA**), предоставят уникальные возможности для создания и изучения ядерной материи с плотностями, которые предсказываются в ядрах нейтронных звезд.

Эксперимент **BM@N** (Baryonic Matter at Nuclotron) на ускорительном комплексе **NICA** это первый эксперимент, уже набравший экспериментальные данные, результатам анализа которых посвящена данная работа.

Целью данной работы является изучение процессов образования положительно заряженных пионов и каонов в столкновениях пучка ионов аргона с твёрдыми фиксированными мишенями (C, Al, Cu, Sn, Pb) при кинетической энергии пучка 3.2 АГэВ, измеренных в эксперименте BM@N.

Решённые задачи:

1. Разработан и применён алгоритм экстраполяции треков частиц из центральной трековой системы во внешние детекторы, позволивший учесть потери энергии и рассеяние частиц в материале детекторов, а также погрешности измерения магнитного поля анализирующего магнита
2. Реализован метод восстановления координатной информации по сигналам в катодно-стриповой камере CSC и выполнено выравнивание внешних детекторов по трекам из центральной трековой системы, что позволило отфильтровать ложные реконструированные треки и обеспечило возможность получать для частицы её импульс, длину и время пролёта
3. Разработан и применён алгоритм идентификации заряженных частиц на основе метода времени пролёта, обеспечивший возможность определения типа заряженных частиц
4. Разработан и применён алгоритм получения эффективности триггерных детекторов, центральной трековой системы и внешних детекторов CSC и ToF-400 на основе экспериментальных данных, что позволило учесть потери информации о частицах из-за неидеальности детекторов и алгоритмов реконструкции

5. В моделировании реализованы алгоритмы реконструкции треков и идентификации заряженных частиц, применяемые для экспериментальных данных, а также методика учёта экспериментальной эффективности детекторов, что позволило получить эффективности реконструкции для π^+ и K^+ -мезонов
6. Получены эффективности реконструкции сигналов π^+ и K^+ -мезонов и оценка фона, использованные для получения дифференциальных сечений и множественностей π^+ и K^+ -мезонов
7. С учетом эффективности реконструкции восстановлены спектры (выходы) π^+ и K^+ -мезонов по продольной быстрой и поперечному импульсу, параметры обратных наклонов поперечных спектров, а также множественности π^+ и K^+ -мезонов в событии, выполнена оценка систематических неопределённостей результатов от различных источников
8. Проведено сравнение полученных физических спектров с результатами других экспериментов и предсказаниями микроскопических транспортных моделей

1. Область исследований
 - ✓ Физические задачи эксперимента BM@N
 - ✓ Модели ядро-ядерных взаимодействий
2. Установка BM@N
3. Идентификация типов заряженных частиц
4. Эффективность детекторов
5. Измерение сечений и множественности π^+ и K^+ и систематические погрешности
 - ✓ Этапы анализа данных
 - ✓ Систематические неопределённости
6. Физические результаты по образованию π^+ и K^+
7. Заключение, положения и т.д.

1. Область исследований



Ch. Fuchs and H.H. Wolter, EPJA 30 (2006) 5

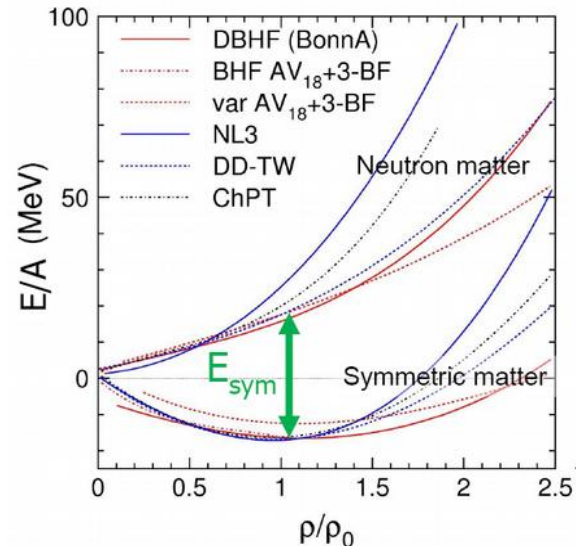
Уравнение состояния (УС): связь плотности, давления, температуры, энергии и изоспиновой асимметрией

$$E_A(\rho, \delta) = E_A(\rho, 0) + E_{\text{sym}}(\rho) \cdot \delta^2$$

$$\text{with } \delta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$$

Кривизна определяется несжимаемостью ядерной материи: $K = 9\rho^2 d^2(E/A)/d\rho^2$

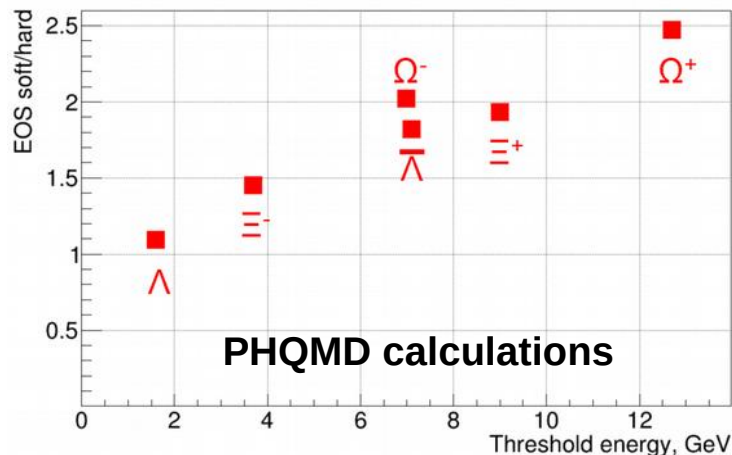
- ▶ Изучение УС симметричной материи при $\rho = 3-5\rho_0$
 - подпороговое образование странных мезонов и гиперонов
 - определение продуктов распада по результатам идентификации
 - определение типа УС: мягкое ($K \sim 200$ MeV) или жёсткое ($K > 300$ MeV)
- ▶ Поиск сигналов деконфайнмента



P. Senger 2022 Phys. Scr. 97 064003

Hyperon yield in 4A GeV Au+Au:

soft EOS ($K=240$ MeV) / hard EOS ($K=350$) MeV



Физические задачи BM@N



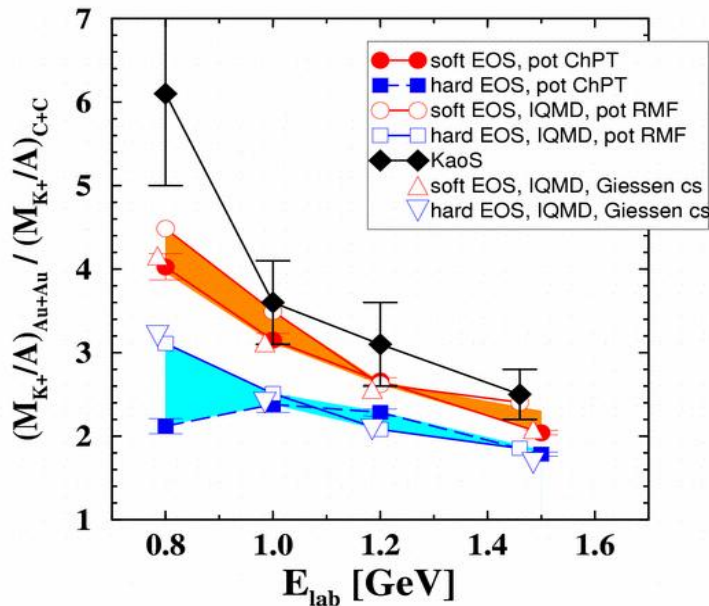
Уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях

Образование частиц при (под)пороговых энергиях через множественные последовательные столкновения

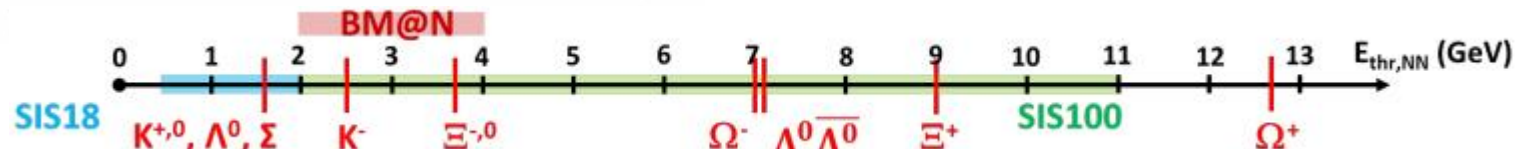
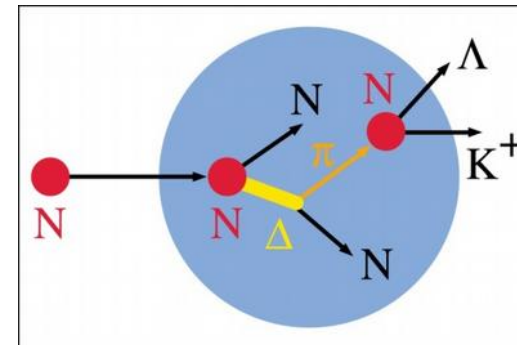
Пример: подпороговое рождение K^+ в GSI

Идея: выходы K^+ \sim плотность \sim сжимаемость

Ch. Fuchs and H.H. Wolter, EPJA 30 (2006) 5



$pp \rightarrow K^+ \Lambda p$
($E_{\text{thres}} = 1.6 \text{ ГэВ}$)



DCM-SMM – Дубненская каскадная модель + модель статистической мультифрагментации. Является развитием модели **DCM-QGSM**.

Основные компоненты

- ✓ **DCM** – Монте-Карло решение релятивистского **кинетического уравнения Больцмана-Уэлинга-Уленбека (БУУ)**
- ✓ **Ядро-ядерное столкновение** – некогерентная суперпозиция бинарных взаимодействий
- ✓ **Приближение чёрного диска** – критерий сечения бинарного взаимодействия
- ✓ **Ядро** – Ферми-газ нуклонов в потенциале Вуда-Саксона. Движение по прямой между столкновениями
- ✓ **Принцип Паули (запрета)**
 - 4 стадии модели **DCM-QGSM**
 - ✓ **Быстрые бинарные столкновения** с рождением частиц (**внутриядерный каскад**)
 - ✓ **Коалесценция** вторичных нуклонов
 - ✓ **Предравновесное испускание** сильно возбуждённых ядер-фрагментов
 - ✓ **Последовательное испарение и/или деление**

Параметры, влияющие на выход частиц

- ✓ Модификация адронов в плотной ядерной материи (сейчас не реализована)
- ✓ Выход и время жизни резонансов (Δ , ρ , ω и т.д.). Резонансов рождается больше, чем π^+ и K^+

DCM

- ✓ $E_{lab} < 4.5 \text{ АгэВ}$ В: p, n, N^* , Δ , Λ , Σ , Ξ , Ω
- ✓ адроны \rightarrow адроны X \rightarrow M: ρ , ω , η , ϕ
- ✓ $N + N \rightarrow BV$ $M + B \rightarrow BX$
- ✓ $N + N \rightarrow BBX$ $M + M \rightarrow X$

SMM для более точного описания образования фрагментов промежуточной массы

M. Baznat et al. «MonteCarlo Generator of Heavy Ion Collisions DCM-SMM». In: Phys. Part. Nucl. Lett. 17 (2020), pp. 303–324.

UrQMD – Модель ультрарелятивистской молекулярной динамики (версия 3.3)

По аналогии с DCM-SMM решается **кинетическое уравнение БУУ**. Однако частицы представляются в виде волновых пакетов, что позволяет эффективно учитывать факторы квантовых статистик (запрет Паули и усиление Бозе). Из-за указанной способности учёта квантовых особенностей модели содержат в названии **QMD**.

Основные компоненты

- ✓ Внутрядерный каскад
- ✓ Используются сечения свободных адрон-адронных столкновений
- ✓ Учитывает все барионные резонансы вплоть до инвариантной массы порядка 2.25 ГэВ (их около 50 штук) и все мезонные резонансы вплоть до 1.95 ГэВ (их примерно столько же)
- ✓ Не учитывается внутрядерное изменение свойств адронов
- ✓ Большие неопределённости сечений взаимодействий, включающих резонансы
- ✓ Вводят дополнительные (**нефизические**) резонансы, чтобы описать **сжатую фазу ядерной материи**
- ✓ Различные потенциалы взаимодействия между частицами (Юкавы, Кулона, Паули и т.п.)
- ✓ **UrQMD** разваливает ядерные фрагменты после взаимодействия до протонов и нейтронов

S. A. Bass et al. «Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions». In: *Prog. Part. Nucl. Phys.* 41 (1998), pp. 255-369.

PHSD – Модель партонной адронной струнной динамики (версия 4)

Модель **PHSD** представляет собой ковариантный динамический подход (**киральную динамику**) к описанию сильно взаимодействующих систем, сформулированный на основе **уравнений Каданова-Байма**, или на основе транспортных уравнений вне массовой поверхности в представлении фазового пространства.

Основные компоненты

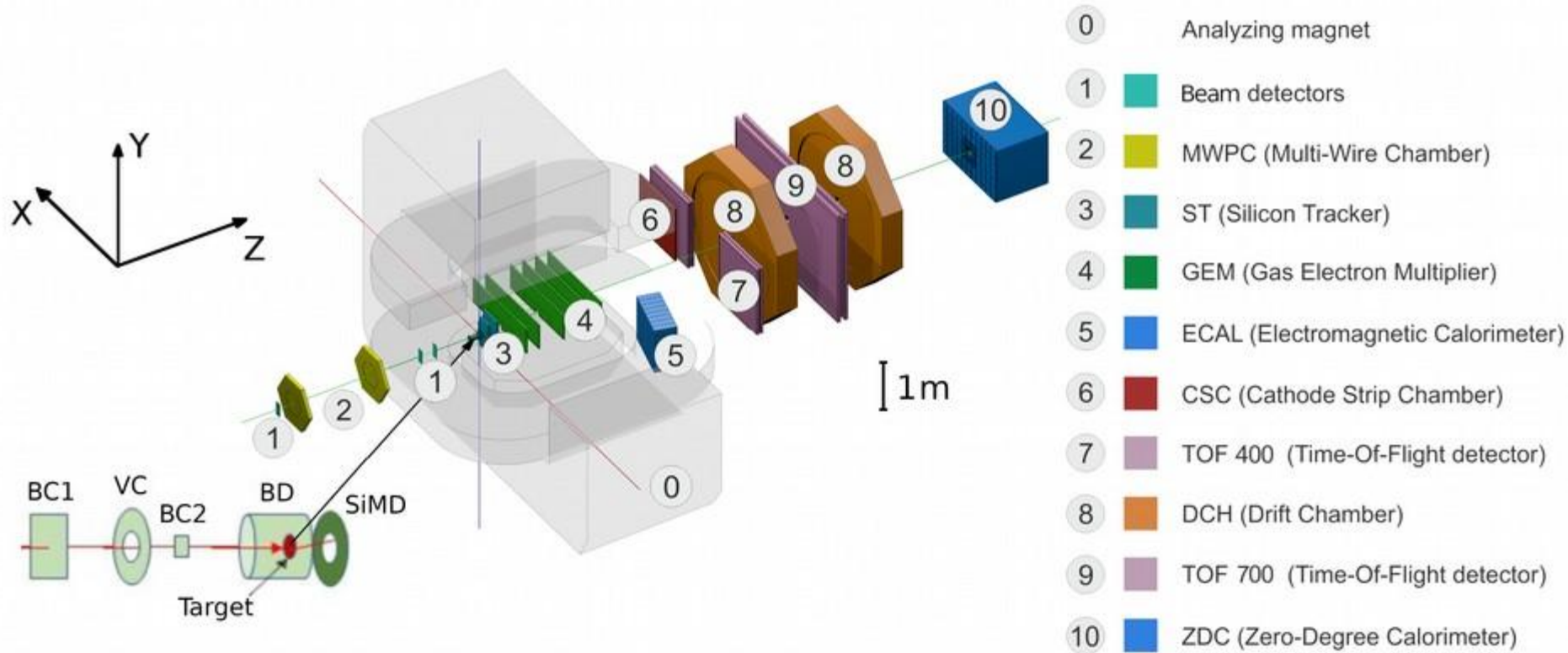
- ✓ Внутрядерный каскад
- ✓ **Учитывает внутрядерное изменение свойств адронов** (резонансы, в частности векторные мезоны, имеют ширину)
- ✓ Действительная часть собственных энергий **квантов поля** связана с потенциалами среднего поля
- ✓ Мнимая часть их собственных энергий даёт информацию о времени жизни времяподобных частиц
- ✓ Есть дополнительная (**партонная**) **фаза** с восстановлением киральной симметрии при энергиях MPD и выше
- ✓ Использует собственные аппроксимации для сечений реакций, которые либо измерены с большими погрешностями, либо вовсе неизвестны
- ✓ В модели **PHSD** не образуются стабильные фрагменты

W. Cassing, E. L. Bratkovskaya «Parton transport and hadronization from the dynamical quasiparticle point of view». In: Phys. Rev. C 78 (2008), 034919.

2. Установка VM@N



Установка VM@N в аргонном сеансе



Детекторы, использованные в анализе: пучковые детекторы (1), детекторы множественности, ST (3), GEM (4), CSC (6), TOF 400 (7).

Центральная трековая система

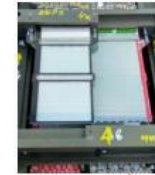


ST

- ✓ Двухкоординатные
- ✓ Стриповые
- ✓ Полупроводниковые

Передние кремниевые стриповые детекторы (ST)

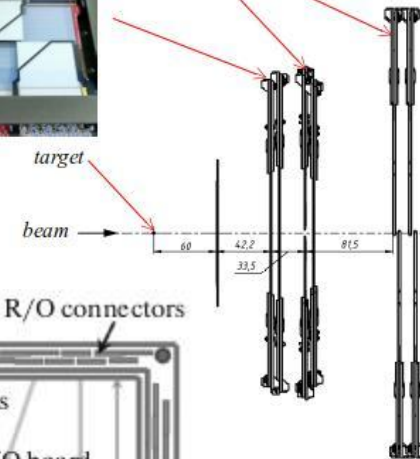
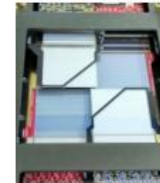
Si-Vertex plane-2



Si-Forward plane

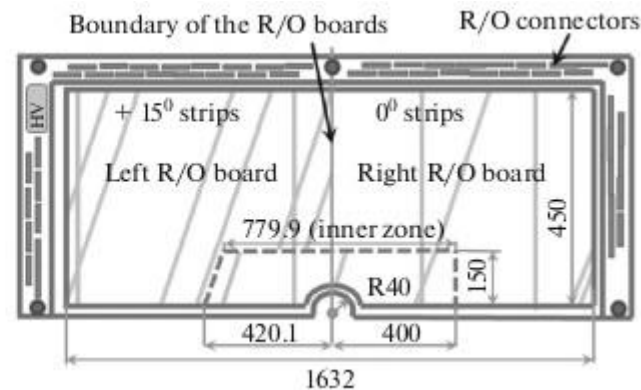
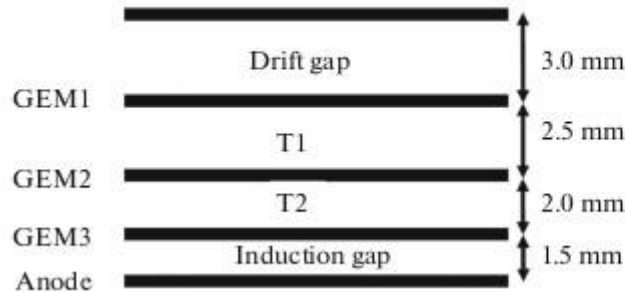


Si-Vertex plane-1

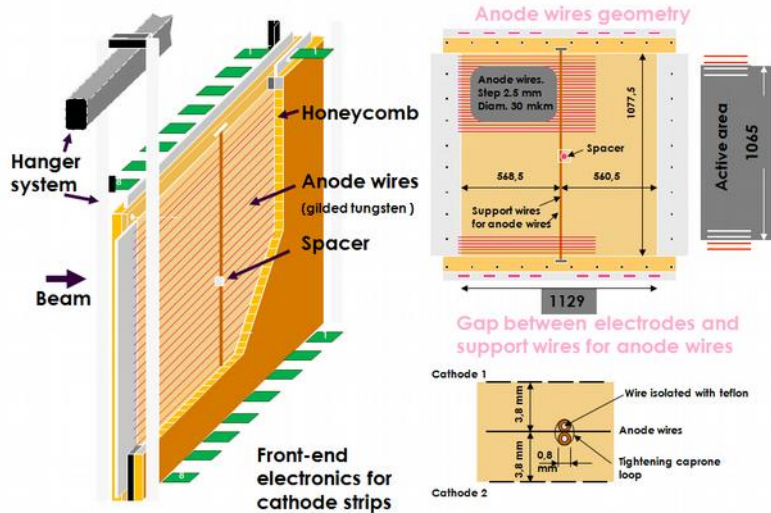


GEM

- ✓ Газовые электронные умножители
- ✓ Один дрейфовый, два ускоряющих и один индукционный промежуток
- ✓ При реконструкции хитов в GEM учитывается лоренцовское смещение



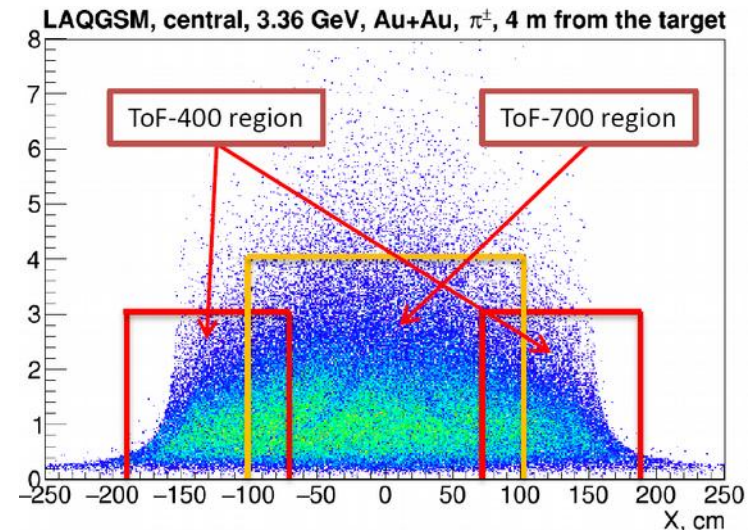
Катодно-стриповая камера (CSC)



- ✓ Горизонтальные анодные проволоки посередине
- ✓ Две стриповые катодные плоскости X и X' по краям
- ✓ “Горячая” и “холодная” зоны

Детектор времени пролёта (ToF-400)

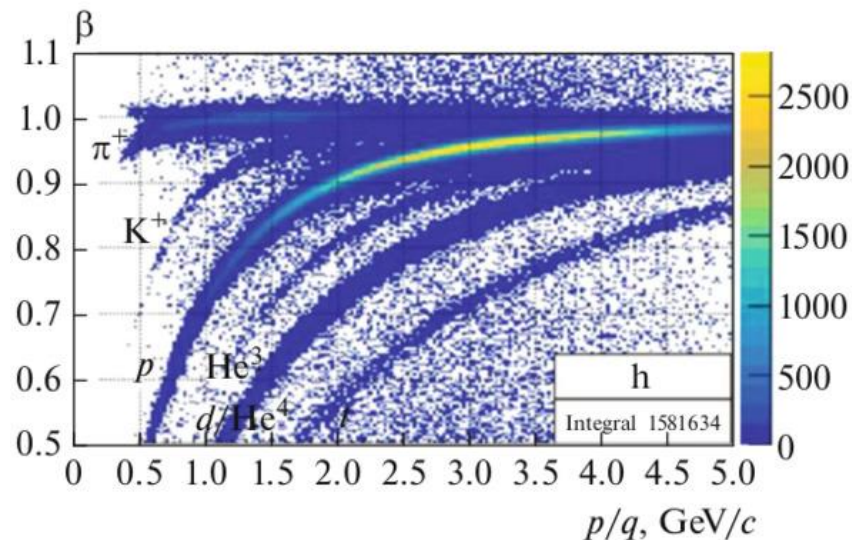
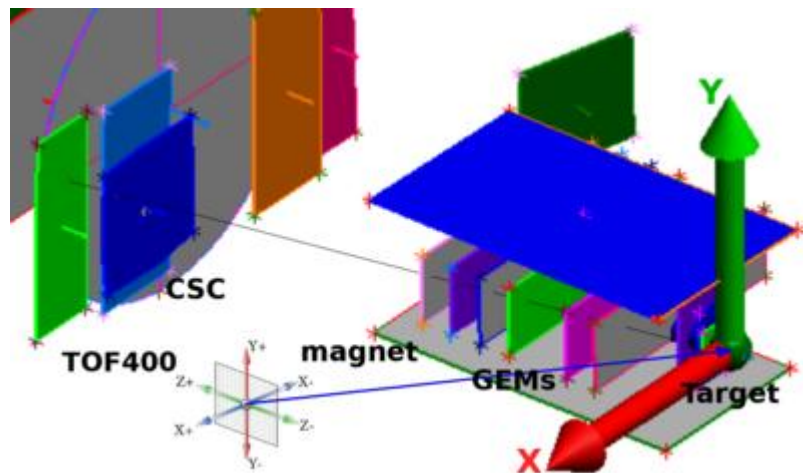
- ✓ Многозачорные резистивные плоские камеры (mRPCs) расположены на расстоянии ~4 м от мишени
- ✓ 20 mRPCs
- ✓ Вертикальные стрипы. Сигнал снимается с двух концов стрипа



