



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Б.П. КОНСТАНТИНОВА

НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



NICA



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Возможность изучения свойств заряженных адронов в $\text{Xe}+\text{W}$ столкновениях при энергии 2.5A ГэВ на установке MPD в ускорителе NICA

Я.А. Бердников, Д.А. Иванищев, Д.О. Котов, М.В. Малаев
(СПбПУ и НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ) для коллаборации MPD



Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009)

03 июля 2025

Эксперимент MPD на ускорителе NICA



- Один из двух экспериментов на ускорителе NICA по изучению столкновений тяжелых ядер при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ

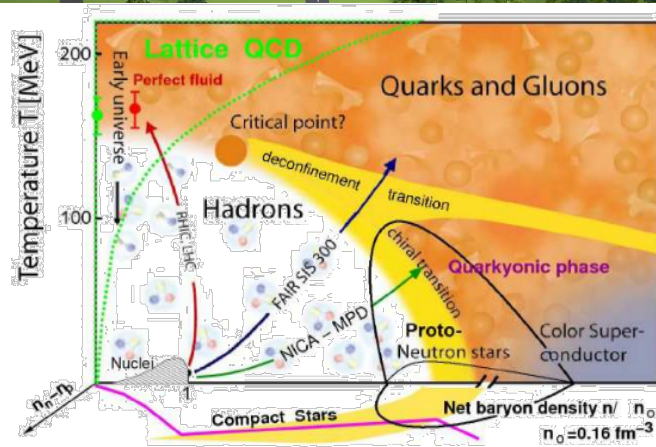
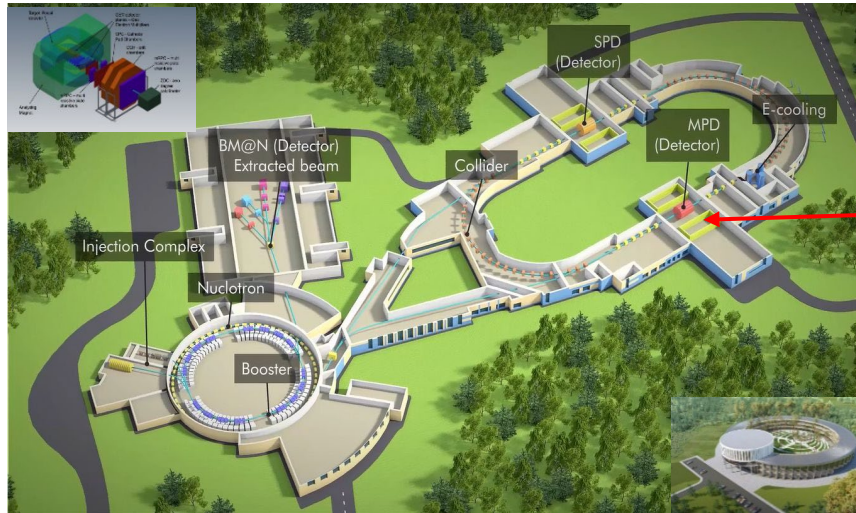
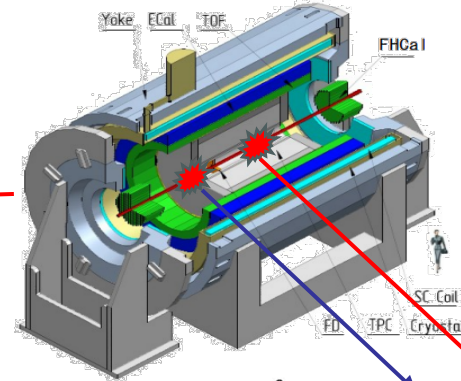
Этап - I