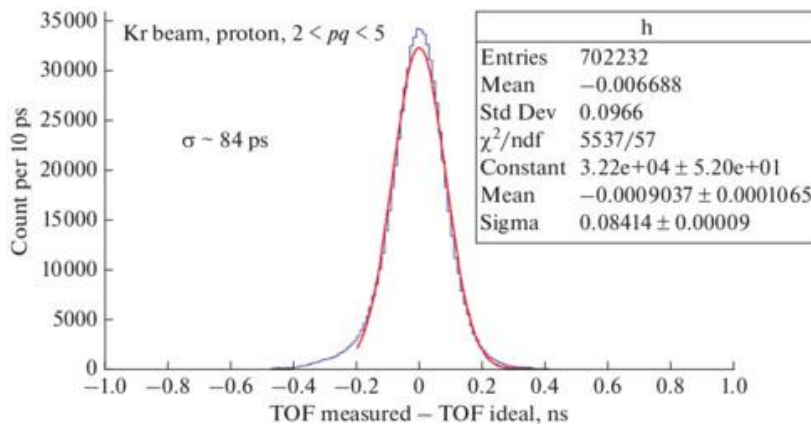
3. Идентификация типов заряженных частиц



Метод времени пролёта



$\pi^+, K^+, p, {}^3\text{He}, d/{}^4\text{He}, t$



$$m = p \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1}, \beta = \frac{L}{ct}, \quad (1)$$

m – масса частицы, p – импульс частицы, L – длина трека, t – время пролёта, c – скорость света

К. Alishina, V. Plotnikov et al., Phys. Part. Nucl. 53 (2022), 470–475

Коррекции CSC и ToF-400

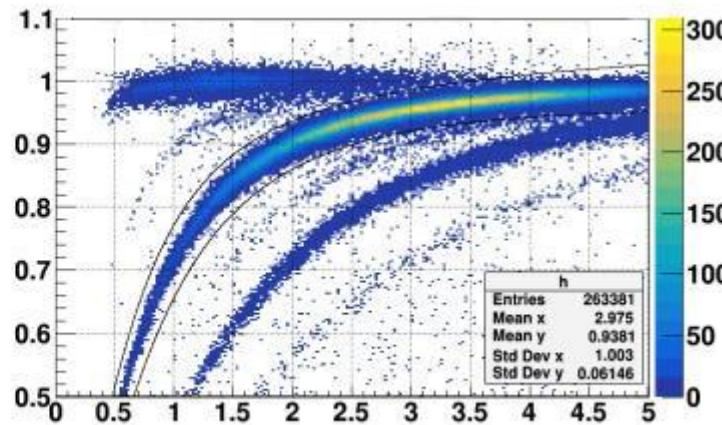
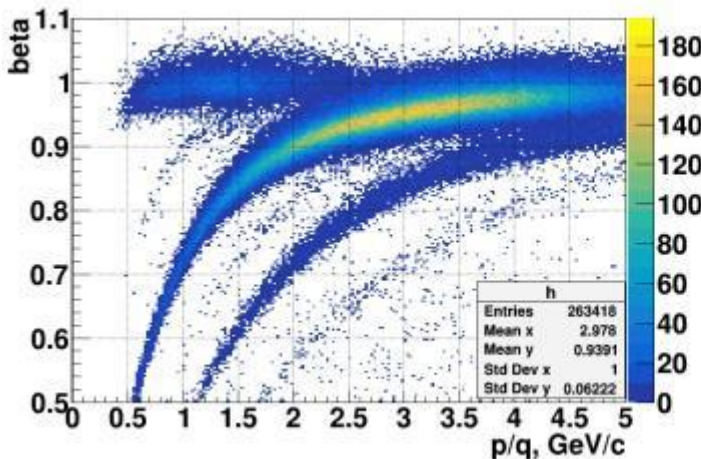


- ✓ Выравнивание по dz $dx = dz \cdot Tx$, [см]
- ✓ Выравнивание по dx и dy
- ✓ Вращение mRPC1 вокруг Z $dy = x \cdot \tan(\alpha_z)$

Результаты выравнивания

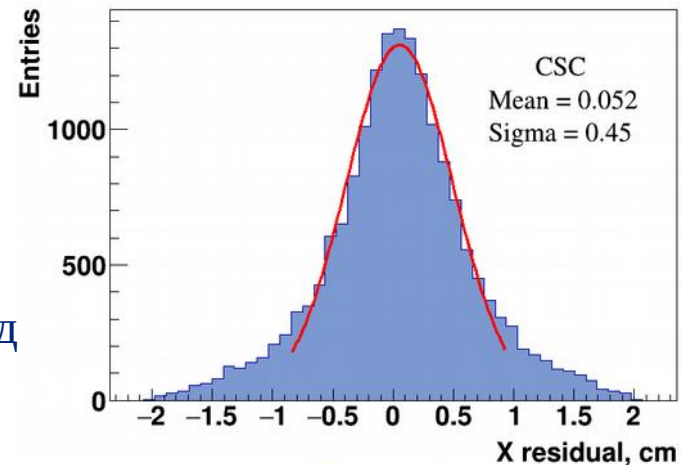
- ✓ $\sigma_{dz} < 1$ см, $\sigma_{dx} < 2$ мм, $\sigma_{dy} < 2$ мм, $\sigma_{zrot} < 10$ мрад

Результаты коррекций INL+Slewing



Коррекции на протонный пик каждого стрипа (~300)

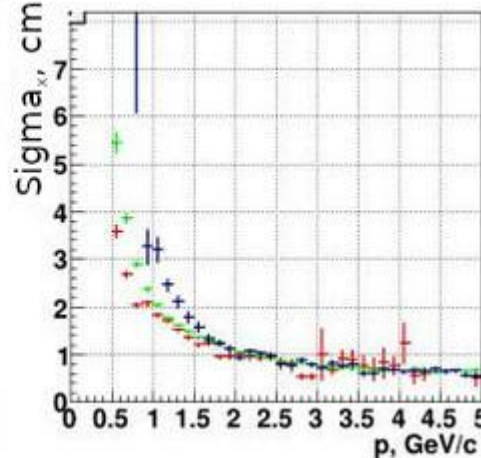
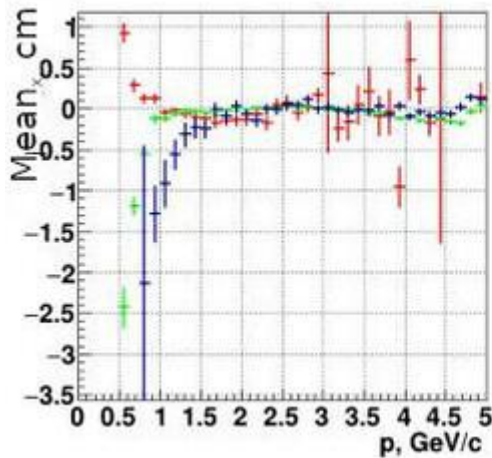
- ✓ σ_{dt} уменьшилось с 120 пс до 84 пс



✓ Протонная полоса выделена чёрными линиями

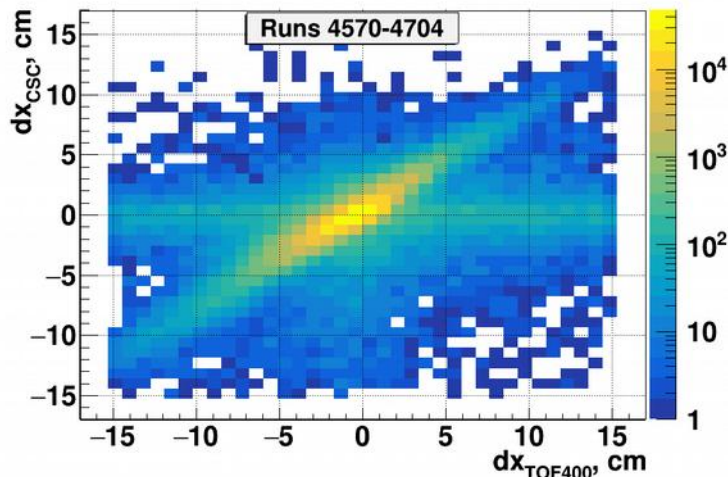
✓ σ_{dt} уменьшилось с 320 пс до 120 пс

Зависимость невязок в CSC и ToF-400 от p



- До коррекций**
- ✓ Отклонение возрастает с уменьшением p
 - ✓ Отклонение зависит от **типа частиц**
 - ✓ Отклонение из-за потерь энергии, многократного рассеяния и погрешностей измерения магнитного поля

Невязки в ToF-400 коррелируют с невязками в CSC

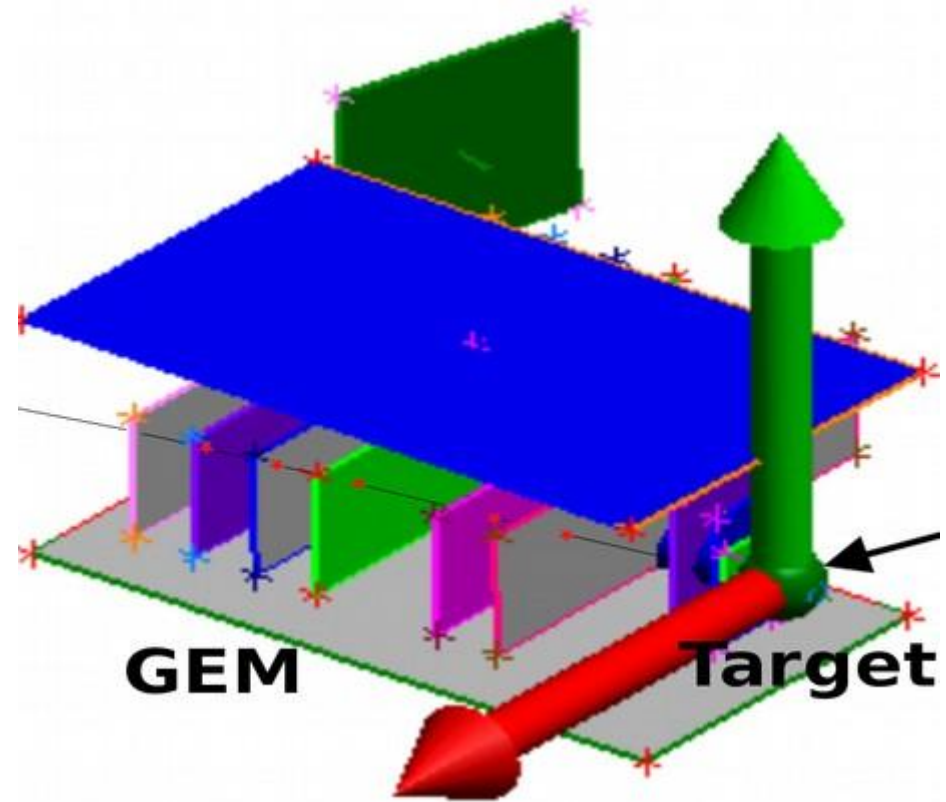


- После π^+ -коррекции**
- ✓ Координаты X и Y точки экстраполяции скорректированы с точностью лучше 3 мм
 - ✓ Окно сопоставления по X и Y $2.5\sigma_{\pi^+}$ (p)

4. Эффективность детекторов



- ✓ Ячейки $1 \times 1 \text{ см}^2$
- Отбор событий
- ✓ Реконструированная первичная вершина (PV)
- ✓ PV в области мишени
- ✓ Более 2 треков с >3 хитами (из 9 детекторов)
- Отбор треков
- ✓ Трек из PV
- ✓ Более 3 хитов (из 9 детекторов)
- ✓ Для ST (GEM) эфф. 2 (4) хита (из 3 (6) станций)
- ✓ Импульс трека $2 < p < 5 \text{ ГэВ}/c$



- ✓ Два глобальных счётчика: знаменатель и числитель

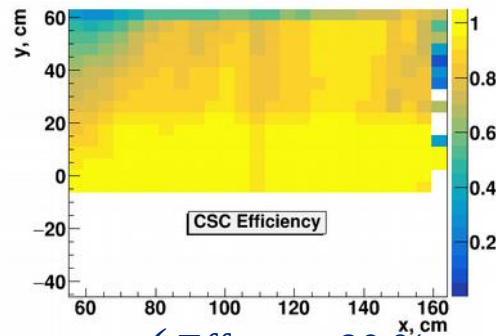
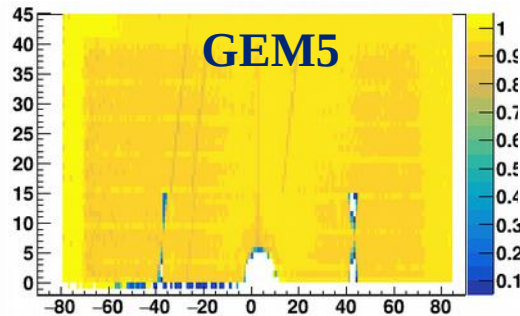
V.A. Plotnikov et al., Phys. Part. Nucl. Lett. 20 (2023), 1392–1402

Эффективность детекторов

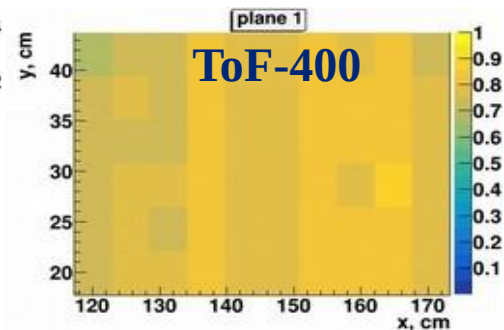


Эффективность детекторов в плоскости XY

- ✓ $Eff_{SToutBeam} = 80\%$
- ✓ $Eff_{GEM1,6} = 80\%$,
- $Eff_{GEM2-5} = 90\%$

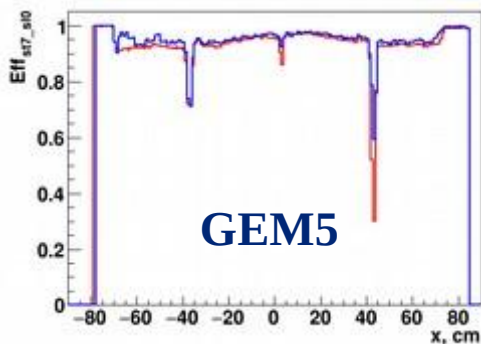


- ✓ $Eff_{HotCSC} > 90\%$
- ✓ $75 < Eff_{ColdCSC} < 80\%$

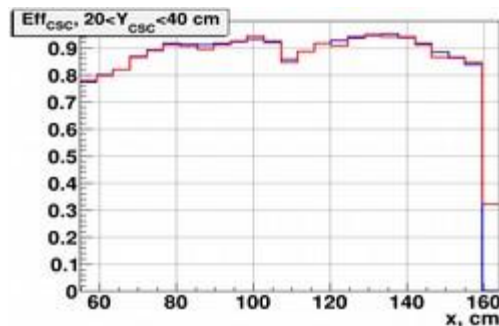


- ✓ Для анализа использованы Ar раны с $Eff_{ColdCSC} > 50\%$
- ✓ Станции ST, GEM и камеры mRPC ToF-400 работали стабильно
- ✓ Уменьшение эффективности при приближении к пучку
- ✓ $Eff_{pl0-2} \sim 80\%$ (дальше от пучка)
- ✓ $Eff_{pl5-7} \sim 50\%$ (около пучка)

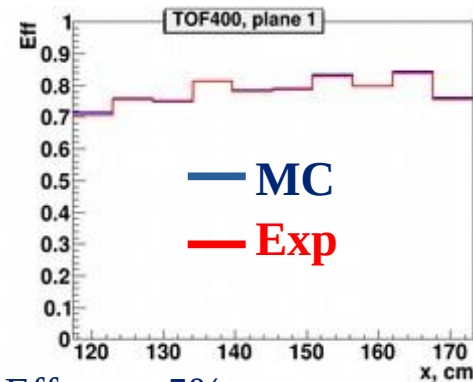
Результаты настройки эффективности в МК в соответствии с экспериментом



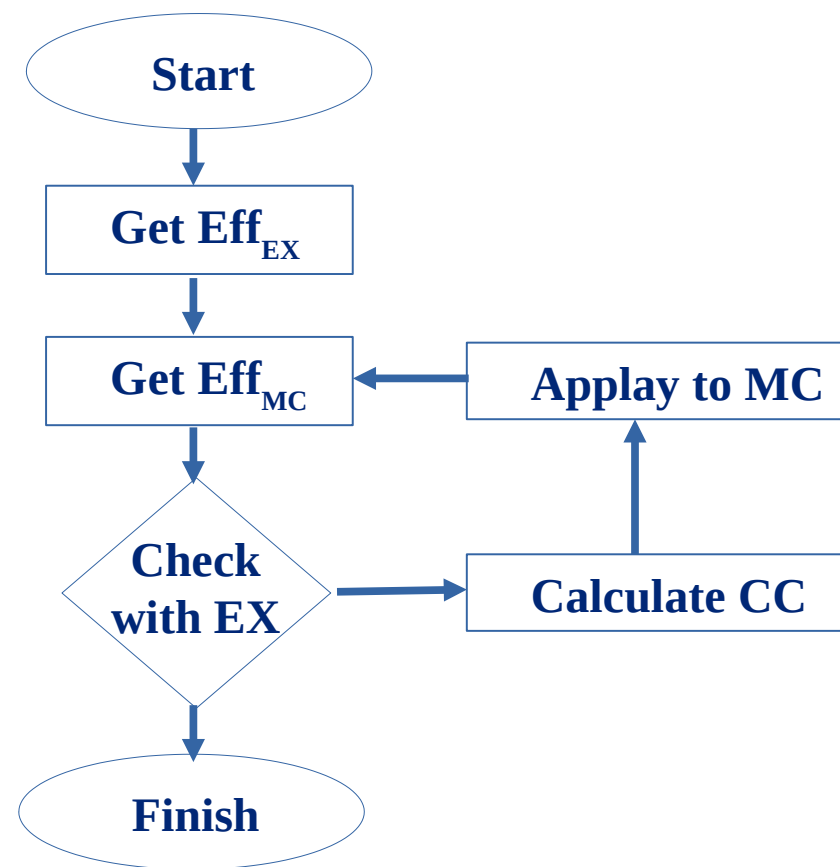
$$\Delta Eff_{ST/GEM} = 3\%$$



$$\Delta Eff_{CSC} = \Delta Eff_{ToF-400} = 5\%$$



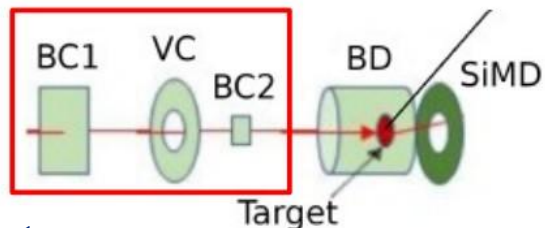
- ✓ В моделировании такая же цепочка реконструкции, как и для экспериментальных данных
- ✓ Случайное подавление сигнала в моделировании
- ✓ Итеративное приближение к экспериментальным данным с использованием коэффициентов коррекции двух типов (CC) (Eff_{EX} / Eff_{MC} и $Eff_{EX} - Eff_{MC}$)
- ✓ Оптимальный выбор КК зависит от детектора и части детектора
- ✓ Обычно 2-3 итерации достаточно
- ✓ Метод был автоматизирован и интегрирован в программное обеспечение для анализа



5. Измерение сечений и множественности π^+ и K^+ и систематические погрешности

The logo for BM@N, featuring the letters 'BM@N' in a stylized font with a circular graphic element behind the '@' symbol.

Критерии отбора событий



✓ Подавление гало пучка и наложения событий во временном окне считывания, число сигналов в стартовом детекторе: $BC1=1$, число сигналов в пучковом счётчике: $BC2=1$, число сигналов в счётчике вето вокруг пучка: $Veto=0$;

✓ Триггерные условия в детекторах множественности: число сигналов $BD \geq m$, $m \in [2;4]$, $SiMD \geq n$, $n \in [2;4]$ и комбинации триггеров $SiMD$ и BD (зависят от рана).

Число зарегистрированных событий, потоки пучка и интегральные светимости, набранные для пучка Ar 3.2 АГэВ (*ToF-400* (*ToF-700*))

Взаимод. (толщина мишени)	Число триггеров / 10^6	Интегр. поток пучка / 10^7	Интегральная светимость / 10^{30} см^{-2}
<i>Ar+C</i> (2мм)	11.7 (11.3)	10.9 (8.7)	2.06 (1.97)
<i>Ar+Al</i> (3.33мм)	30.6 (29.2)	15.4 (10.2)	2.30 (2.05)
<i>Ar+Cu</i> (1.67мм)	30.9 (28.7)	15.9 (11.3)	1.79 (1.60)
<i>Ar+Sn</i> (2.57мм)	30.0 (25.9)	15.1 (9.5)	1.11 (0.91)
<i>Ar+Pb</i> (2.5мм)	13.7 (13.7)	7.0 (4.9)	0.50 (0.40)

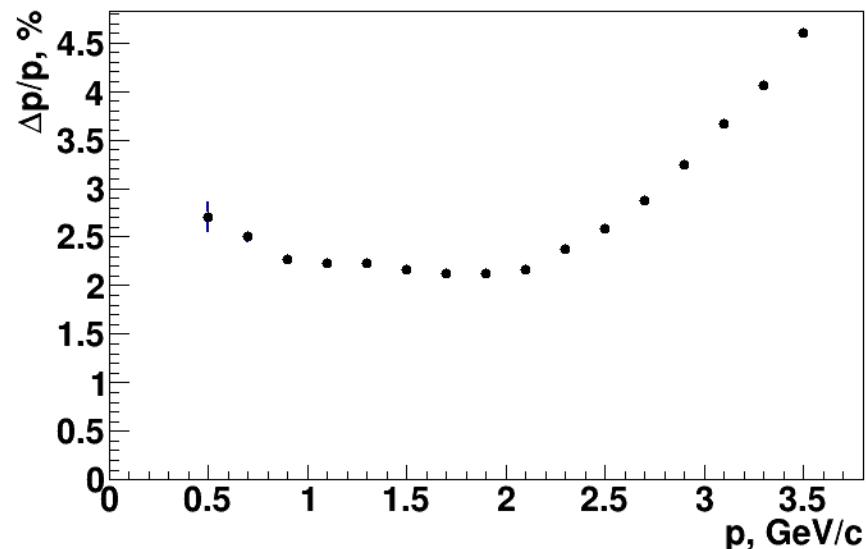
S. Afanasiev, V. Plotnikov et al., JHEP 2023 7 174

Технические характеристики Ar сеанса



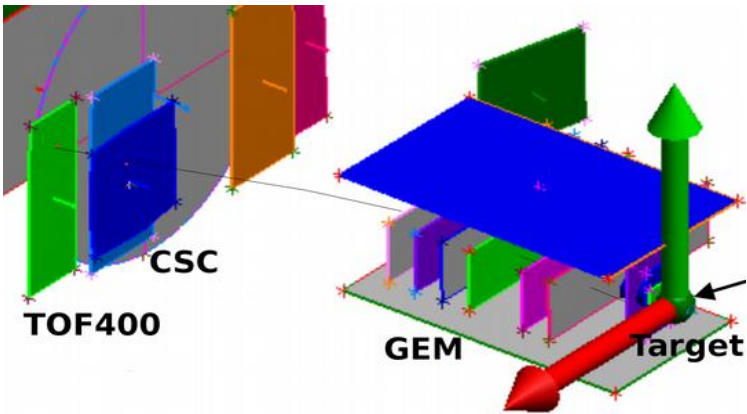
- ✓ Интенсивность пучка: единицы 10^5 ионов на спил
- ✓ Длительность спила: 2–2.5 с
- ✓ Толщина твердых мишеней (вероятность взаимодействия с ядрами аргона): $\sim 3\%$
- ✓ Число событий для анализа: $\sim 16.3\text{M}$

- ✓ Область псевдобыстрот: $1.6 \leq \eta \leq 4.4$
- ✓ Сила анализирующего магнита: $\sim 2.1\text{T}\cdot\text{m}$
- ✓ Разрешение расстояния от трека до PV в плоскости X-Y: 2.4 мм
- ✓ Разрешение по времени ToF-400: 84 пс



Относительное разрешение по импульсу как функция импульса

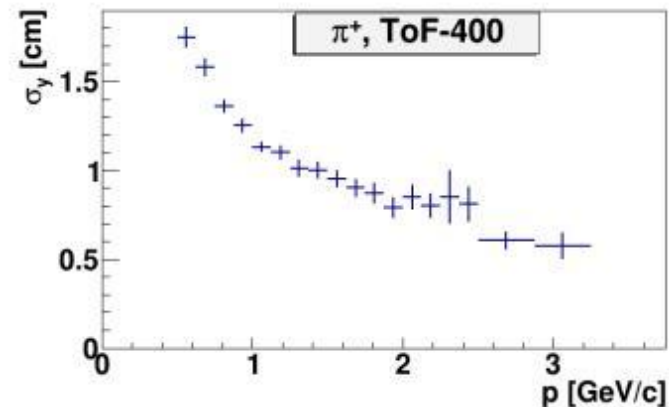
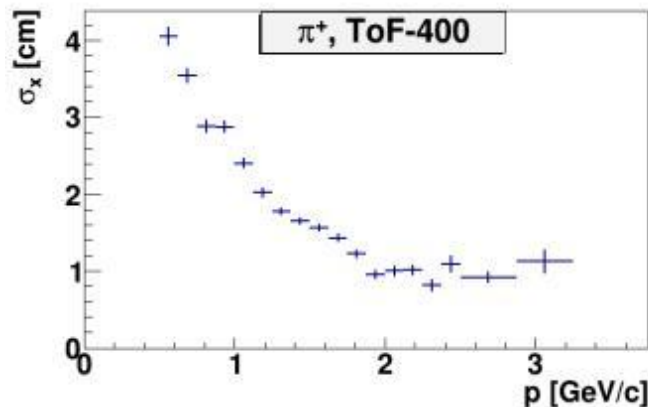
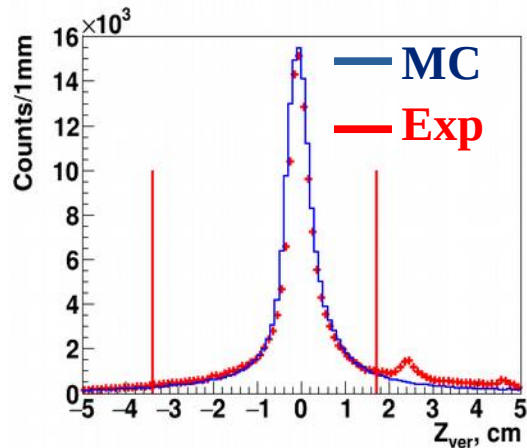
Критерии отбора π^+ и K^+



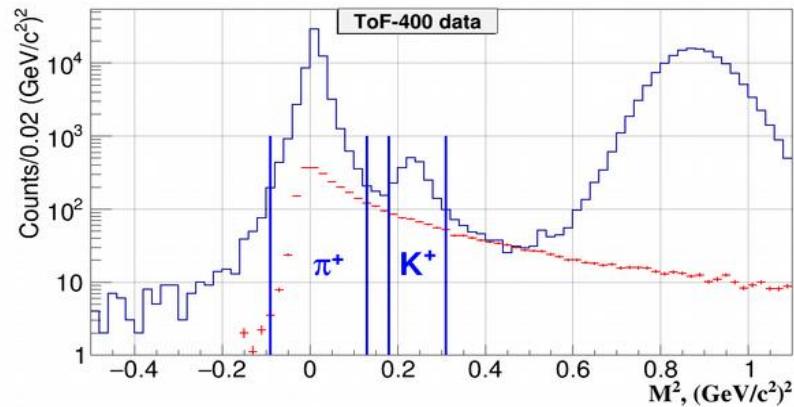
- ✓ Число хитов в 6 GEM на трек > 3
- ✓ Число треков в PV > 1
- ✓ PV около мишени: $-3.4 < Z_{PV} - Z_0 < 1.7$ см
- ✓ Диапазон импульсов треков для ToF-400:
 $p > 0.5$ ГэВ/с
- ✓ Расстояние от трека до PV в плоскости X-Y: $dca < 1$ см (треки из PV)
- ✓ χ^2/NDF для треков из PV $< 3.5^2$
- ✓ Расстояние экстраполированных треков до хитов CSC и ToF-400: $|\text{resid}_{x,y}| < 2.5\sigma$ распределения невязок хит-трек

Сокращение:

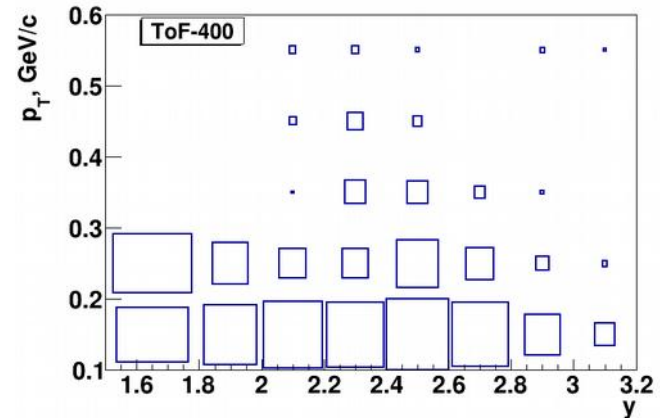
- ✓ PV – первичная вершина



Спектр по M^2 положит. заряд. частиц



Покрытие фазового пространства π^+

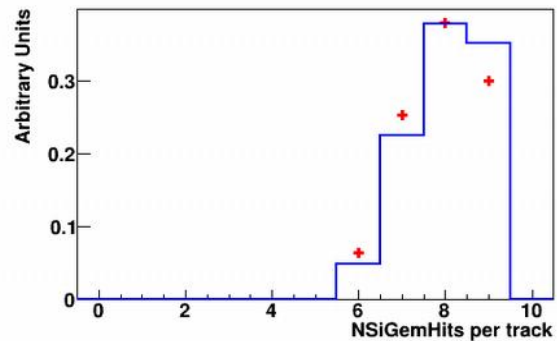
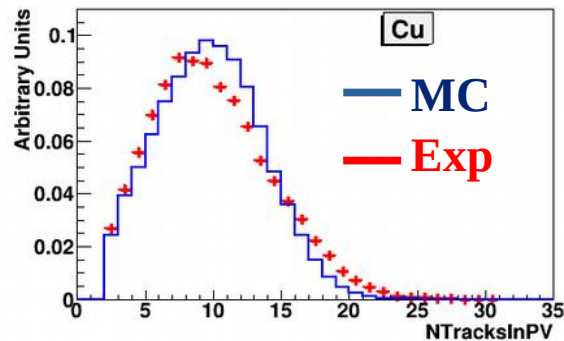
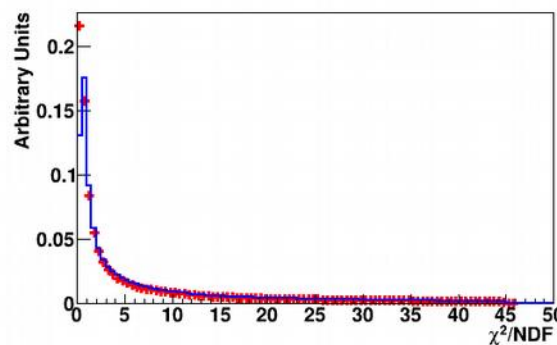
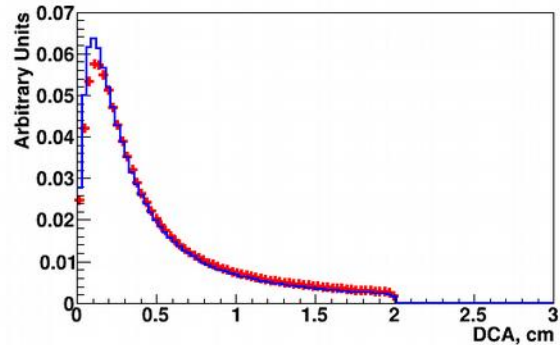
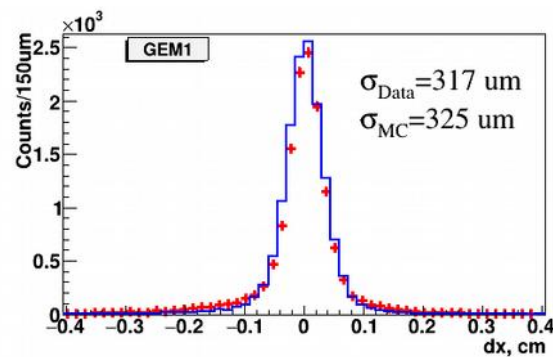
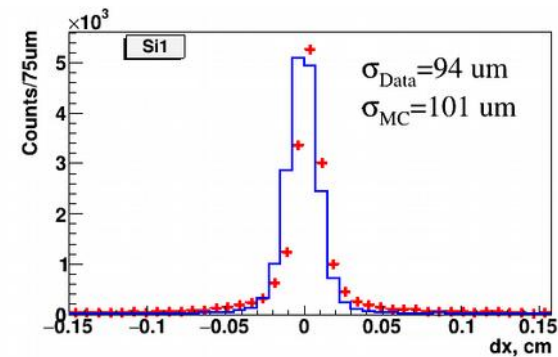


Данные для ToF-400. Вертикальные линии показывают области сигналов идентифицированных π^+ и K^+ -мезонов. **Красные символы** с усами ошибок показывают фон, оцененный из “смешанных” событий.

Реконструированные сигналы π^+ и K^+ для ToF-400

Particle, Detector	Target				
	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>
π^+ , ToF-400	4020±66	21130±152	28010±175	32060±186	22420±156
K^+ , ToF-400	45±10	278±25	538±31	729±36	570±32

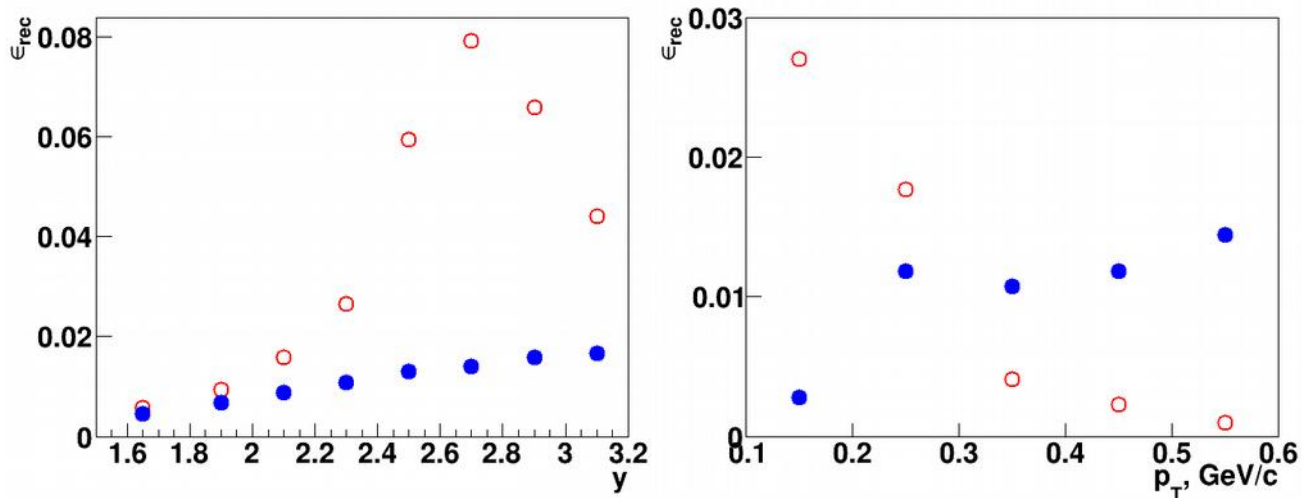
Сравнение экспериментальных данных и МК



Распределения невязок хитов в X-проекции (ось отклонения магнитом) относительно реконструированных треков: (слева) – в первой плоскости ST, (справа) – в первой плоскости GEM. Экспериментальные данные показаны красными крестиками, данные симуляции показаны в виде синих гистограм.

Сравнение экспериментальных распределений (красные маркеры) и реконструированные распределения МК GEANT событий, сгенерированных по модели DCM-SMM (синие линии): DCA; χ^2/NDF реконструированных треков; число треков, реконструированных в PV; число хитов на трек, реконструированных в 3 ST и 6 GEM.

Эффективность реконструкции π^+



ToF-400 (открытые красные кружки) и ToF-700 (заполненные синие кружки). Результаты показаны для π^+ -мезонов образованных во взаимодействиях Ar+Sn.

$$\epsilon_{rec}(y, p_T) = N_{rec}(y, p_T) / N_{gen}(y, p_T),$$

где N_{rec} – число реконструированных π^+ (K^+), N_{gen} – число сгенерированных π^+ (K^+). Эффективность реконструкции π^+ и K^+ рассчитана в интервалах по продольной быстройте y и поперечному импульсу p_T . Она учитывает геометрический акцептанс, эффективность детекторов, эффективность кинематических и пространственных ограничений и потери π^+ и K^+ из-за распадов на лету.

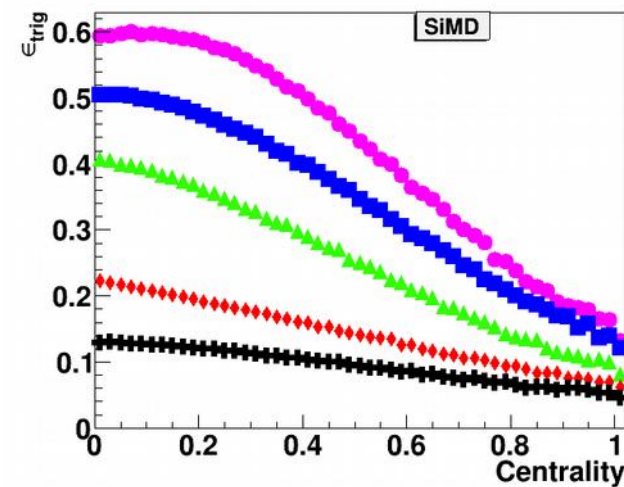
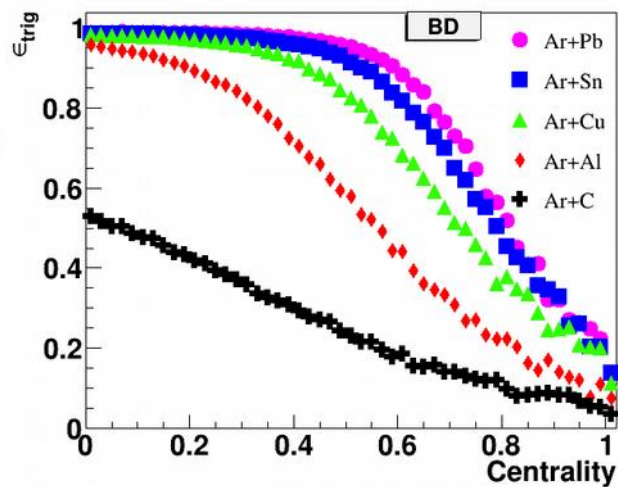
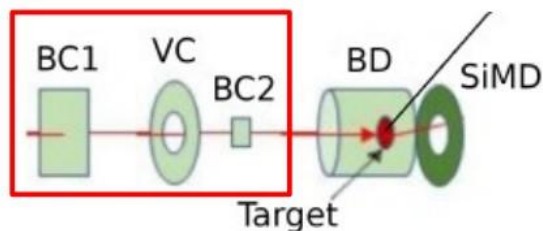
Эффективность триггеров (ЭТ)



Эффективность получения триггерного сигнала, зависящая от количества сработавших каналов в детекторах BD (SiMD) ϵ_{trig} вычислена для событий с восстановленными π^+ и K^+ с использованием эксперим. событий, записанных с независимым триггером, основанном на детект. SiMD (BD):

$$\epsilon_{trig}(BD \geq m) = N(BD \geq m, SiMD \geq n) / N(SiMD \geq n),$$

где m и n – минимальные числа сработавших каналов BD и SiMD, варьирующиеся от 2 до 4. Были учтены зависимости ЭТ от множественности треков в PV и положения X/Y PV. Комбинированные ЭТ для BD и SiMD вычислялись как произведение ЭТ BD и SiMD. **Систематические неопределённости** включают разности сигналов π^+ , K^+ , полученные с использованием $\langle \epsilon_{trig} \rangle$ вместо $\epsilon_{trig}(N_{tr}, X_{PV}, Y_{PV})$, а также разницу ϵ_{trig} , полученных из ограниченной статистики событий, зарегистрированных с использованием ВТ.



Сечения и выходы



Дифференциальные сечения $d^2\sigma_{\pi,K}(y, p_T)/dydp_T$ и выходы $d^2N_{\pi,K}(y, p_T)/dydp_T$ π^+ и K^+ во взаимодействиях Ar+C, Al, Cu, Sn, Pb рассчитаны в интервалах (y, p_T) в соответствии с формулами:

$$d^2\sigma_{\pi,K}(y, p_T) / dydp_T = \Sigma (d^2n_{\pi,K}(y, p_T) N_{tr}) / \epsilon_{trig}(N_{tr}) dydp_T \cdot 1 / (\epsilon_{rec}(y, p_T) \cdot L)$$

$$d^2N_{\pi,K}(y, p_T) / dydp_T = d^2\sigma_{\pi,K}(y, p_T) / dydp_T / \sigma_{inel}$$

где L - светимость,

$n_{\pi,K}$ – число реконструированных π^+ и K^+ -мезонов в интервалах dy и dp_T ,

ϵ_{rec} – эффективность реконструкции π^+ и K^+ -мезонов,

ϵ_{trig} – эффективность триггеров (приводит экспериментальные данные к minimum bias),

σ_{inel} – сечение minimum bias неупругих взаимодействий Ar+A.

Сечение для неупругих взаимодействий Ar+C, Al, Cu, Sn, Pb получено из предсказаний модели DCM-SMM, которые согласуются с результатами вычислений по формуле:

$\sigma_{inel} = \pi R_0^2 (A_P^{1/3} + A_T^{1/3})^2$, где $R_0 = 1.2$ фм – эффективный радиус нуклона, A_P и A_T - атомные номера ядер пучка и мишени.

Взаимод.	Ar+C	Ar+Al	Ar+Cu	Ar+Sn	Ar+Pb
σ_{inel} , мб	1470±50	1860±50	2480±50	3140±50	3970±50

Систематические неопределённости



Полные систематические неопределённости выходов π^+ и K^+ -мезонов вычислены как корень квадратный суммы квадратов неопределённостей от нескольких источников.

Средние систематические неопределённости в интервалах (y, p_T) π^+ и K^+ -мезонов.

Мишень Система- тика	π^+					Target Systematics	K^+				
	C, sys%	Al, sys%	Cu, sys%	Sn, sys%	Pb, sys%		C, sys%	Al, sys%	Cu, sys%	Sn, sys%	Pb, sys%
L	2.0					L	2.0				
σ_{inel}	3.4	2.7	2.0	1.6	1.3	σ_{inel}	3.4	2.7	2.0	1.6	1.3
ϵ_{trig}	9	7	7	7	7	ϵ_{trig}	31	14	9	8	8
n, ϵ_{rec}	14	12	12	10	10	n, ϵ_{rec}	25	23	14	13	15
Полные	17	14	14	13	13	Полные	40	27	17	16	17

Систематические неопределённости **выходов** π^+ и K^+ -мезонов и ϵ_{rec} в каждом бине (y, p_T) вычислялись, как корень квадратный из суммы квадратов неопределённостей от следующих источников:

Sys1: систематические неопределённости эффективности детекторов центрального трекера;

Sys2: систематические неопределённости сопоставления треков из центрального трекера с хитами CSC и ToF-400;

Sys3: систематические неопределённости эффективности реконструкции из-за остаточной разницы в распределениях положения первичной вершины по X/Y в моделировании относительно экспериментальных данных;

Sys4: систематические неопределённости вычитания фона под сигналами π^+ и K^+ в спектре квадрата масс идентифицированных частиц.

Нормализующие неопределённости выходов π^+ и K^+ -мезонов вычислялись для полной измеренной по (y, p_T) области, как корень квадратный из суммы квадратов статистической неопределённости эффективности триггера, неопределённостей эффективности трековых детекторов, эффективности сопоставления треков с хитами CSC и ToF-400, неопределённости светимости и сечения неупругих взаимодействий.

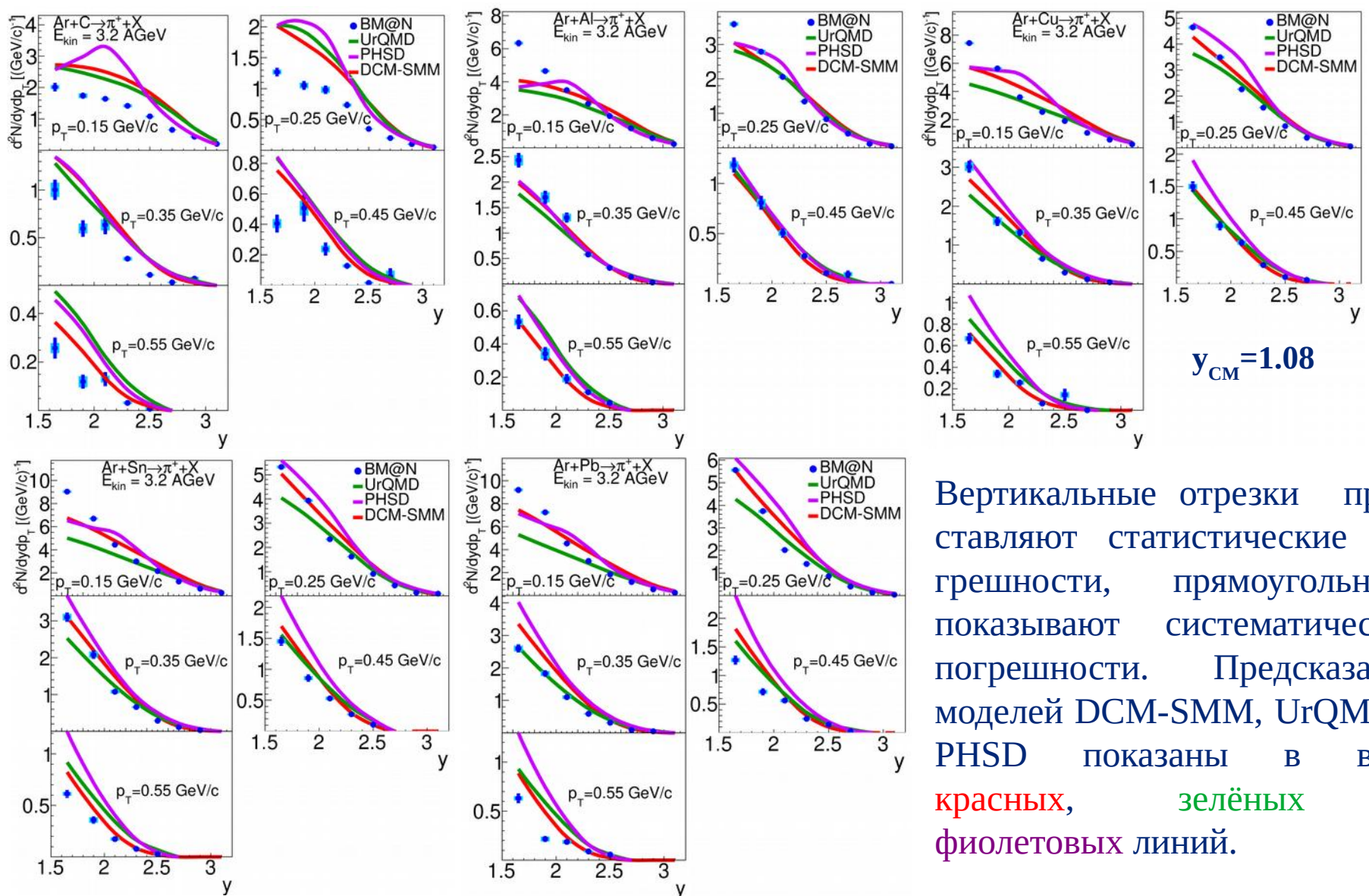
Выходы были также получены с использованием другого набора внешних детекторов: **DCH** и **ToF-700**. В пределах погрешностей результаты совпали с результатами для **CSC** и **ToF-400**. Разница была использована в качестве дополнительного источника систематической погрешности.

Дополнительно была сделана оценка систематической неопределённости выходов π^+ и K^+ -мезонов из разницы выходов, полученных с использованием моделей **UrQMD** и **LAQGSM**. Величина полученной неопределённости не превышает 5%.