TPC: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,6$

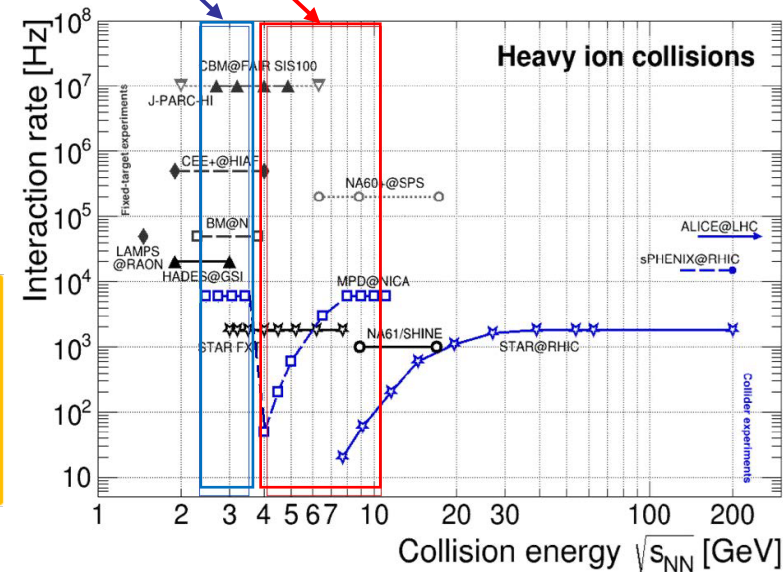
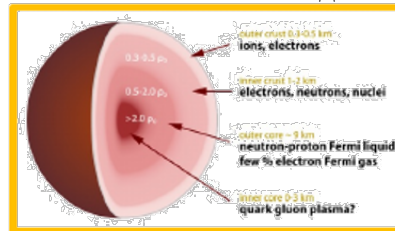
TOF, EMC: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $|\eta| \leq 1,4$

FFD: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2,9 < |\eta| < 3,3$

FHCAL: $|\Delta\phi| < 2\pi$, $2 < |\eta| < 5$



Большая барионная
плотность
→ внутренняя структура
компактных звезд

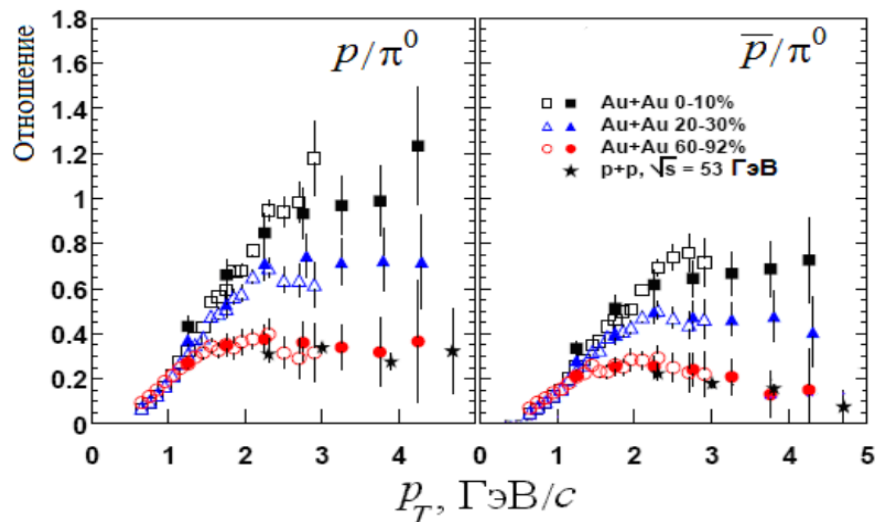


- NICA будет изучать КХД-материю при больших значениях барионной плотности → фазовый переход 1 рода + КХД критическая точка
- Другие действующие (NA61/Shine, STAR-BES, BM@N, HADES) и будущие эксперименты (CBM, CEE, NA60 и др.) в ~ одинаковой области энергий

Легкие адроны как пробники столкновений тяжелых ядер

Легкие адроны в столкновениях тяжелых ядер

- Свойства среды, образующейся в АА столкновениях, определяют косвенно
- Регистрация рождающихся частиц детекторными системами
- Заряженные легкие адроны ($\pi^\pm$, $K^\pm$ и $p^\pm$):
 - ✓ рождаются в изобилии в столкновениях тяжелых релятивистских ядер
 - ✓ достаточно легко идентифицируются (dE/dx , m^2 , β)
 - ✓ разные кварковый состав, барионное число, масса, странность
- Систематическое экспериментальное исследование инвариантных спектров по p_T и m_T , выходов и факторов ядерной модификации:
 - ✓ свойства горячей и плотной ядерной среды в момент ее распада на конечные адроны
 - ✓ проверка достижения системой теплового и химического равновесия
 - ✓ оценка динамики реакции, включая коллективные эффекты при продольном и поперечном расширении файерболла



Эффект избыточного выхода барионов по отношению к мезонам на RHIC и LHC – один из признаков образования КГП