6. Физические результаты по образованию π^+ и K^+

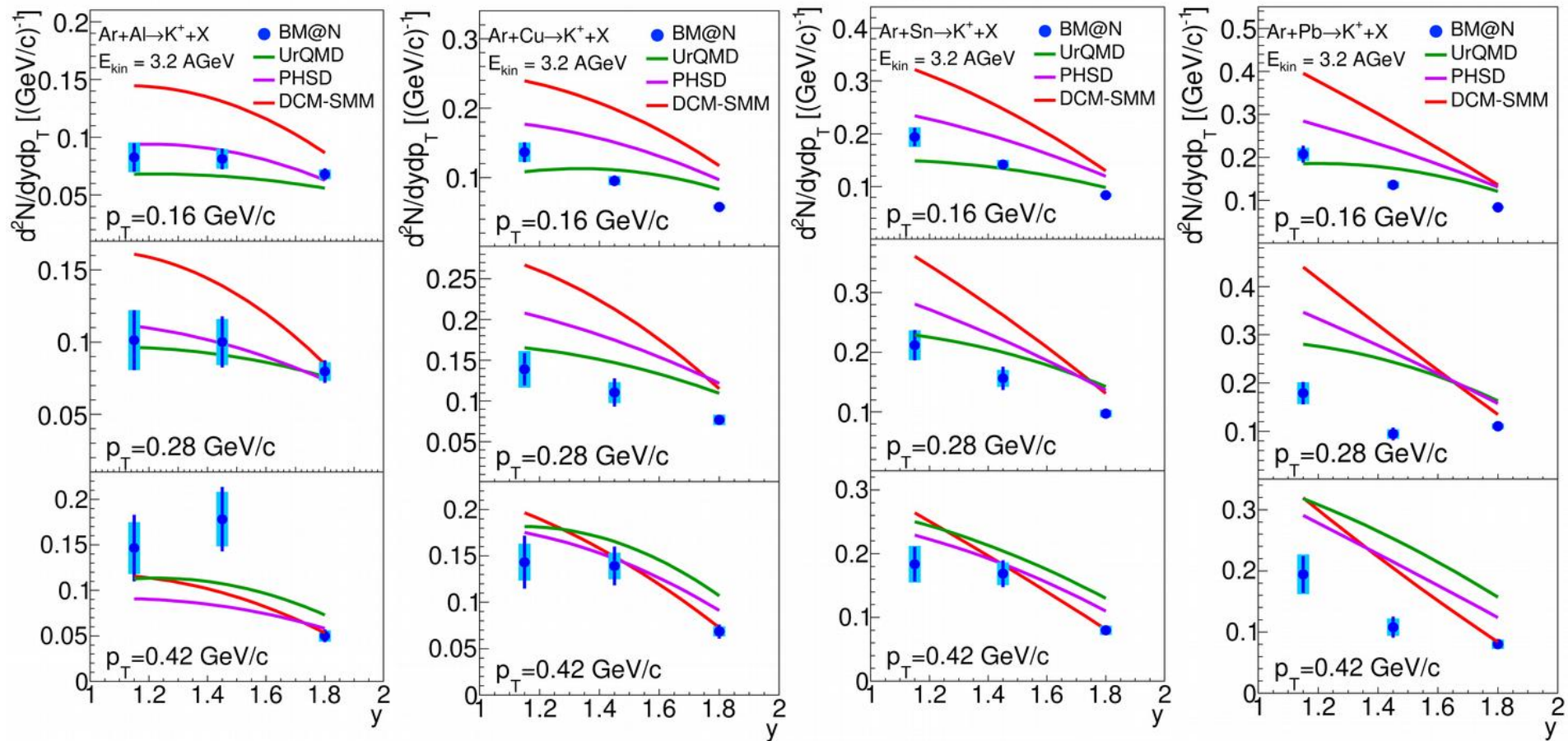


Спектры π^+ -мезонов по продольной быстроте



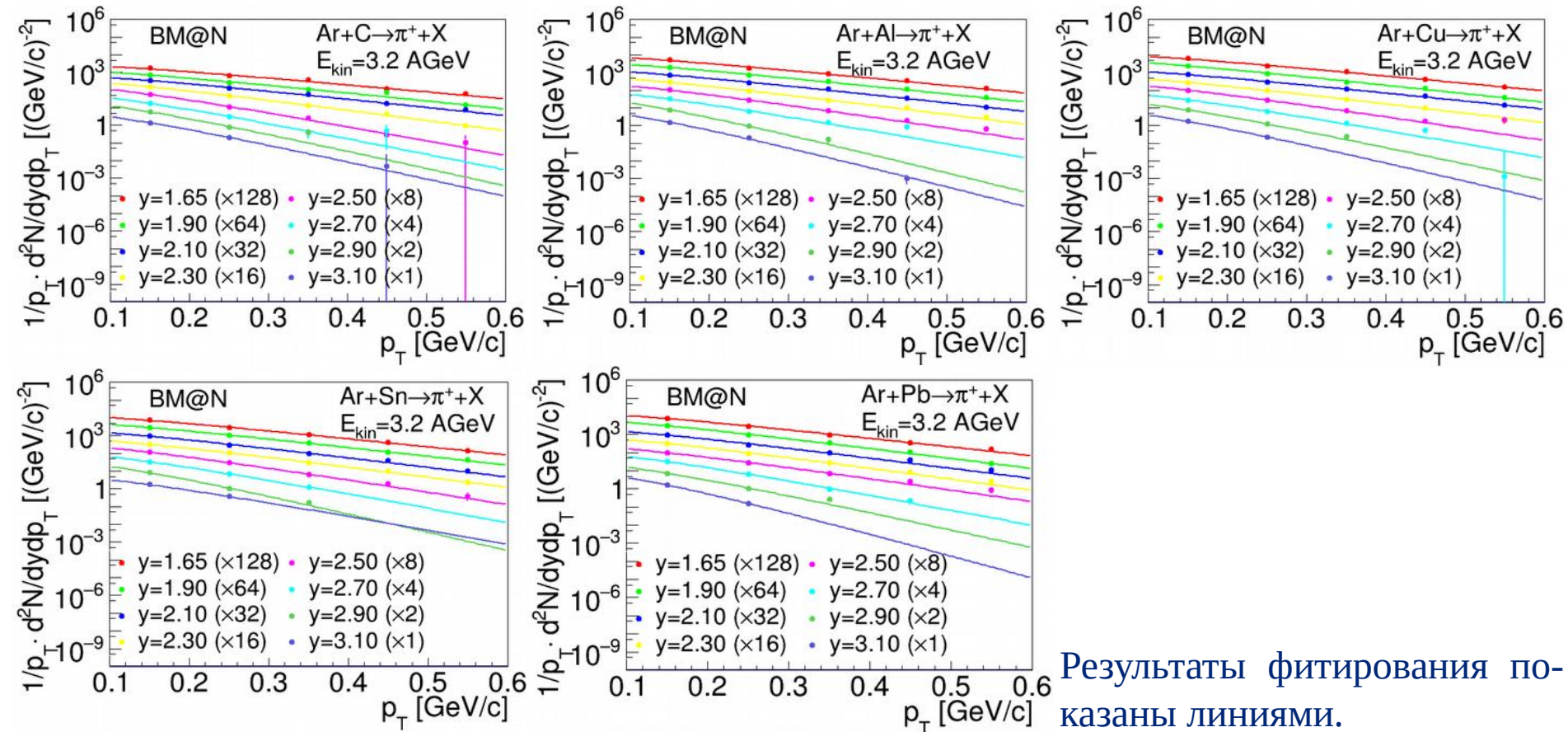
Вертикальные отрезки представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде красных, зелёных и фиолетовых линий.

Спектры K^+ -мезонов по продольной быстроте



Вертикальные отрезки представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде **красных**, **зелёных** и **фиолетовых** линий.

Спектры π^+ -мезонов по поперечному импульсу p_T

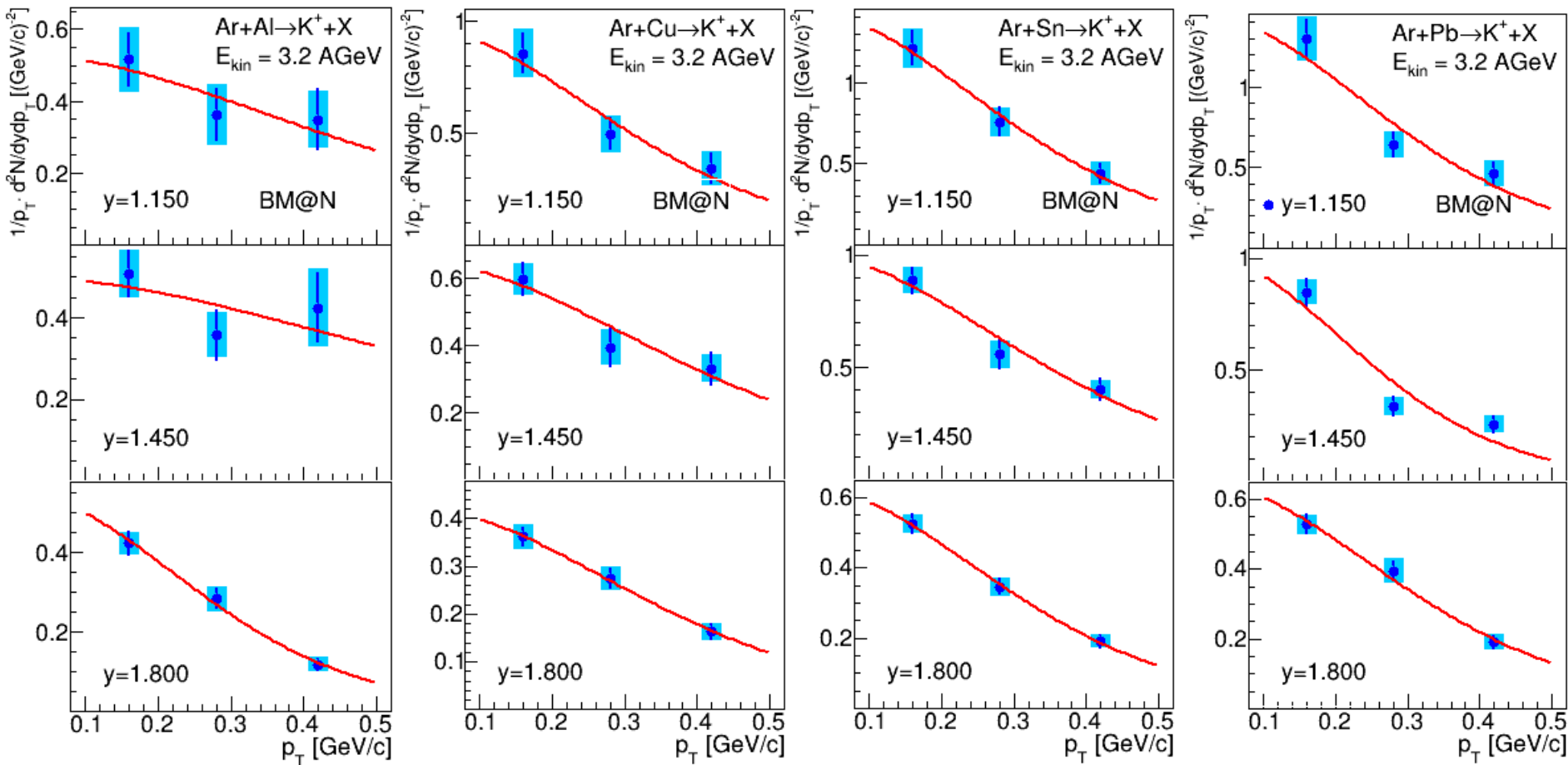


Результаты фитирования показаны линиями.

$$1/p_T \cdot d^2N/dp_T dy = C \cdot m_T \cdot \exp(-(m_T - m_{\pi,K})/T_0)$$

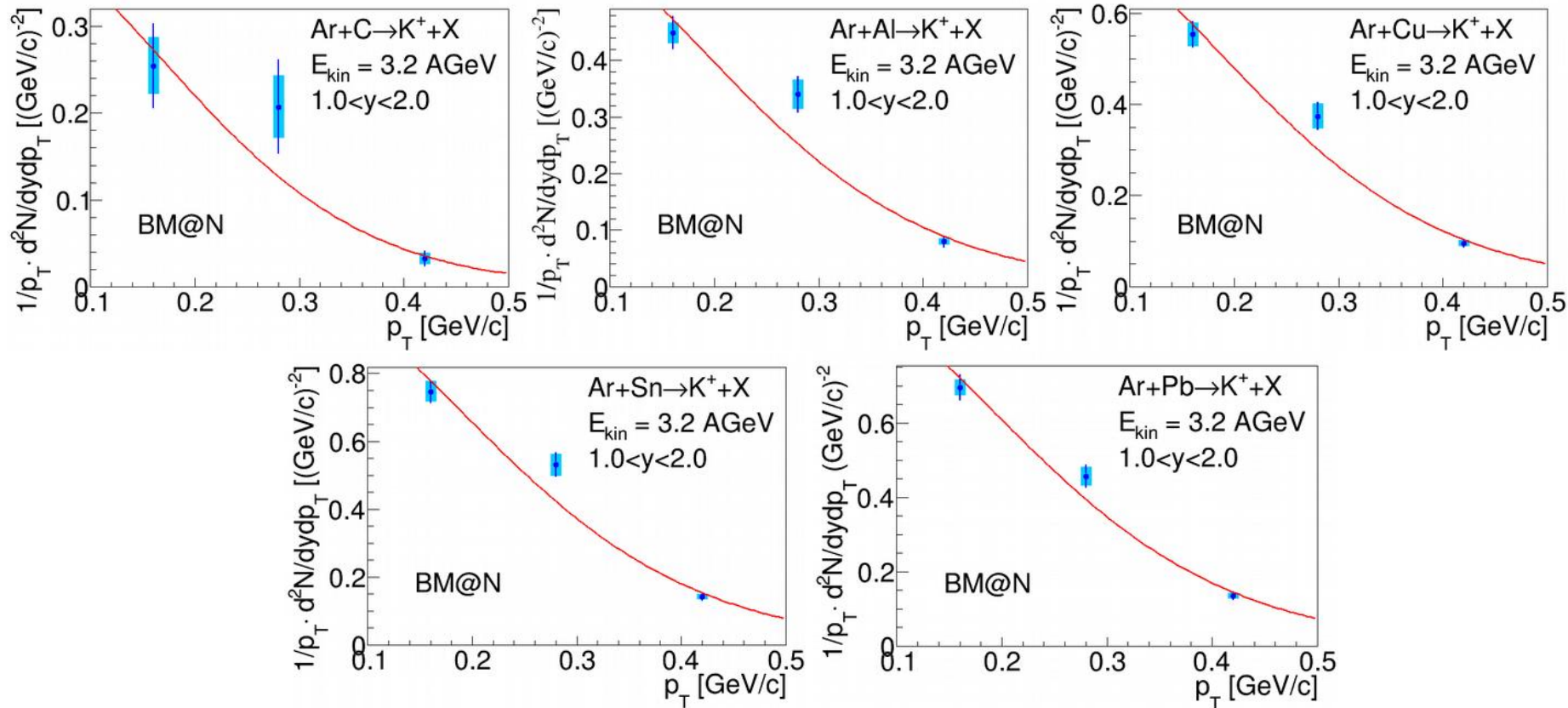
где $m_T = \sqrt{(m_{\pi,K}^2 + p_T^2)}$ – поперечная масса, C – нормировка (свободный параметр), T_0 – обратный наклон (свободный параметр), dy – ширина измеренного бина по y , dp_T – ширина измеренного бина по p_T .

Спектры K^+ -мезонов по поперечному импульсу p_T



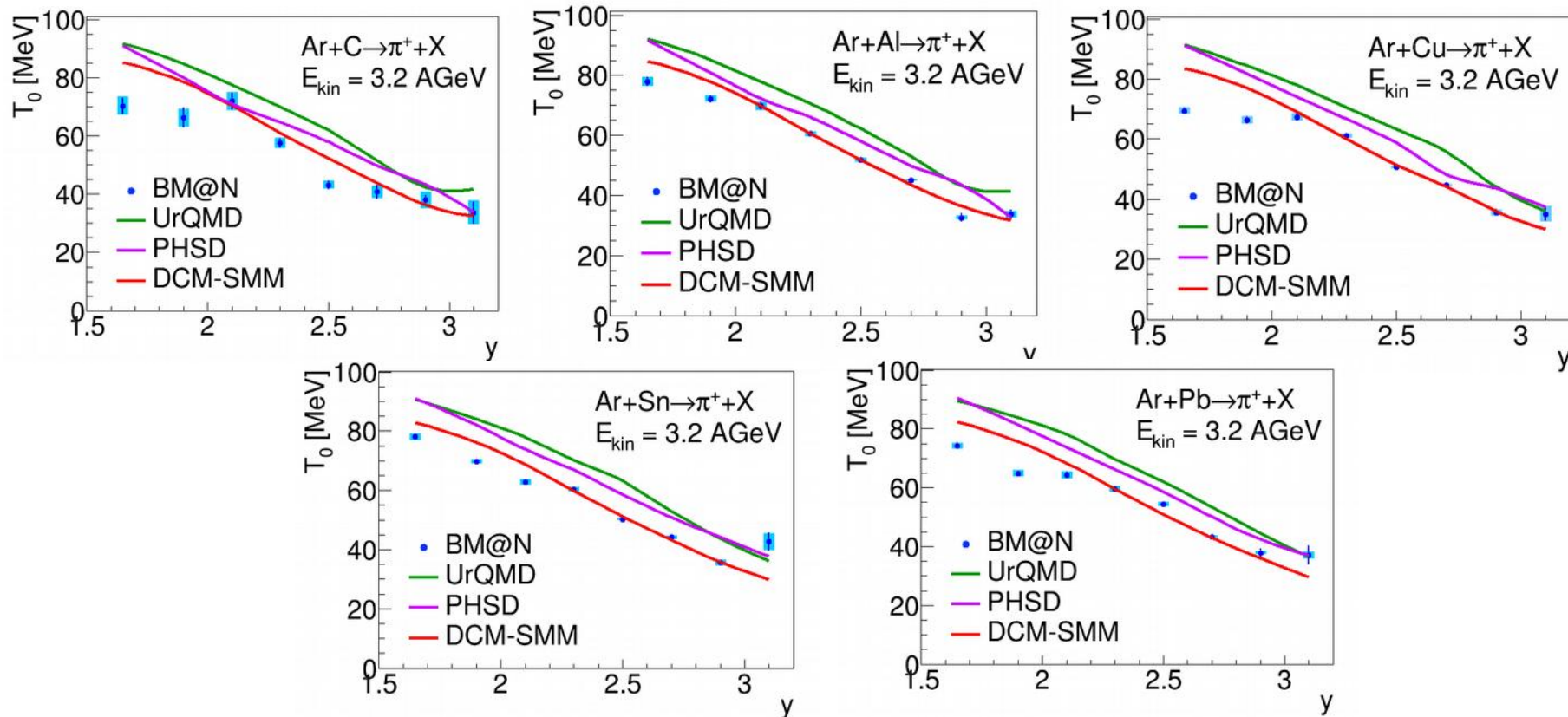
Вертикальные отрезки представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Результаты фитирования показаны в виде **красных** кривых.

Спектры K^+ -мезонов по поперечному импульсу p_T



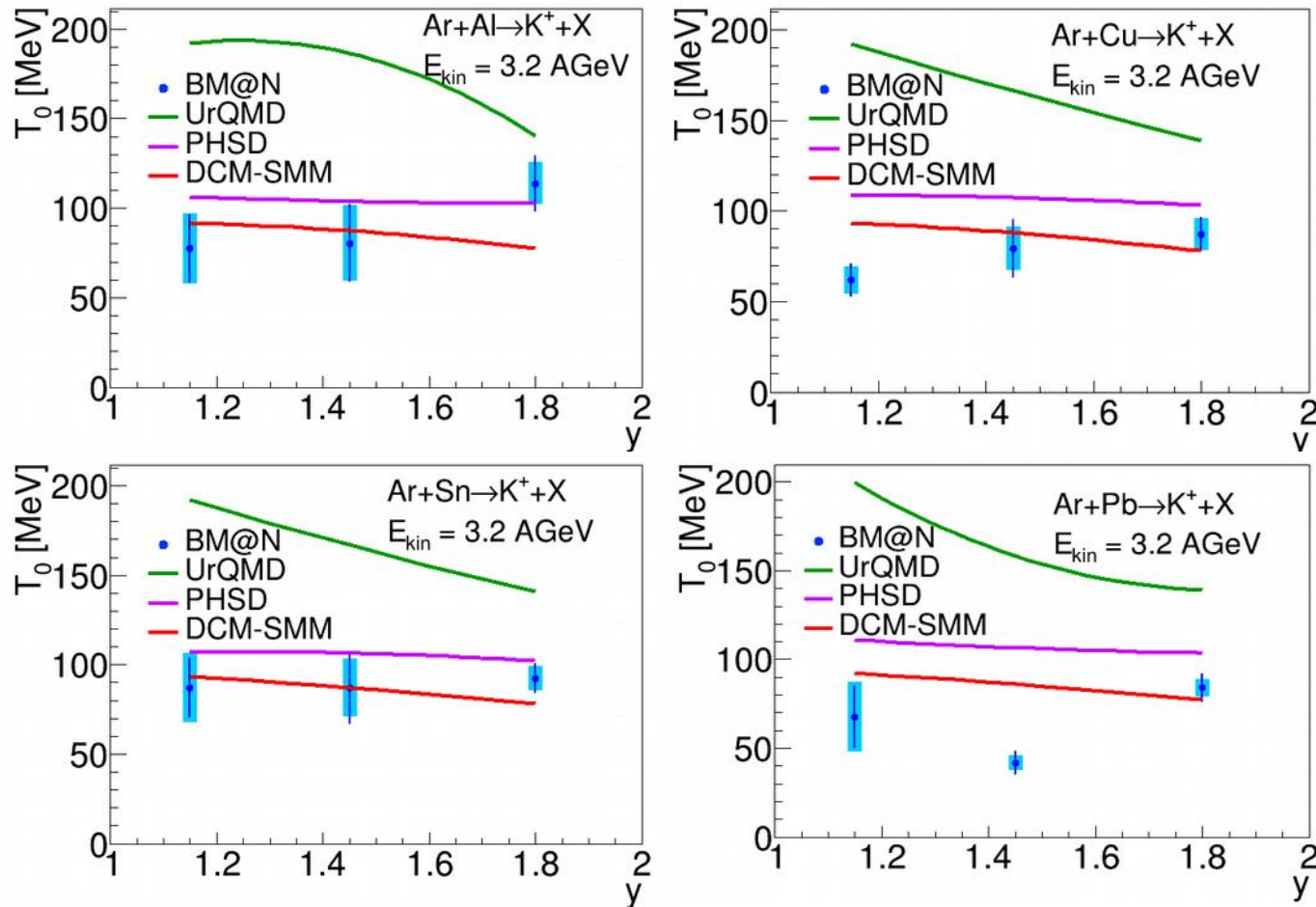
Интегральные спектры для всей измеренной области по продольной быстрой.
Результаты фитирования показаны в виде **красных** кривых.

Параметры обратного наклона T_0 для π^+



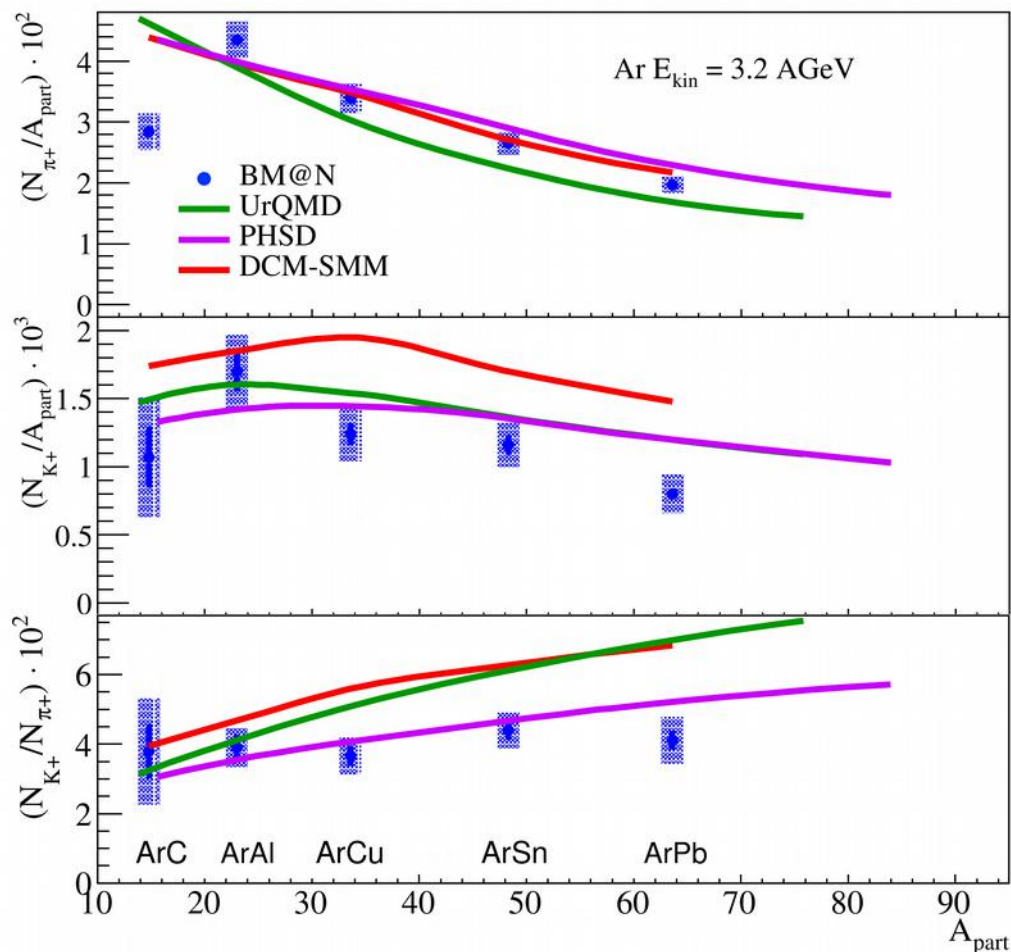
Вертикальные отрезки представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде красных, зелёных и фиолетовых линий.

Параметры обратного наклона T_0 для K^+ BM@N



Вертикальные отрезки представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Предсказания моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD показаны в виде **красных**, **зелёных** и **фиолетовых** линий.

$$N_{\pi^+}/A_{\text{part}}, N_{K^+}/A_{\text{part}}, N_{K^+}/N_{\pi^+}$$



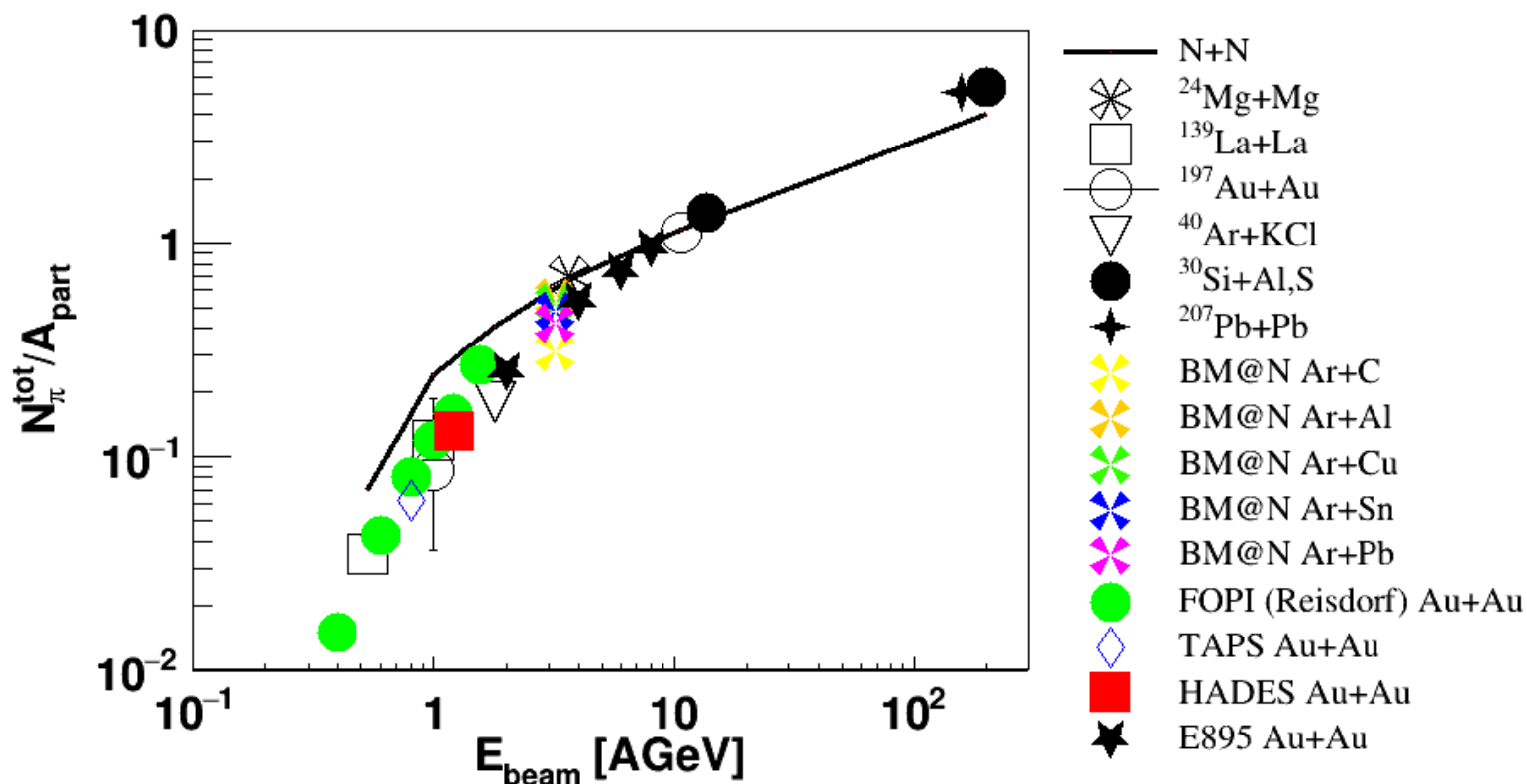
Множественности π^+ и K^+ , нормированные на A_{part} . Вертикальные отрезки представляют статистические погрешности, прямоугольники показывают систематические погрешности. Результаты BM@N сравнены с предсказаниями моделей DCM-SMM, UrQMD и PHSD для аргон-ядерных взаимодействий, показанными в виде **красных**, **зелёных** и **фиолетовых** линий.

Представлены факторы экстраполяции в полную кинематическую область и число нуклонов, участвующих во взаимодействии, A_{part}

1) Факторы экстраполяции усреднены по предсказаниям моделей DCM-SMM, RHSD и UrQMD. В качестве погрешности взята максимальная разница между модельными факторами и их средним значением.

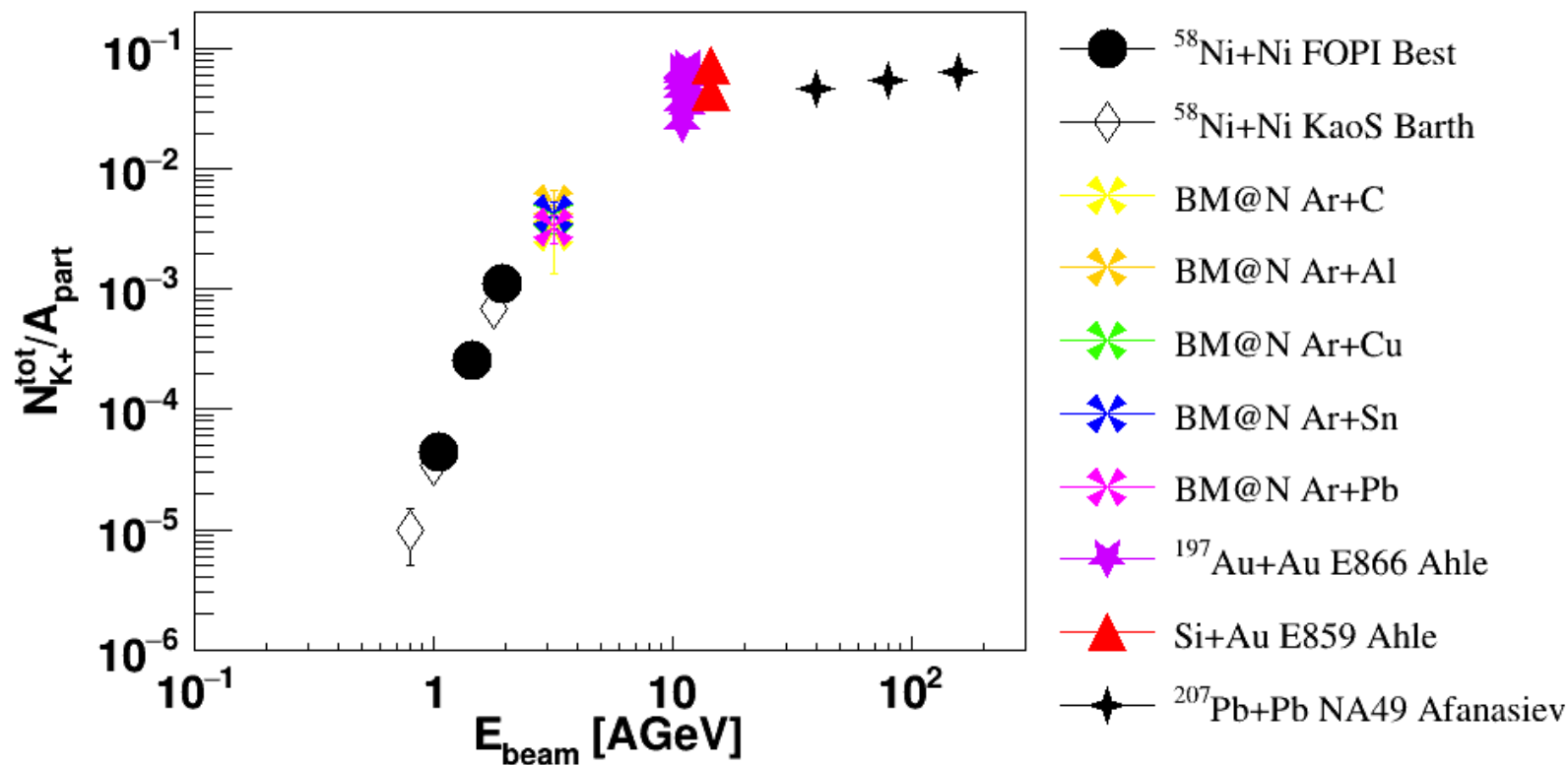
2) Число нуклонов-участников из предсказаний модели DCM-SMM.

$3.2 A_{GeV}$	<i>C</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Sn</i>	<i>Pb</i>
Фактор экстрап. для π^+	3.25 ± 0.18	3.73 ± 0.13	4.45 ± 0.07	5.12 ± 0.26	5.91 ± 0.55
Фактор экстрап. для K^+	2.81 ± 0.66	3.02 ± 0.67	3.34 ± 0.65	3.7 ± 0.58	4.1 ± 0.43
A_{part} , DCM-SMM	14.8	23.0	33.6	48.3	63.6



Результаты BM@N сравнены с мировыми измерениями. Чёрная кривая соответствует мировым данным по нуклон-нуклонным столкновениям. $N_{\pi}^{\text{tot}} = N_{\pi^+} + N_{\pi^-} + N_{\pi^0}$.

$$N_{K^+}^{\text{tot}}/A_{\text{part}}$$



Результаты BM@N сравнены с мировыми измерениями.

Сравнение обратных наклонов спектров по поперечному импульсу π^+ и K^+



Взаимод. ядра / Кинет. энергия пучка / Эксперимент	T_{eff} at $y^* = 0$ (HADES,FOPI,KaoS), $y^* \approx 0.5$ (π^+ , BM@N), y^* in meas. range (K^+ , BM@N)
Ar+KCl, 1.76 АГэВ, HADES	$82.4 \pm 0.1^{+9.1}_{-4.6}$ (π^+ , $A_{part} = 38.5$) $89 \pm 1 \pm 2$ (K^+ , $A_{part} = 38.5$)
Ni+Ni, 1.93 АГэВ, FOPI	110.9 ± 1.0 (K^+ , $A_{part} = 75$)
Ni+Ni, 1.93 АГэВ, KaoS	97 ± 7 (K^+ , $A_{part} \sim 5$) 107 ± 10 (K^+ , $A_{part} \sim 100$)
Ar+Cu, 3.2 АГэВ, BM@N	69 ± 1 (π^+ , $A_{part} = 33.6$) 74 ± 5 (K^+ , $A_{part} = 33.6$)
Ar+Sn, 3.2 АГэВ, BM@N	78 ± 1 (π^+ , $A_{part} = 48.3$) 78 ± 5 (K^+ , $A_{part} = 48.3$)

7. Заключение, положения и т.д.



1. Получены физические результаты по рождению π^+ -мезонов в кинематической области $0.1 < p_T < 0.6$ ГэВ/с, $1.5 < y < 3.2$ и K^+ -мезонов в кинематической области $0.1 < p_T < 0.5$ ГэВ/с, $1.0 < y < 2.0$. Указанные результаты основаны на измерениях, проведённых на ускорительном комплексе NICA/Нуклотрон в рамках эксперимента BM@N в аргон-ядерных взаимодействиях на твёрдых мишенях (C, Al, Cu, Sn, Pb) при кинетической энергии пучка 3.2 АГэВ. Представляемые результаты получены на данных сталкивающихся ядрах при энергиях Нуклотрона впервые
2. Были получены спектры по быстроте и поперечному импульсу, а также обратные наклоны спектров по поперечному импульсу указанных частиц
3. Определены множественности π^+ и K^+ -мезонов и их отношение в зависимости от числа нуклонов-участников ядро-ядерных столкновений
4. Обнаружено, что полученные результаты для Al и более тяжёлых мишеней хорошо согласуются с предсказаниями моделей DCM-SMM, UrQMD, PHSD и с результатами других экспериментов

5. Обнаружены отклонения от предсказания моделей в результатах измерений для углеродной мишени, а также для каонов
6. Сделан вывод о том, что полученные результаты указывают на необходимость внести изменения в существующие модели
7. Для выполнения поставленных задач впервые для эксперимента VM@N были созданы и отработаны методики калибровки различных детекторов и коррекций результатов измерений, в том числе были созданы методика идентификации заряженных частиц по времени пролёта и методики расчёта и применения в моделировании эффективности детекторов. Разработанные методы должны обеспечить более быструю и качественную обработку экспериментальных данных эксперимента VM@N

1. Спектры по продольной быстрой и поперечному импульсу положительно заряженных пионов в кинематической области $0.1 < p_T < 0.6$ ГэВ/с, $1.5 < y < 3.2$ и каонов в кинематической области $0.1 < p_T < 0.5$ ГэВ/с, $1.0 < y < 2.0$, рожденных во взаимодействиях пучка ионов аргона с кинетической энергией 3.2 АГэВ с ядрами твердых фиксированных мишеней из С, Al, Cu, Sn, Pb на основе данных, полученных в эксперименте BM@N
2. Параметры обратных наклонов в распределениях по поперечному импульсу для положительно заряженных пионов и каонов в столкновениях пучка ионов аргона с ядрами мишеней из С, Al, Cu, Sn и Pb при энергиях Нуклотрона
3. Множественности π^+ и K^+ -мезонов и их отношение в зависимости от числа нуклонов – участников ядро-ядерных столкновений
4. Алгоритмы идентификации заряженных частиц в эксперименте BM@N для выделения сигналов заряженных пионов и каонов, а также алгоритмы оценки эффективности детекторов для эксперимента BM@N и учёта указанной эффективности в моделировании полной реконструкции

Новизна

- ✓ Впервые получены экспериментальные результаты по рождению положительно заряженных пионов и каонов в столкновениях ионов аргона с ядрами мишеней из C, Al, Cu, Sn, Pb при энергиях Нуклотрона. Энергия пучка составляла 3.2 АГэВ. Среди полученных новых результатов спектры по продольной быстрой и поперечному импульсу, множественности, а также параметры обратных наклонов спектров по поперечному импульсу.

Научная и практическая значимость

- ✓ Физические результаты по рождению положительно заряженных пионов и каонов впервые получены при столкновениях пучка ионов аргона с ядрами мишеней из C, Al, Cu, Sn и Pb при энергиях Нуклотрона. В текущий момент в данной области энергий мало экспериментальных данных, что не позволяет построить достаточно точные модели столкновений тяжёлых ионов в области высокой барионной плотности и приводит к отклонению существующих моделей от новых экспериментальных данных. Полученные физические результаты позволят улучшить наше понимание столкновений тяжёлых ионов в указанной области энергий и построить более точные модели с более высокой предсказательной способностью.
- ✓ Получены первые физические результаты на установке BM@N, что демонстрирует готовность эксперимента для решения основных физических задач проекта BM@N.
- ✓ Разработанные методики, а также полученный опыт могут быть использованы в будущих сеансах эксперимента BM@N и ускорить процесс получения новых физических результатов.

1. DM. Kapishin, V. Plotnikov et al. «Production of Hyperons, Strange Mesons and Search for Hypernuclei in Interactions of Carbon, Argon and Krypton Beams in the BM@N Experiment». In: *Phys. Part. Nucl.* 52 (2021), pp. 710–719. — DOI: 10.1134/S1063779621040304.
2. K. Alishina, V. Plotnikov et al. «Charged Particle Identification by the Time-of-Flight Method in the BM@N Experiment». In: *Phys. Part. Nucl.* 53 (2022), pp. 470–475. — DOI: 10.1134/S106377962202006X.
3. S. Afanasiev, V. Plotnikov et al. (BM@N Collaboration) «Production of π^+ and K^+ mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 AGeV». In: *J. High Energ. Phys.* 2023, 7, 174. — DOI: 10.1007/JHEP07(2023)174. — URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.16243>.
4. V.A. Plotnikov, L.D. Kovachev, A.I. Zinchenko «Detector Efficiency in the BM@N Experiment in an Argon Run with a Beam Energy of 3.2 AGeV at Nuclotron». In: *Phys. Part. Nuclei Lett.* 20 (2023), pp. 1392–1402. — DOI: 10.1134/S1547477123060286.

1. A. Galavanov, V. Plotnikov et al. «Performance of the BM@N GEM/CSC tracking system at the Nuclotron beam». In: **EPJ Web Conf.** (XXIV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics” (Baldin ISHEPP XXIV)) 204 (2019) 07009. —DOI: 10.1051/epjconf/201920407009.
2. A. Galavanov, V. Plotnikov et al. «Status of the GEM/CSC tracking system of the BM@N experiment». In: **JINST** (The International Conference Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR2020)) 15 (2020) C09038. — DOI: 10.1088/17480221/15/09/C09038.
3. A. Galavanov, V. Plotnikov et al. «Study of the BM@N GEM/CSC tracking system performance». In: **AIP Conf. Proc.** 2163 (2019) 030003. — DOI: 10.1063/1.5130089.

Апробация работы



- ✓ 73-ья международная конференция по ядерной физике «ЯДРО-2023: Фундаментальные вопросы и приложения», Саров, Россия, октябрь 2023
- ✓ Семинар «XXV International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems» (Baldin ISHEPP XXV), Dubna, Russia, сентябрь 2023
- ✓ XV-ая Международная школа-конференция «The Actual Problems of Microworld Physics», Минск, Беларусь, сентябрь 2023 год
- ✓ 69-ая международная конференция по ядерной физике «Nucleus-2019. Fundamental Problems of Nuclear Physics, Nuclei at Borders of Nucleon Stability, High Technologies», Дубна, Россия, июль 2019
- ✓ Семинар «Workshop on physics performance studies at NICA (NICA2022)», МИФИ, Москва, Россия, декабрь 2022
- ✓ Семинар «Trigger efficiency, luminosity and fluxes in argon run», ЛФВЭ, ОИЯИ, февраль 2023
- ✓ Семинар «Секция методики, детекторов и прикладной физики», ЛФВЭ, ОИЯИ, июнь 2023
- ✓ Школа «The 2019 European School of High Energy Physics, CERN, JINR», Санкт-Петербург, Россия
- ✓ Все коллаборационные совещания эксперимента BM@N, проводившиеся каждые полгода с 2018 по 2022 годы

Благодарность



Хотел бы выразить свою признательность участникам коллаборации BM@N и сотрудникам лаборатории ЛФВЭ, благодаря которым эта работа смогла состояться.

Я благодарен моему научному руководителю доктору ф.-м. наук **М. Н. Капешину**, проделавшему огромный труд, участвовавшему во всех этапах работы от организации эксперимента до анализа данных.

Признателен докторам ф.-м. наук **М. В. Завертяеву** и **А. В. Ставинскому**, участвовавшим в обсуждении анализа данных, уделившим своё время диссертации и давшим по ней ценные замечания.

Со стороны лаборатории ЛФВЭ труд по составлению рецензии на работу взял доктор ф.-м. наук **Б. В. Батюня**. Хотел бы поблагодарить его за внимательное прочтение работы и полезные комментарии, основанные на большом опыте в релятивистской ядерной физике, которыми он поделился.

Хотел бы сказать большое спасибо оппонентам докторам ф.-м. наук **С. П. Баранову** и **В. В. Куликову** за их кропотливый труд по прочтению и оценке диссертационной работы.

Очень благодарен **Л. Д. Ковачеву** за то, что разделил со мной многие этапы анализа и воспроизвёл их для времяпролётной системы ToF-700. Благодаря этому удалось проверить и подтвердить результаты, полученные мною с использованием детектора ToF-400.

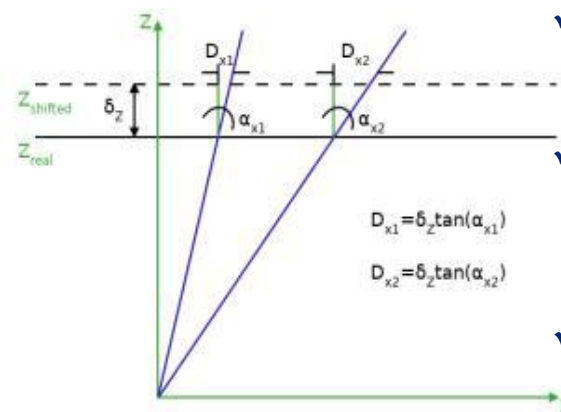
Более подробно об участии уважаемых коллег, как упомянутых здесь, так и не упомянутых здесь, и моей признательности им попытался сказать в главе “Благодарности” диссертации.

Спасибо за внимание!

Дополнительные материалы



Выравнивание CSC и ToF-400

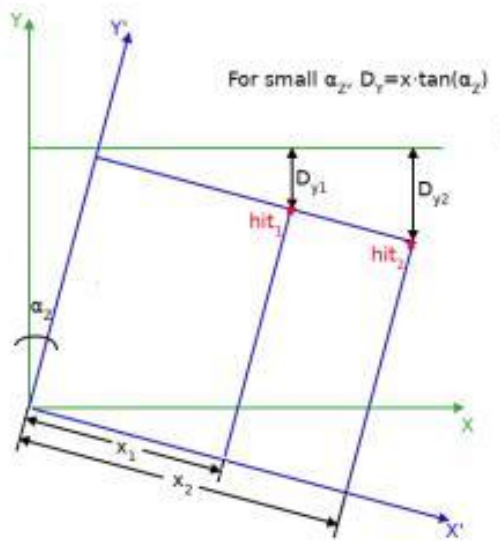
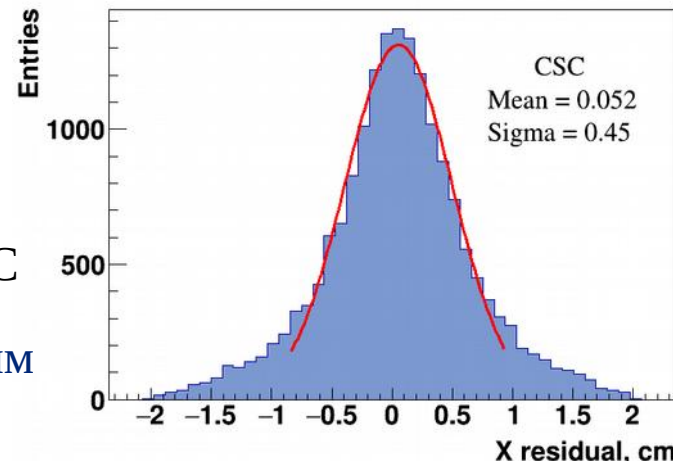


✓ Выравнивание по dz
 $dx = dz \cdot T_x, [см]$

✓ Выравнивание по dx и dy

Результаты выравнивания CSC

✓ $\sigma_{dz} \approx 4 \text{ мм}, \sigma_{dx} < 2 \text{ мм}, \sigma_{dy} < 2 \text{ мм}$



✓ Выравнивание ToF-400 по dx, dy, dz

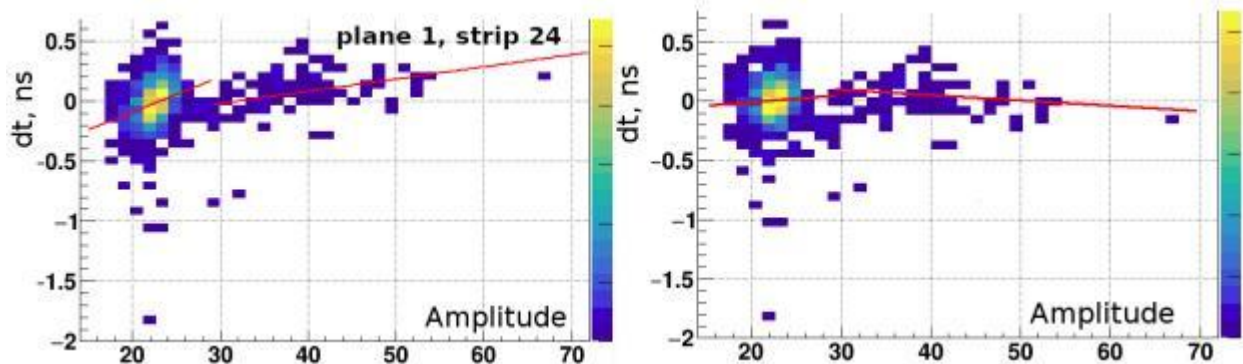
✓ Вращение mRPC1 вокруг Z $dy = x \cdot \tan(\alpha_z)$

Результаты выравнивания ToF-400

✓ $\sigma_{dz} < 1 \text{ см}, \sigma_{dx} < 2 \text{ мм}, \sigma_{dy} < 2 \text{ мм}, \sigma_{zrot} < 10 \text{ мрад}$

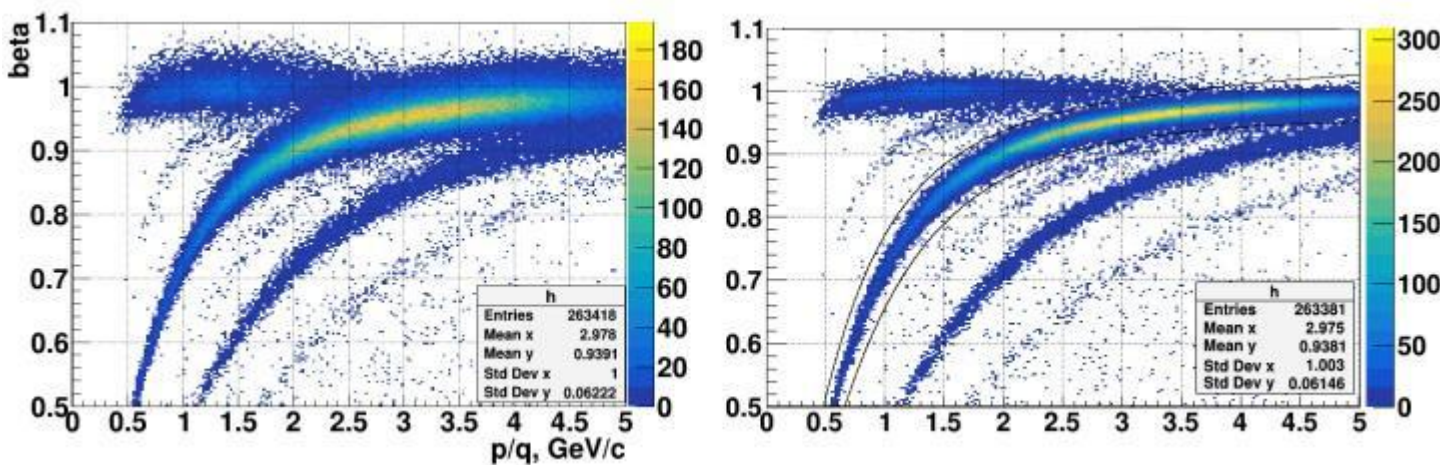
Коррекции времени (INL и slewing)

Коррекции на зависимость времени от амплитуды (slewing)



✓ Левый рисунок – до коррекций, правый рисунок - после

Результаты коррекций

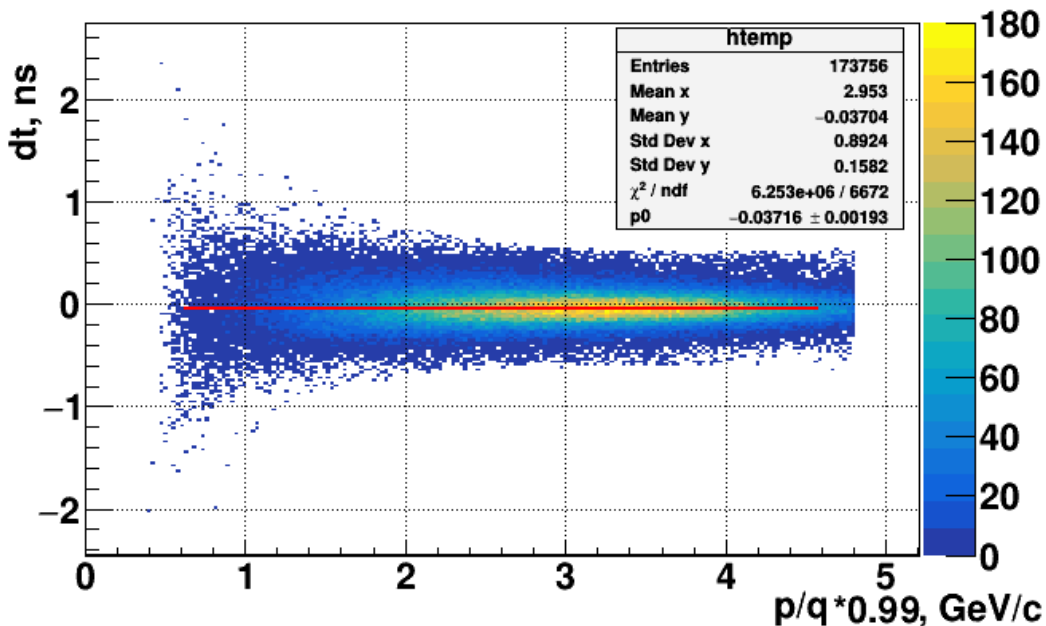


✓ Протонная полоса выделена чёрными линиями

✓ σ_{dt} уменьшилось с 320 пс до 120 пс

✓ INL – коррекции на интегральную нелинейность

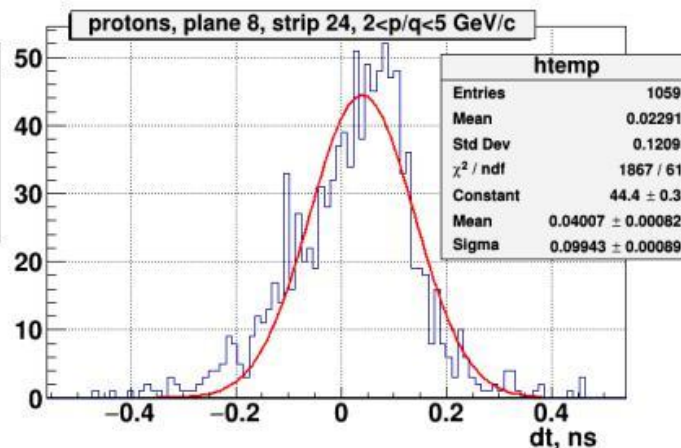
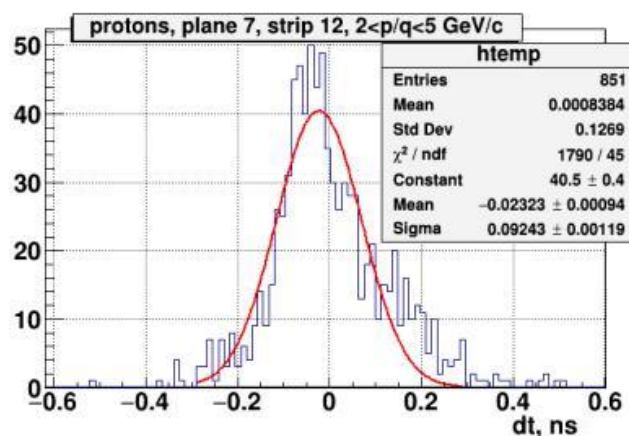
Коррекции времени (пик m_p)



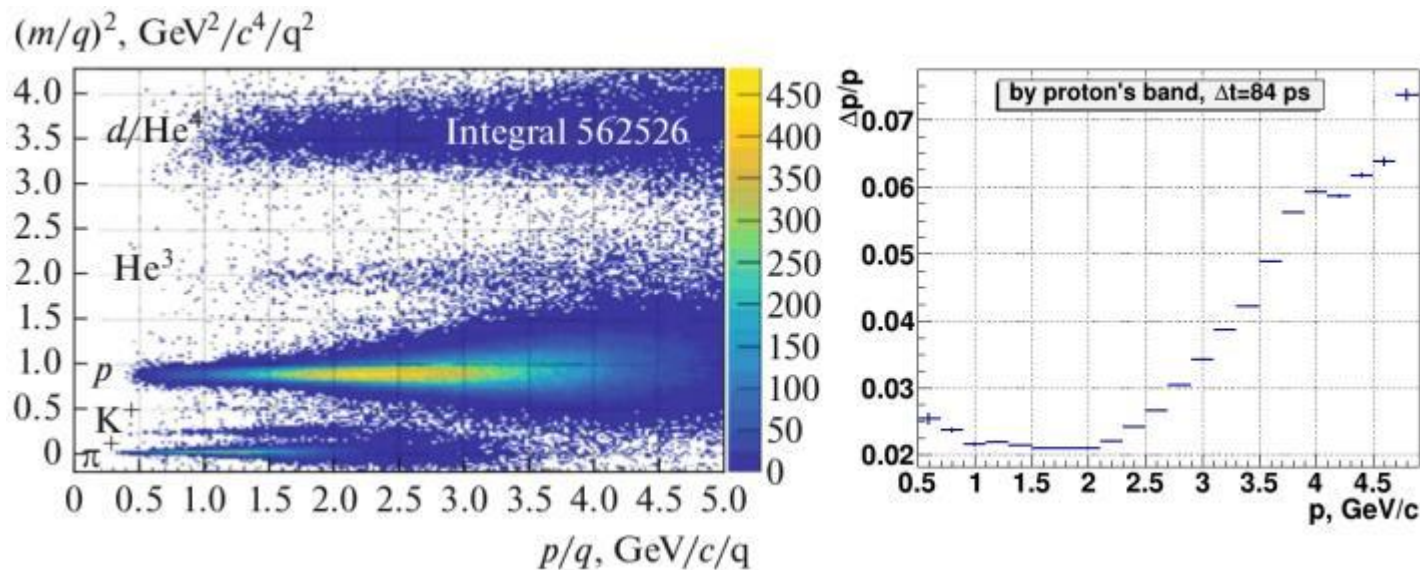
$$dt = t - t(0.94, p, L),$$

t – время пролёта, $t(0.94, p, L)$ – с использованием формулы (1) для протонной полосы

- ✓ $p \rightarrow 0.99p$ для коррекции зависимости dt от p



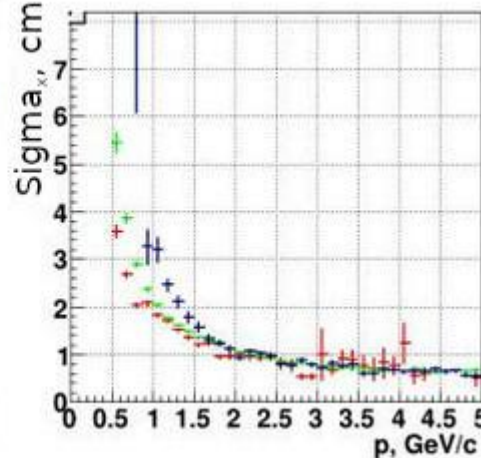
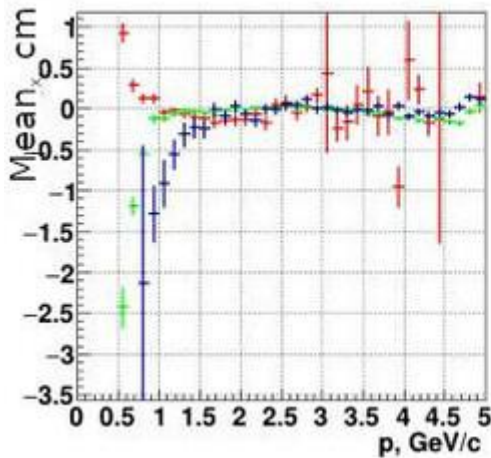
- ✓ Для каждого стрипа mRPC (~300 стрипов)
- ✓ $p > 2$ ГэВ/с
- ✓ σ_{dt} уменьшилось с 120 пс до 84 пс



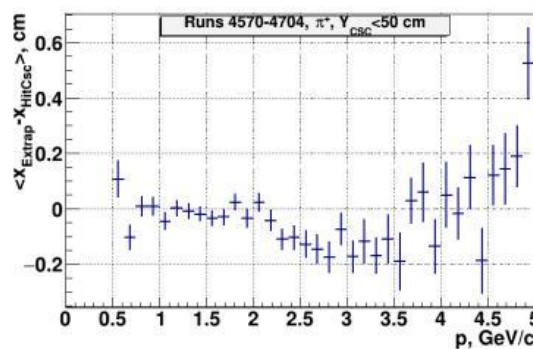
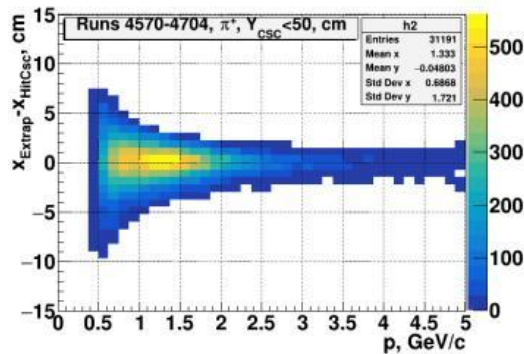
$$\frac{dm^2}{m^2} = \sqrt{\left(\frac{2dp}{p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^2}\right)^2 \left(\frac{dt}{t}\right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^2}\right)^2 \left(\frac{dL}{L}\right)^2}$$

- ✓ $dt/t < 0.5\%$, $dL/L < 0.12\%$
- ✓ При малых p dm^2 определяется dp
- ✓ При больших p dm^2 определяется dt из-за лоренц-фактора

Зависимость невязок в CSC от p

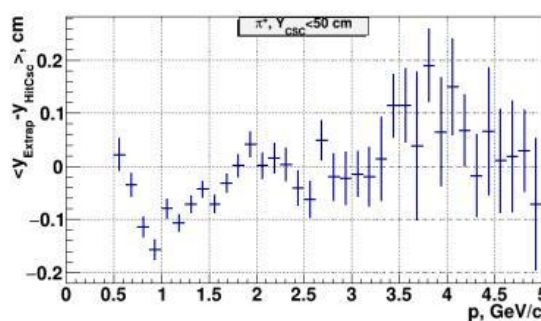
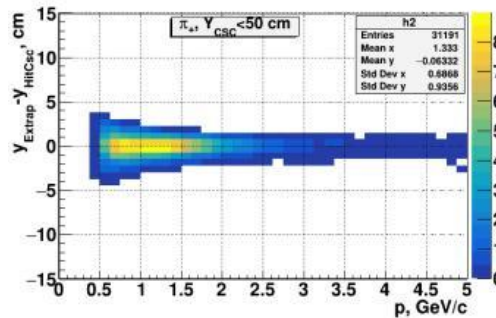


- До коррекций
- ✓ π^+ Отклонение возрастает с уменьшением p
- ✓ p Отклонение зависит от типа частиц
- ✓ d Отклонение из-за потерь энергии, многократного рассеяния и погрешностей измерения магнитного поля



После π^+ -коррекции

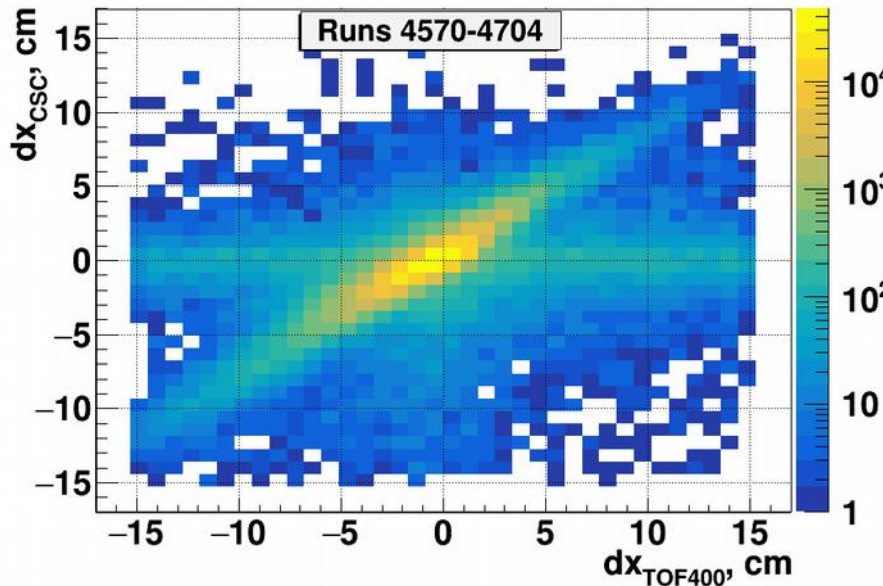
- ✓ Скорректированы координаты X и Y точки экстраполяции
- ✓ Окно сопоставления по X и Y $2.5\sigma_{\pi^+}(p)$



Зависимость невязок в ТоF-400 от p

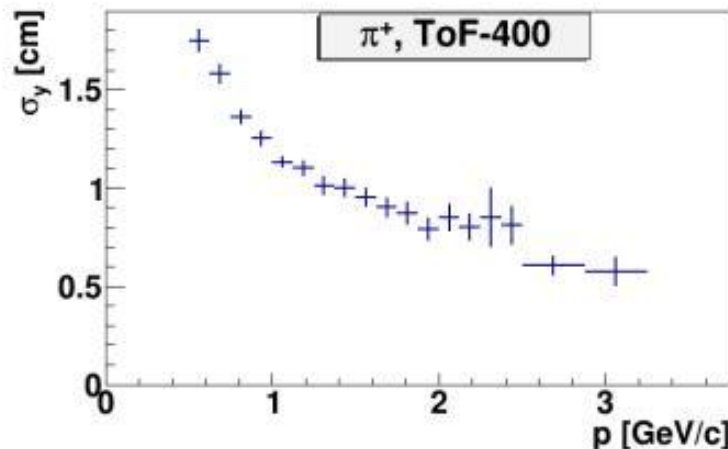
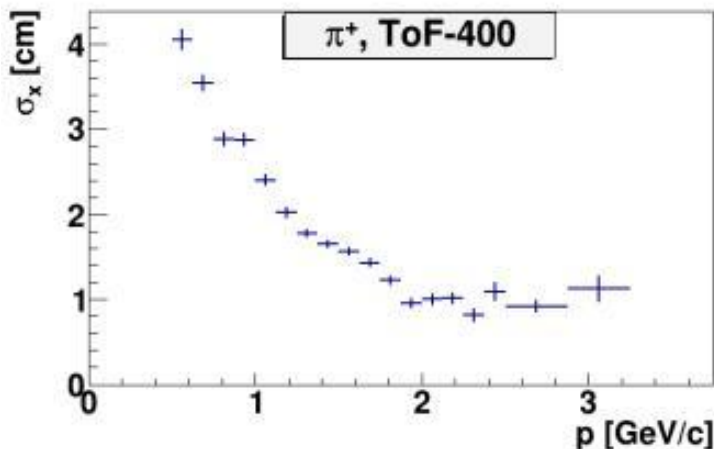


Невязки в ТоF-400 коррелируют с невязками в CSC

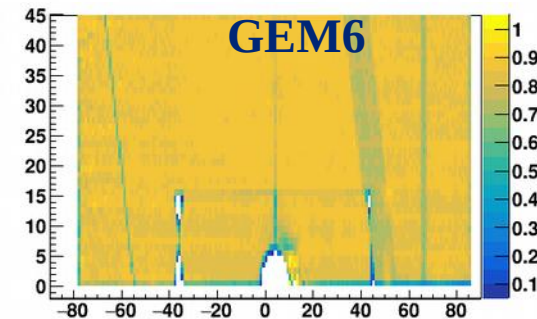
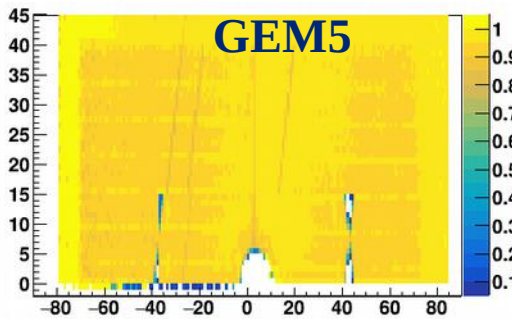
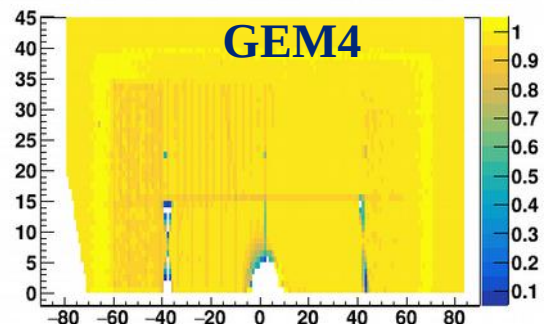
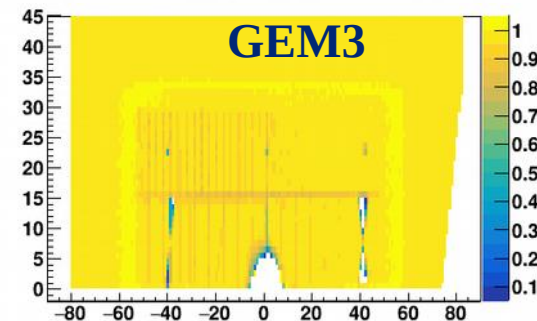
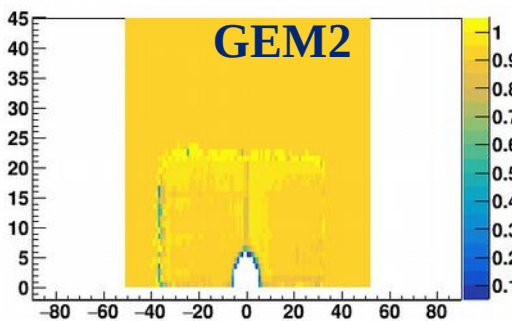
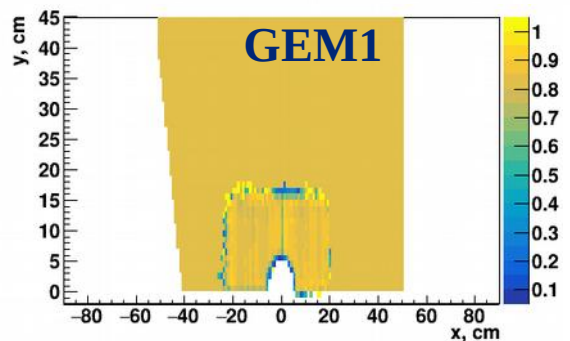
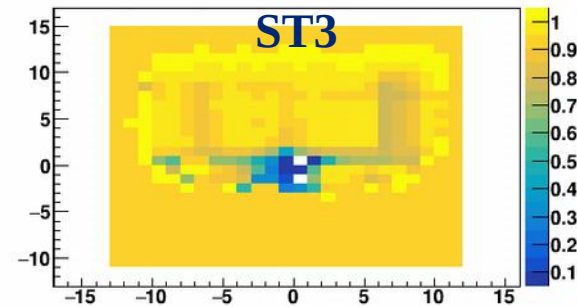
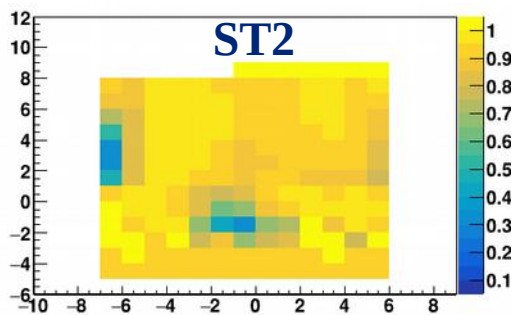
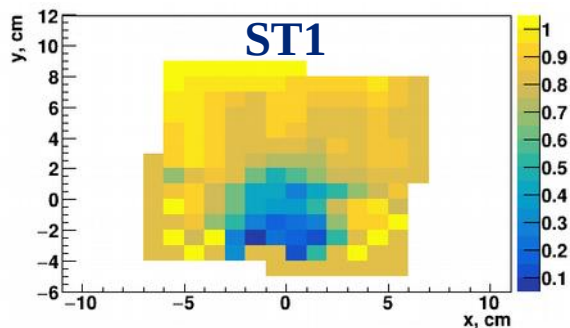


После π^+ -коррекции

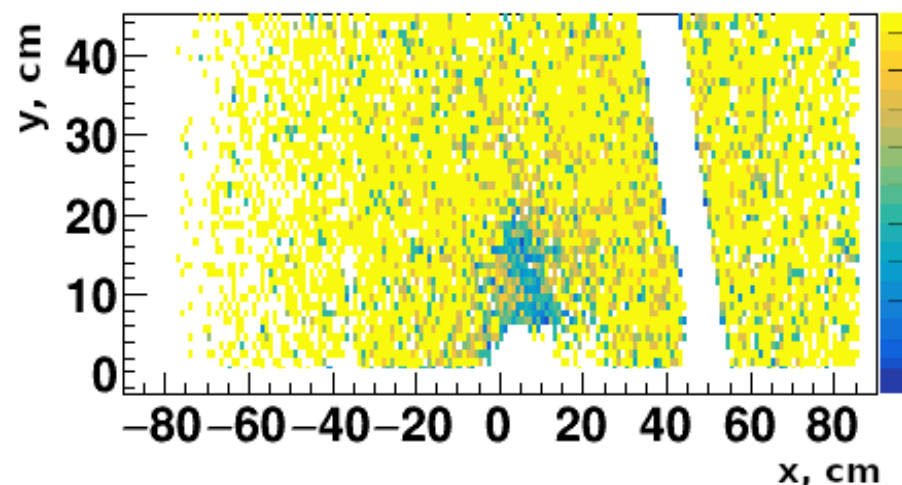
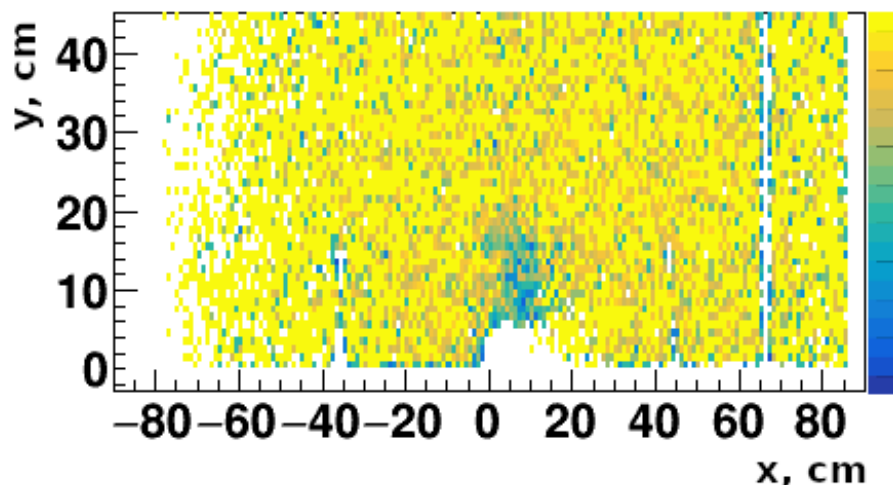
- ✓ Координаты X и Y точки экстраполяции скорректированы с точностью лучше 3 мм
- ✓ Окно сопоставления по X и Y $2.5\sigma_{\pi^+}(p)$.
Отличие в каждом p-слайсе каждой mRPC < 5 мм



Эффективность ST/GEM



$$Eff_{SToutBeam} = 80\%, Eff_{GEM1,6} = 80\%, Eff_{GEM2-5} = 90\%$$



- ✓ Иллюстрация нарушения и восстановление работы блоков стрипов в двух различных ранах для GEM6

Кратковременные высоковольтные наводки из-за нестабильности вывода интенсивности пучка приводили к уменьшению эффективности работы детекторов GEM.

✓ Ячейки 4.5x4.5 см²

Отбор треков

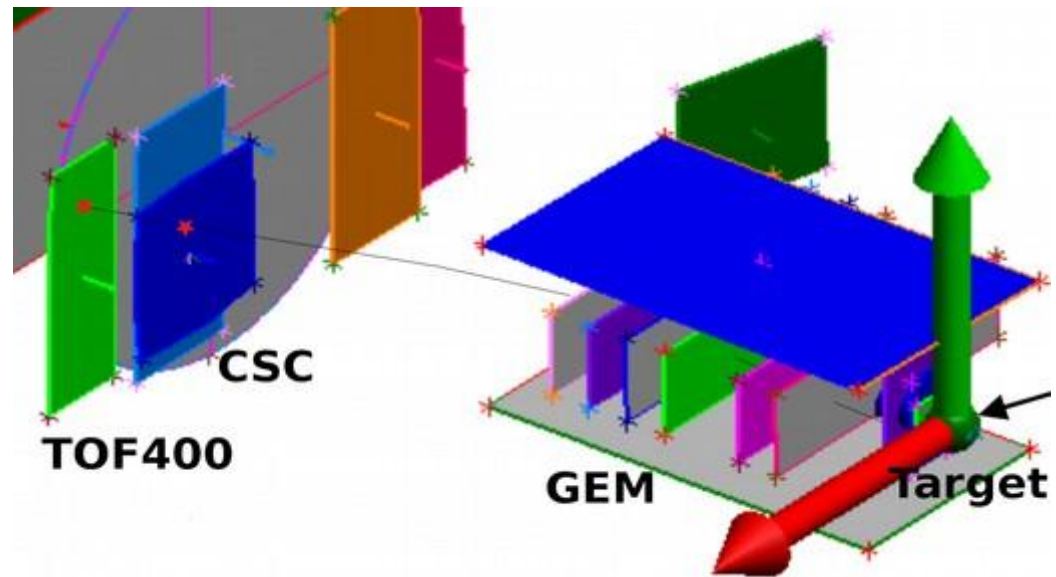
✓ Треки из PV

✓ Более 3 хитов GEM (из 6 детекторов)

✓ Более 4 хитов ST+GEM (из 9 детекторов)

✓ Импульс трека $p > 1$ ГэВ/с

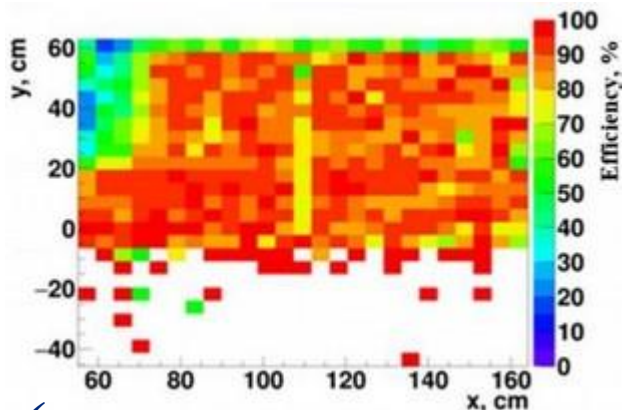
✓ Трек имеет хит в ToF-400



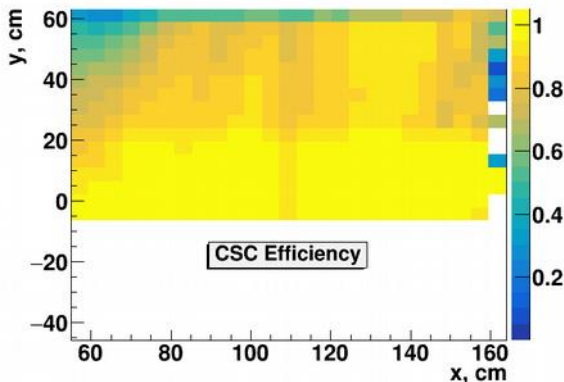
✓ Два глобальных счётчика: **знаменатель** и **числитель**

✓ Невязки $\text{Track}_{\text{ST/GEM}} - \text{Hit}_{\text{CSC}} < 2.5\sigma(p)$

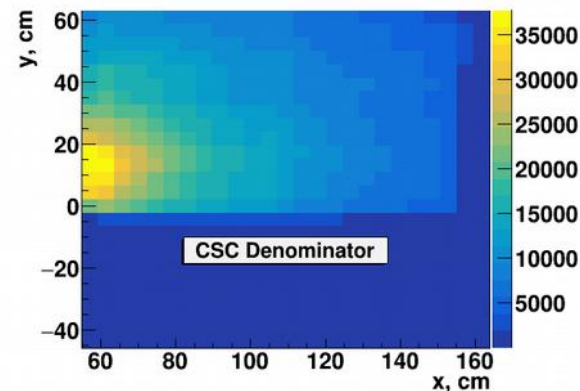
Эффективность CSC



✓ Несколько ранов с неработающей front-end электроникой в верхнем левом углу



✓ Все Ar раны с $Eff_{ColdCSC} > 50\%$



✓ Глобальный знаменатель для CSC

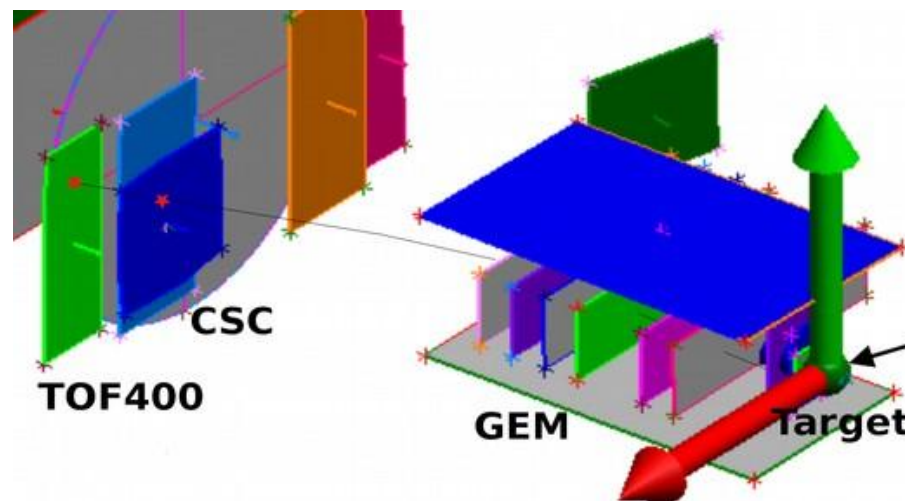
✓ Eff_{CSC} только для $y > -5$ см (из-за GEM)

✓ Механическая поддержка около $x = 110$ см

✓ Более низкая Eff_{CSC} в левой части, которая ближе к пучку

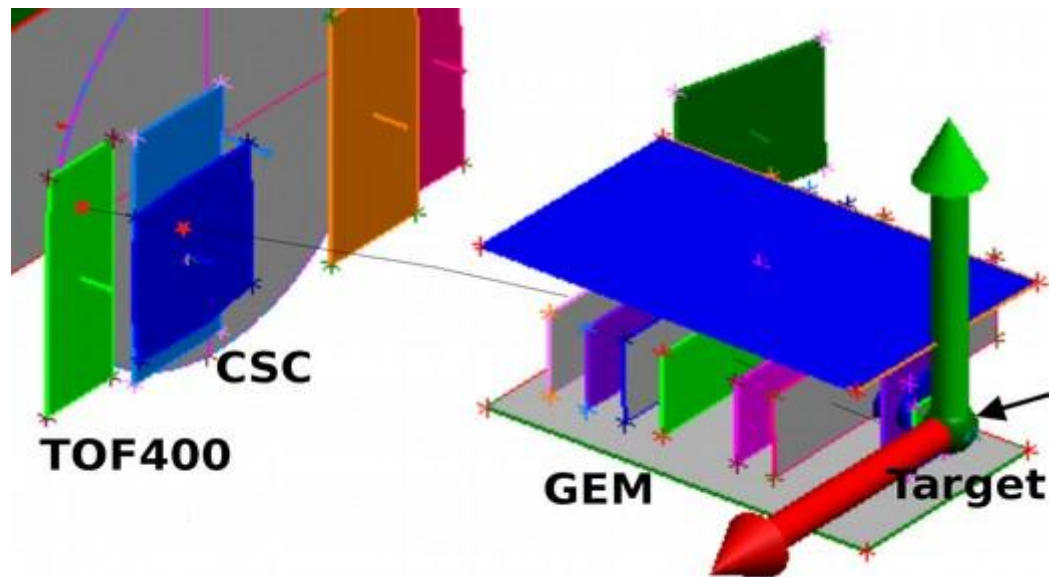
✓ $Eff_{HotCSC} > 90\%$

✓ $75 < Eff_{ColdCSC} < 80\%$



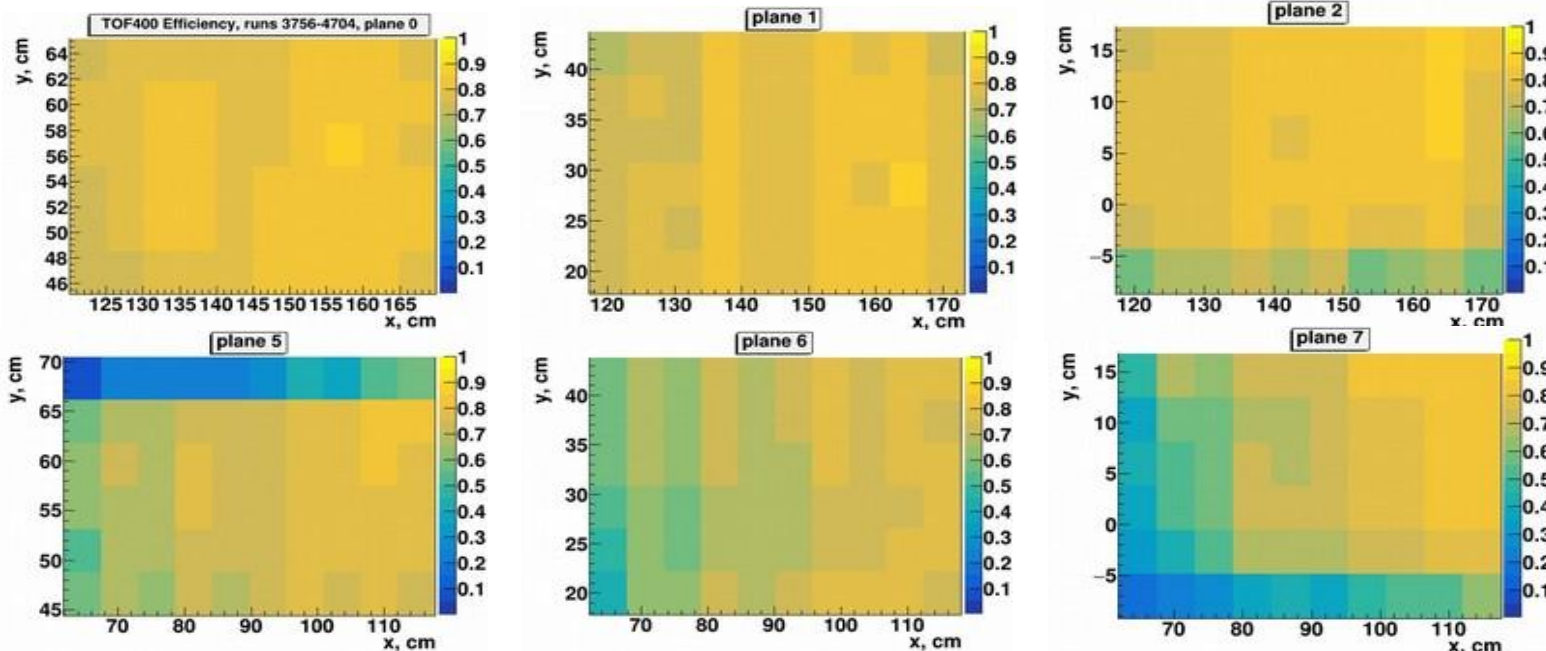
Эффективность ТоF-400

- ✓ Ячейки $6 \times 5 \text{ см}^2$
- Отбор треков
- ✓ Треки из PV
- ✓ Более 3 хитов GEM (из 6 детекторов)
- ✓ Более 4 хитов ST+GEM (из 9 детекторов)
- ✓ Импульс трека $p > 1 \text{ ГэВ/с}$
- ✓ Трек имеет хит в CSC



- ✓ Два глобальных счётчика: **знаменатель** и **числитель**
- ✓ Невязки $\text{Track}_{\text{ST/GEM}} - \text{Hit}_{\text{ToF-400}} < 2.5\sigma(p)$

Эффективность ТоF-400

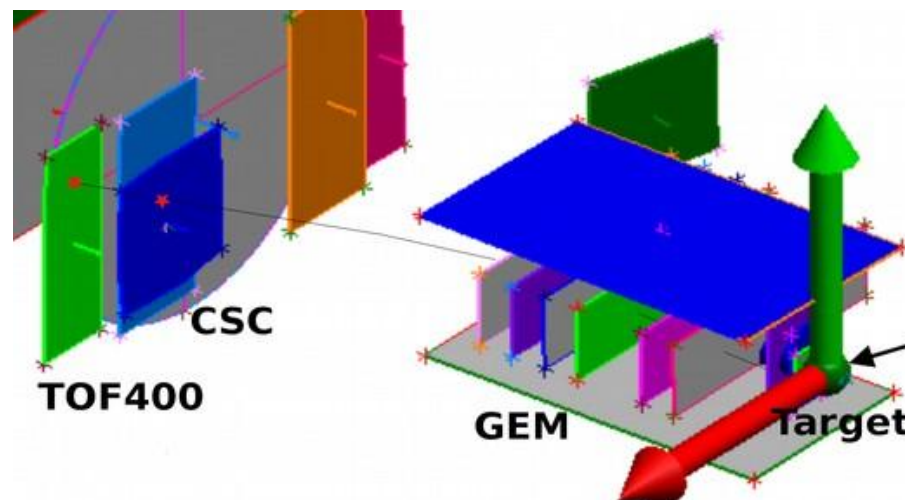


✓ $Eff_{\text{ToF-400}}$ только для $x > 0$ см, $y > -10$ см

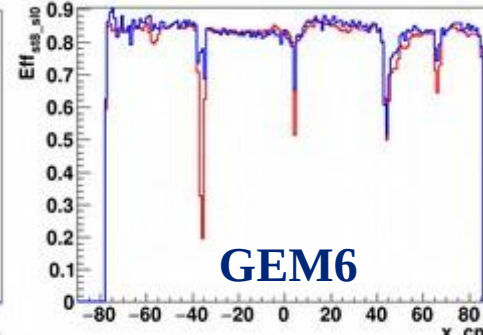
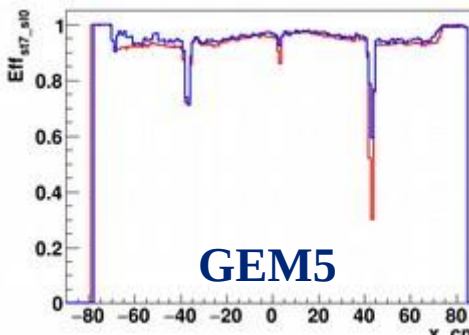
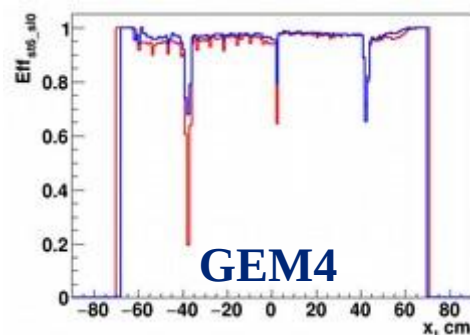
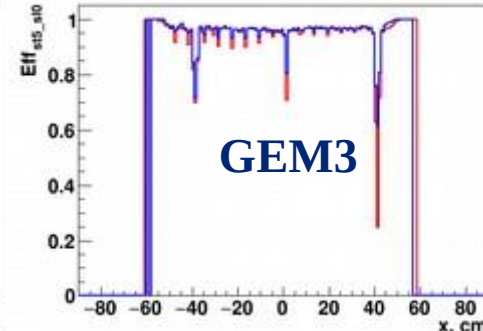
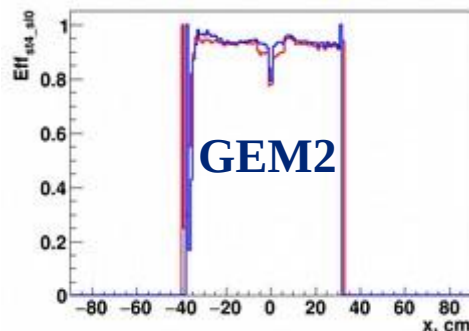
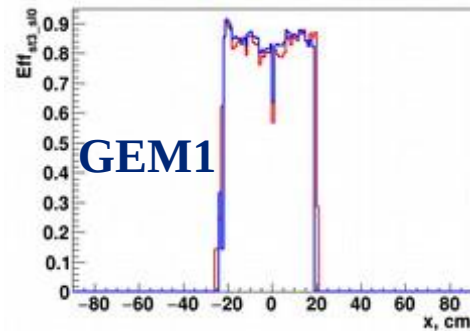
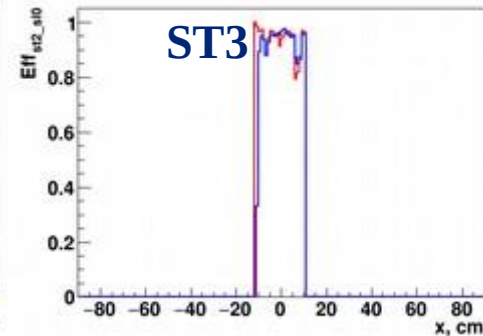
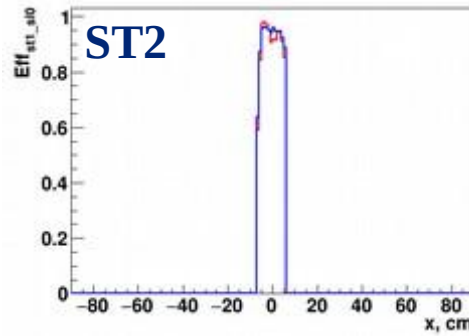
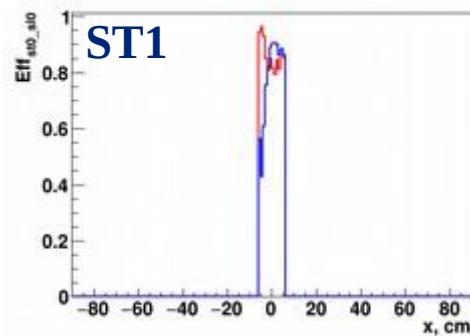
✓ Более низкая $Eff_{\text{ToF-400}}$ в mRPC, которые ближе к пучку

✓ $Eff_{\text{p10-2}} \sim 80\%$ (дальше от пучка)

✓ $Eff_{\text{p15-7}} \sim 50\%$ (около пучка)

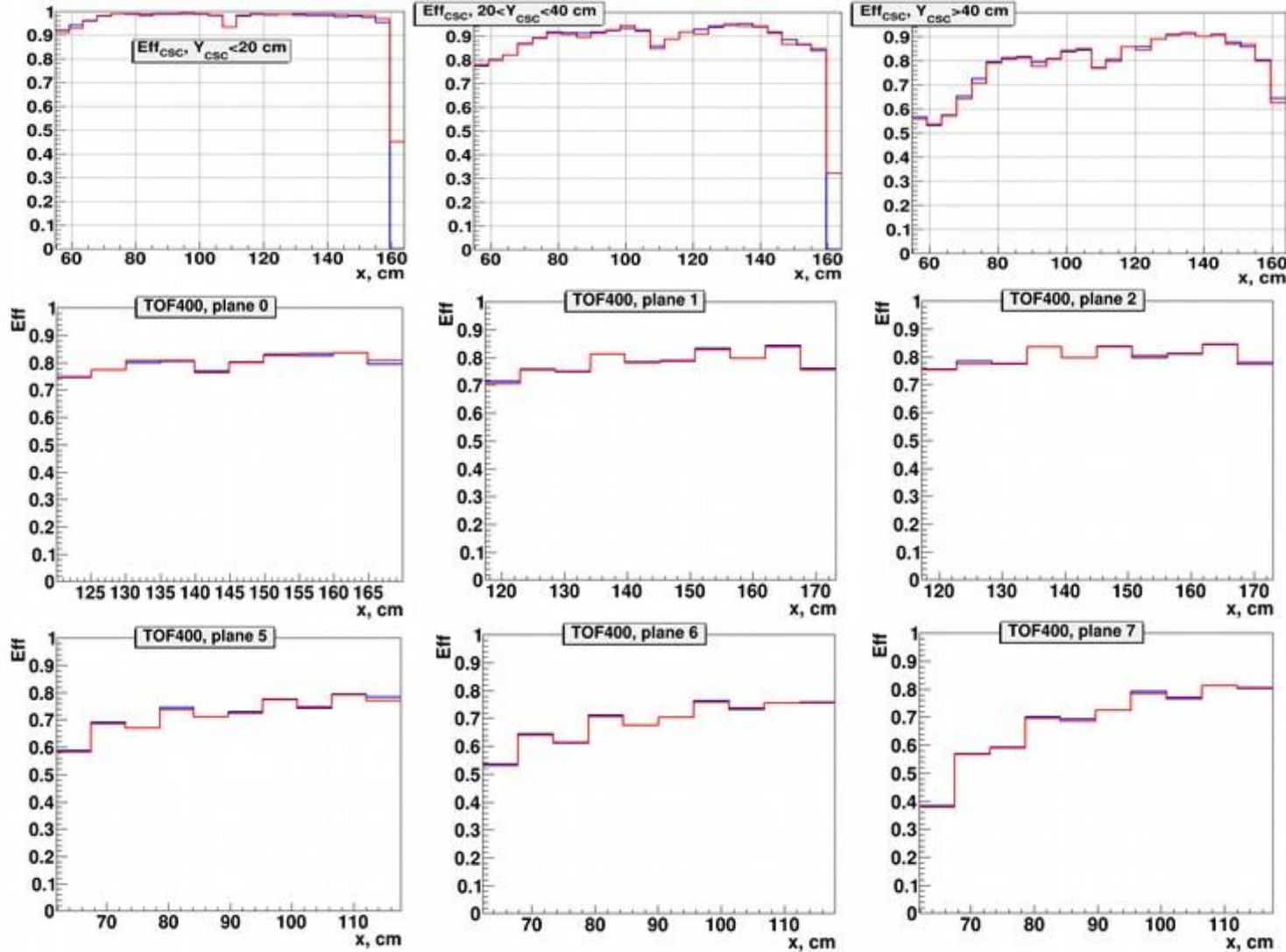


Сравнение эффективности в МК и данных



Систематическая неопределённость $\Delta \text{Eff}_{\text{ST/GEM}} = 3\%$

Сравнение эффективности в МК и данных



Систематические неопределённости $\Delta \text{Eff}_{CSC} = \Delta \text{Eff}_{\text{TOF-400}} = 5\%$

Trigger efficiency for BD



Mean BD trigger efficiency evaluated for events with reconstructed π^+/K^+ in interactions of the argon beam with the whole set of C, Al, Cu, Sn, Pb targets.

Trigger / Target π^+ mesons	C	Al	Cu	Sn	Pb
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{BD} \geq 2)$	0.80 ± 0.03	0.96 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.99 ± 0.01	0.99 ± 0.01
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{BD} \geq 3)$	0.66 ± 0.02	0.92 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.98 ± 0.01	0.99 ± 0.01
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{BD} \geq 4)$	0.48 ± 0.02	0.88 ± 0.01	0.95 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.98 ± 0.01

Trigger / Target K^+ mesons	C	Al	Cu	Sn	Pb
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{BD} \geq 2)$	0.67 ± 0.15	0.97 ± 0.02	0.98 ± 0.01	0.99 ± 0.01	0.99 ± 0.01
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{BD} \geq 3)$	0.67 ± 0.15	0.96 ± 0.02	0.97 ± 0.01	0.99 ± 0.01	0.99 ± 0.01
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{BD} \geq 4)$	0.67 ± 0.15	0.94 ± 0.02	0.95 ± 0.02	0.99 ± 0.01	0.98 ± 0.01

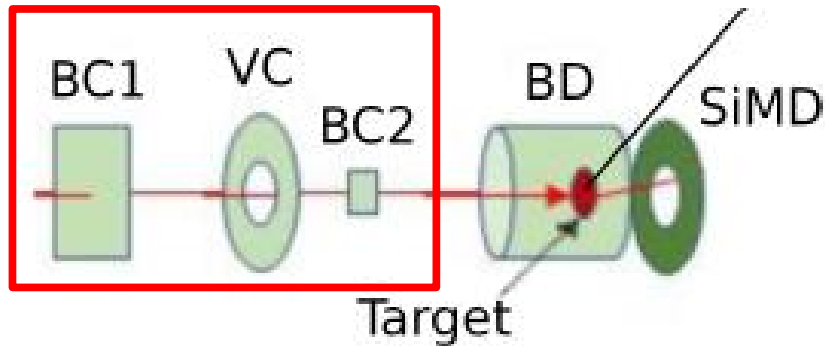
Trigger efficiency for SiMD



Mean SiMD trigger efficiency evaluated for events with reconstructed π^+ and K^+ in interactions of the argon beam with the whole set of C, Al, Cu, Sn, Pb targets.

Trigger / Target π^+ mesons	C	Al	Cu	Sn	Pb
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{SiMD} \geq 2)$	0.28 ± 0.01	0.40 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.65 ± 0.01	0.72 ± 0.01
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{SiMD} \geq 3)$	0.14 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.49 ± 0.01	0.58 ± 0.01
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{SiMD} \geq 4)$	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.34 ± 0.01	0.46 ± 0.01

Trigger / Target K^+ mesons	C	Al	Cu	Sn	Pb
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{SiMD} \geq 2)$	0.30 ± 0.06	0.40 ± 0.03	0.64 ± 0.03	0.74 ± 0.03	0.82 ± 0.03
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{SiMD} \geq 3)$	0.17 ± 0.04	0.23 ± 0.02	0.45 ± 0.03	0.61 ± 0.03	0.73 ± 0.03
$\epsilon_{\text{trig}} (\text{SiMD} \geq 4)$	0.08 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.35 ± 0.03	0.44 ± 0.03	0.58 ± 0.03



$$L = N_b \cdot N_A \cdot \rho \cdot l / A \cdot \text{corr} = N_b \cdot \text{coeff}$$

- ✓ N_b – integrated ion flux through the target
- ✓ N_A – Avogadro number
- ✓ $\rho \cdot l$ – target thickness (g/cm^2)
- ✓ A – target atomic weight
- ✓ $\text{corr} = 0.865 \pm 0.02$ – correction (see below)
- ✓ coeff – transformation coefficient

- ✓ To count the beam flux (N_b) we use BT

$$\text{BT} = \text{BC1} \wedge \text{VC} \wedge \text{BC2}$$

- ✓ Beam halo, pile-up suppression within the readout time window, number of signals in the start detector: $\text{BC1}=1$, number of signals in the beam counter: $\text{BC2}=1$, number of signals in the veto counter around the beam: $\text{VC}=0$;
- ✓ Beam flux for active (not busy) time of DAQ was integrated spill by spill for each target (C, Al, Cu, Sn, Pb)

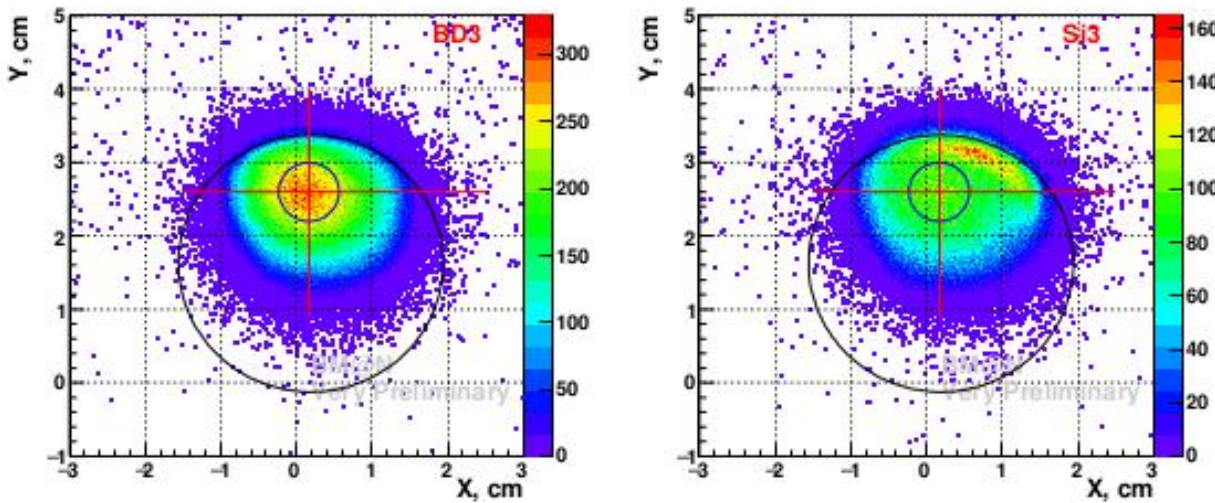


Fig.5 (lumi.pdf). Run-7, X-Y of the primary vertices for different trigger conditions. Left: $BD \geq 3$, Right, $SiMD \geq 3$.

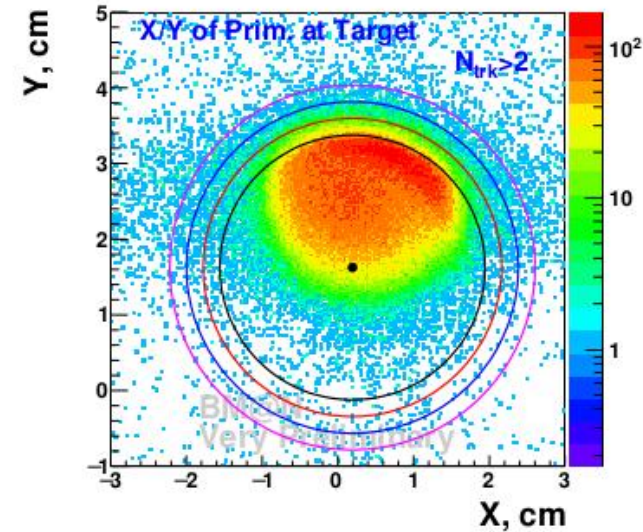


Fig.6 (lumi.pdf). Run-7, X-Y of the primary vertices within 3- σ limits around the target.

- ✓ 13.5% of the beam is missed the target by the edge of the target due to shifted beam position.
- ✓ The systematic uncertainty for this measurement do not exceed 2%.
- ✓ The events collected with the Si-trigger near the upper edge of the target were recorded with higher efficiency relative the rest of the beam spot.

Impact parameters



Mean impact parameters of min. bias $Ar+C$, $Ar+Al$, $Ar+Cu$, $Ar+Sn$, $Ar+Pb$ interactions with π^+ .

MC	b , fm ($Ar+C$)	b , fm ($Ar+Al$)	b , fm ($Ar+Cu$)	b , fm ($Ar+Sn$)	b , fm ($Ar+Pb$)
Events with gen. π^+	4.18	4.79	5.59	6.29	7.04
Events with gen. π^+ in the measured range of BM@N	3.75	4.29	5.03	5.70	6.43
Events with rec. π^+	3.51	3.91	4.61	5.29	6.13

Mean impact parameters of min. bias $Ar+C$, $Ar+Al$, $Ar+Cu$, $Ar+Sn$, $Ar+Pb$ interactions with K^+ .

MC	b , fm ($Ar+C$)	b , fm ($Ar+Al$)	b , fm ($Ar+Cu$)	b , fm ($Ar+Sn$)	b , fm ($Ar+Pb$)
Events with gen. K^+	3.24	3.50	3.98	4.50	5.12
Events with gen. K^+ in the measured range of BM@N	3.17	3.42	3.90	4.44	5.13
Events with rec. K^+	3.25	3.55	4.13	4.72	5.46

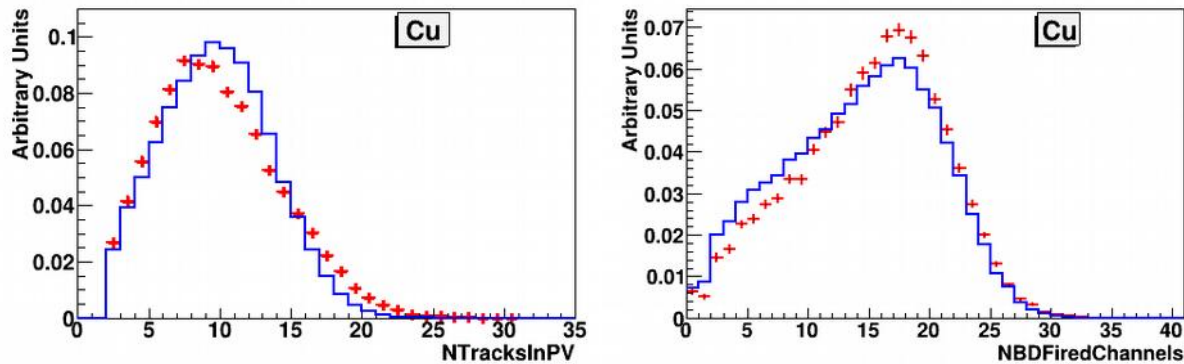
π^+ and K^+ meson multiplicities



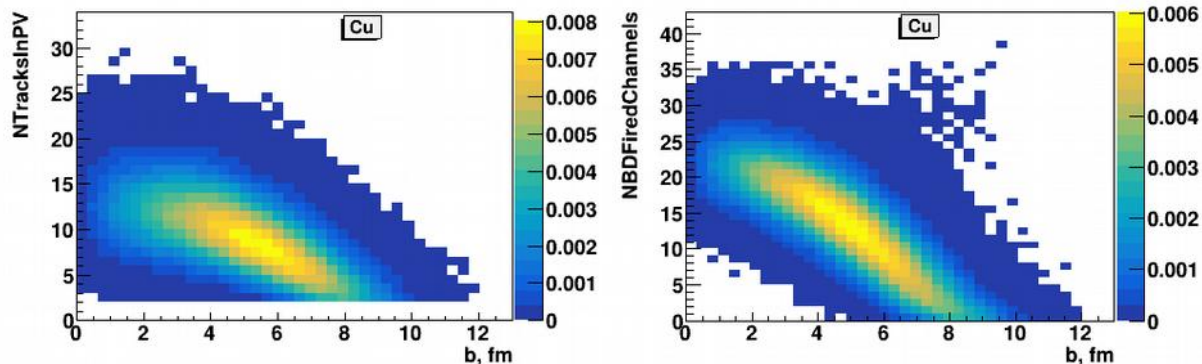
π^+ and K^+ meson multiplicities measured in Ar+C, Al, Cu, Sn, Pb interactions at the argon beam energy of 3.2 AGeV. The first error given is statistical, the second error is systematic. The third error given for the full π^+ and K^+ multiplicities is the model uncertainty.

3.2 AGeV Ar beam	C	Al	Cu	Sn	Pb
Measured π^+ multiplicity N_{π^+}	$0.42 \pm 0.008 \pm 0.045$	$1.00 \pm 0.01 \pm 0.07$	$1.14 \pm 0.01 \pm 0.08$	$1.28 \pm 0.01 \pm 0.09$	$1.25 \pm 0.01 \pm 0.08$
Measured K^+ multiplicity $N_{K^+}/10^{-2}$	$1.59 \pm 0.29 \pm 0.65$	$3.90 \pm 0.28 \pm 0.61$	$4.17 \pm 0.21 \pm 0.66$	$5.60 \pm 0.22 \pm 0.75$	$5.10 \pm 0.22 \pm 0.92$
Full π^+ multiplicity $N_{\pi^+}^{\text{tot}}$	$1.365 \pm 0.026 \pm 0.146 \pm 0.08$	$3.73 \pm 0.04 \pm 0.26 \pm 0.13$	$5.07 \pm 0.04 \pm 0.36 \pm 0.08$	$6.55 \pm 0.05 \pm 0.46 \pm 0.33$	$7.39 \pm 0.06 \pm 0.47 \pm 0.69$
Full K^+ multiplicity $N_{K^+}^{\text{tot}}/10^{-2}$	$4.47 \pm 0.81 \pm 1.83 \pm 1.05$	$11.8 \pm 0.9 \pm 1.8 \pm 2.6$	$13.9 \pm 0.7 \pm 2.2 \pm 2.7$	$20.7 \pm 0.8 \pm 2.8 \pm 3.3$	$20.9 \pm 0.9 \pm 3.8 \pm 2.2$
$N_{K^+}/N_{\pi^+}/10^{-2}$ Measured range	$3.79 \pm 0.69 \pm 1.52$	$3.90 \pm 0.28 \pm 0.55$	$3.66 \pm 0.19 \pm 0.53$	$4.39 \pm 0.18 \pm 0.51$	$4.11 \pm 0.18 \pm 0.68$
$N_{K^+}^{\text{tot}}/N_{\pi^+}^{\text{tot}}/10^{-2}$, Full kin. range	$3.27 \pm 0.6 \pm 1.38 \pm 0.79$	$3.16 \pm 0.23 \pm 0.54 \pm 0.71$	$2.75 \pm 0.14 \pm 0.48 \pm 0.54$	$3.16 \pm 0.13 \pm 0.48 \pm 0.52$	$2.83 \pm 0.12 \pm 0.54 \pm 0.39$
K^+ inverse slope T_0 , MeV measured range	$67 \pm 12 \pm 12$	$80 \pm 7 \pm 5$	$81 \pm 5 \pm 5$	$81 \pm 5 \pm 4$	$78 \pm 5 \pm 4$

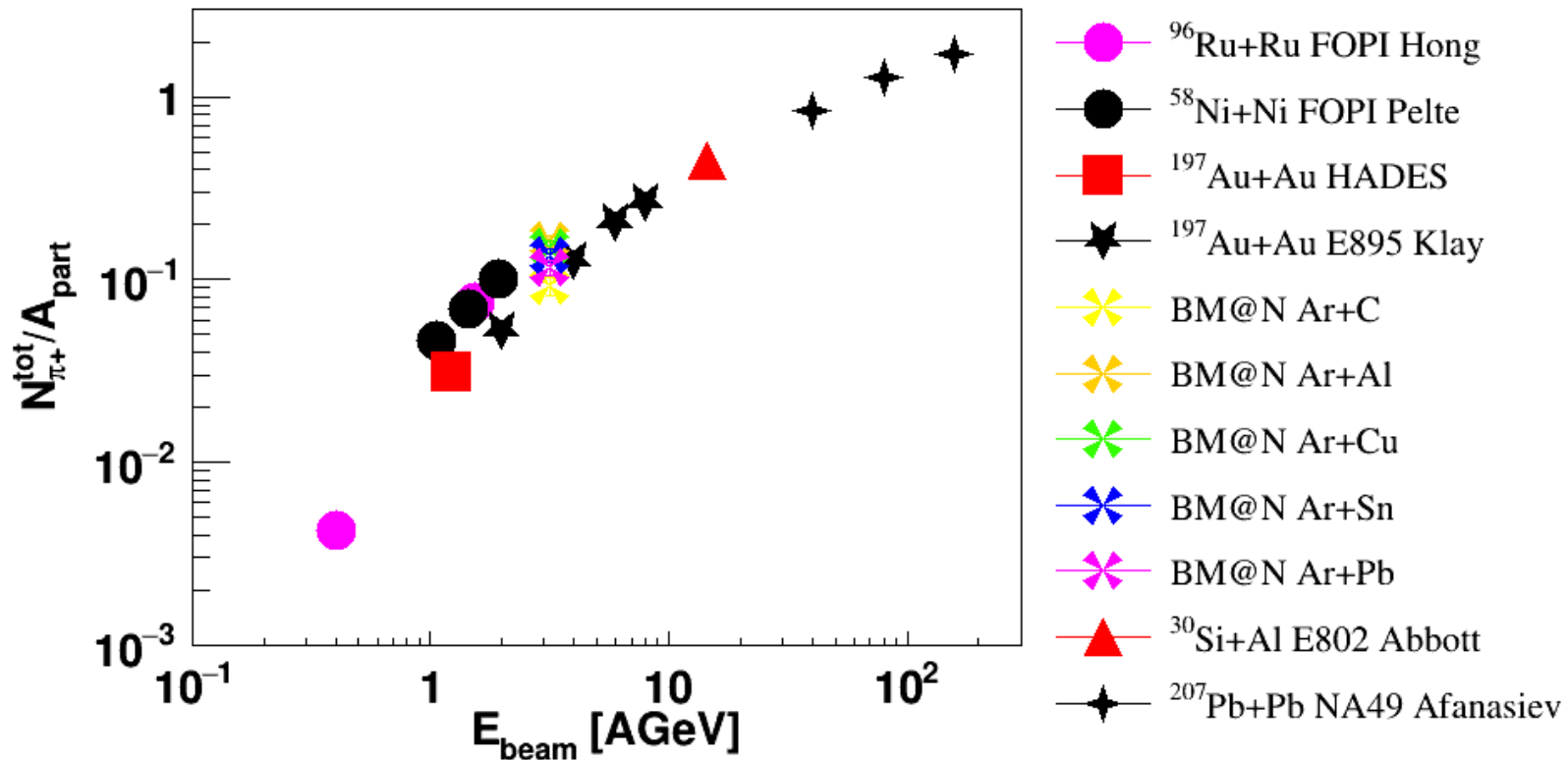
Comparison of experimental data and MC



Comparison of the experimental distributions (red crosses) and reconstructed Monte Carlo GEANT distributions of events generated with the DCM-SMM model (blue lines): number of tracks reconstructed in the primary vertex (left); number of fired BD channels (right).



Correlation obtained from the DCM-SMM model of the number of tracks in the primary vertex (left) and the number of fired channels in the BD (right) with impact parameter.



π^+ multiplicity per the mean number of nucleons-participants A_{part} shown as a function of the beam kinetic energy E_{beam} . The BM@N results are compared with the world measurements.

The π^+ and K^+ yields and inverse slopes



Yields of K^+ , π^+ production and effective inverse slopes of invariant m_T spectra measured in interactions of light and medium nucleus. For T_{eff} , the transverse momentum for BM@N in measured range.

Interacting nucleus / Beam kinetic energy / Experiment	π^+ , K^+ yields	K^+ / π^+ yield ratio, $\cdot 10^{-2}$	T_{eff} at $y^* = 0$ (World), $y^* \approx 0.5$ (π^+ , <u>BM@N</u>), y^* in meas. range (K^+ , <u>BM@N</u>)
<i>Ar+KCl</i> , 1.76 AGeV, HADES	$3.9 \pm 0.1 \pm 0.1$ (π , $A_{\text{part}} = 38.5$) $(2.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$ (K^+)		$82.4 \pm 0.1^{+9.1}_{-4.6}$ (π) $89 \pm 1 \pm 2$ (K^+)
<i>Ni+Ni</i> , 1.93 AGeV, FOPI	$3.6 \cdot 10^{-2}$ (K^+ , $A_{\text{part}} = 46.5$) $8.25 \cdot 10^{-2}$ (K^+ , $A_{\text{part}} = 75$)	$(7.59 \pm 0.49) \cdot 10^{-3}$ ($A_{\text{part}} = 46.5$)	110.9 ± 1.0 (K^+ , $A_{\text{part}} =$ 75)
<i>Ni+Ni</i> , 1.93 AGeV, KaoS	$3 \cdot 10^{-2}$ (K^+)		97 ± 7 (K^+ , $A_{\text{part}} \sim 5$) 107 ± 10 (K^+ , $A_{\text{part}} \sim 100$)
<i>Ar+Cu</i> , 3.2 AGeV, BM@N	5.1 ± 0.4 (π^+ , $A_{\text{part}} = 33.6$) $(13.9 \pm 2.2) \cdot 10^{-2}$ (K^+)	$(27.5 \pm 4.8) \cdot 10^{-3}$	90 ± 2 (π^+) 81 ± 5 (K^+)
<i>Ar+Sn</i> , 3.2 AGeV, BM@N	6.6 ± 0.5 (π^+ , $A_{\text{part}} = 48.3$) $(20.7 \pm 2.8) \cdot 10^{-2}$ (K^+)	$(31.6 \pm 4.8) \cdot 10^{-3}$	92 ± 2 (π^+) 81 ± 5 (K^+)

Центральная трековая система



- ✓ Толщина плоскостей ST 300 мкм
- ✓ Ширина вертикальных стрипов 95 мкм
- ✓ Наклонные стрипы имеют угол наклона 2.5° и ширину 103 мкм

- ✓ Ширина стрипов GEM 800 мкм для вертикальных стрипов и стрипов, наклонённых на 15°
- ✓ Толщина плоскости GEM 9 мм. С одним дрейфовым, двумя ускоряющими и одним индукционным промежутком
- ✓ При реконструкции хитов в GEM учитывается лоренцовское смещение

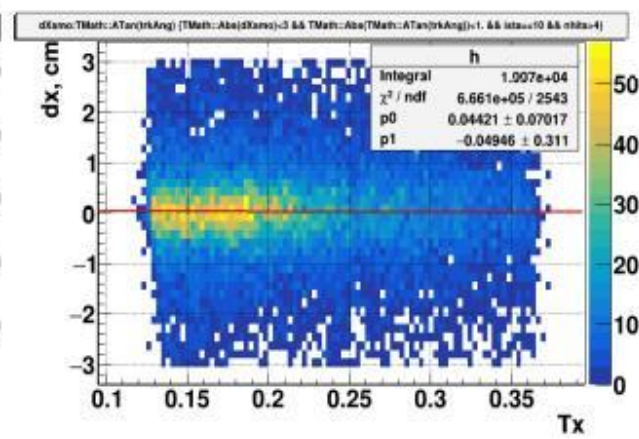
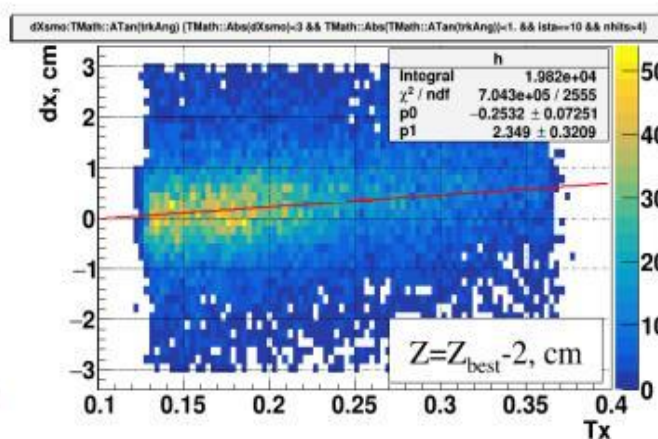
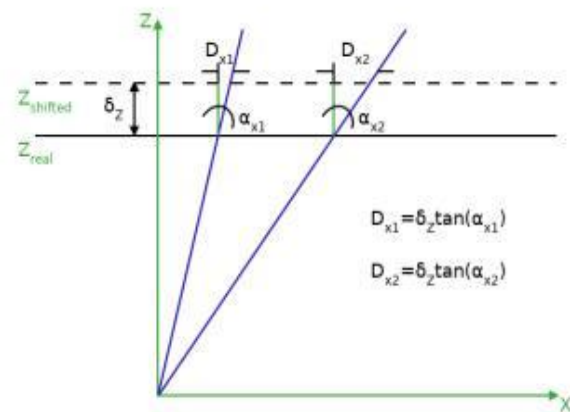
Катодно-стриповая камера (CSC)

- ✓ Горизонтальные анодные проволоки диаметром 30 мкм расположены с шагом 2.5 мм
- ✓ Две катодные плоскости X и X'. Промежуток между анодной и каждой из катодных плоскостей 3.8 мм
- ✓ Ширина стрипов 2.5 мм. Ориентация стрипов 0° и 15° относительно вертикали
- ✓ “Горячая” и “холодная” зоны

Детектор времени пролёта (ToF-400)

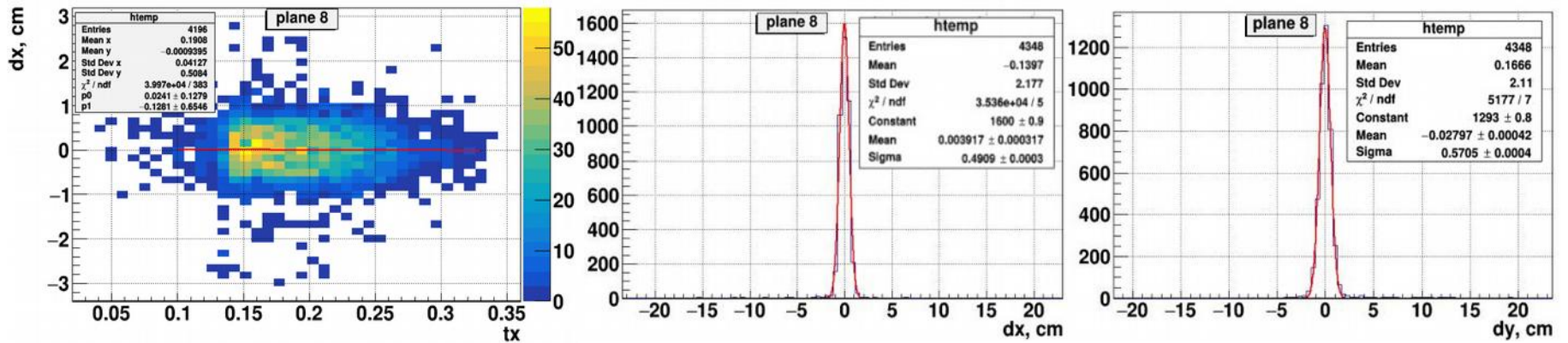
- ✓ Многозачорные резистивные плоские камеры (mRPCs) расположены на расстоянии ~4 м от мишени
- ✓ 20 mRPCs
- ✓ Вертикальные стрипы шириной 12.5 мм и длиной 300 мм

Выравнивание CSC



- ✓ Раны без магнитного поля
- ✓ Все хиты CSC вблизи точки экстраполяции ±15 см
- ✓ Выравнивание по X и X'

Выравнивание ТоF-400



- ✓ Тот же подход, как и для CSC
- ✓ Вращение mRPC1 вокруг Z

Результаты выравнивания

- ✓ $\sigma_{dz} < 1$ см, $\sigma_{dx} < 2$ мм, $\sigma_{dy} < 2$ мм, $\sigma_{zrot} < 10$ мрад

$$dy = x \cdot \tan(\alpha_z)$$