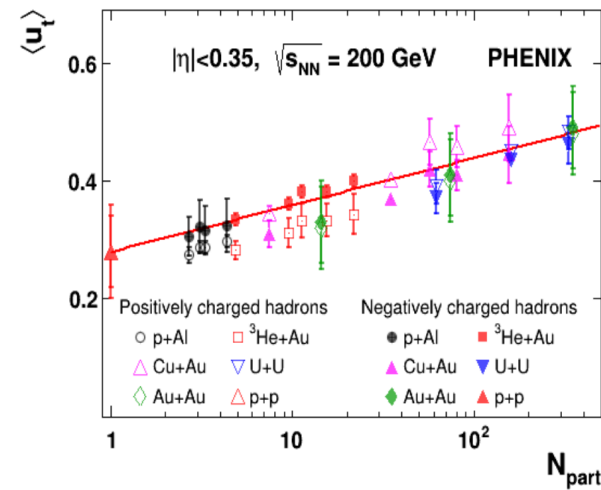
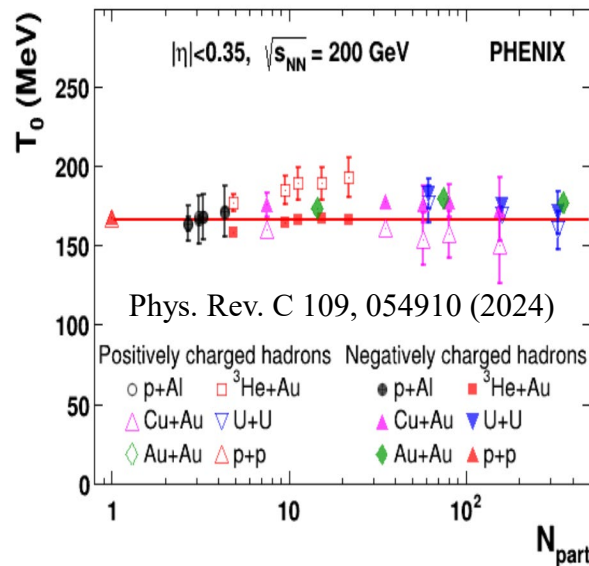
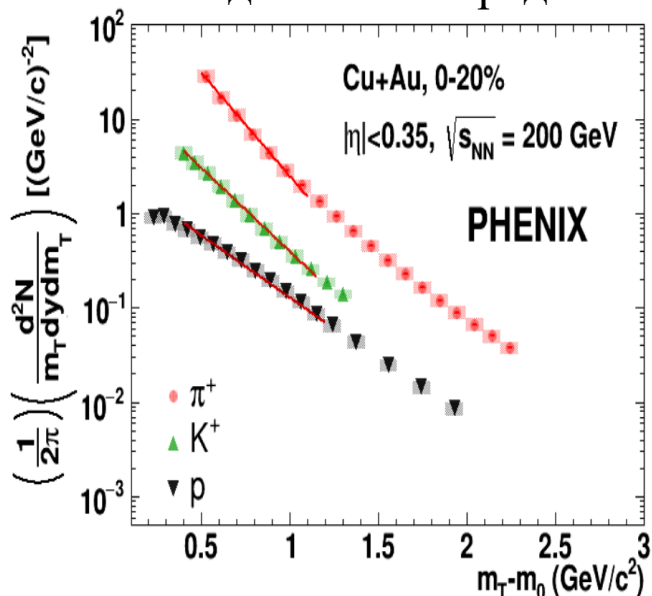
Спектры рождения легких адронов

- Отслеживание динамики реакции по форме спектров и $\langle p_T \rangle$
- Форма инвариантных спектров по p_T и m_T ($\sqrt{p_T^2 + m_0^2}$) чувствительна к:
 - ✓ механизмам рождения частиц в различных кинематических областях
 - ✓ взаимовлиянию радиального потока
 - ✓ рекомбинации партонов при промежуточных поперечных импульсах
 - ✓ температуре кинетической заморозки (T_0)
 - ✓ средней скорости коллективного потока частиц ($\langle u_t \rangle$)

$$\frac{1}{2\pi m_T} \frac{d^2 N}{dm_T dy} = \frac{A}{2\pi T(T + m_0)} \exp\left(-\frac{m_T - m_0}{T}\right)$$

тепловое движение + радиальное расширение системы

$$T = T_0 + m \langle u_t \rangle^2$$



$$\frac{d^2 N}{p_T dp_T dy} = C(y) \cdot m_T \int_0^1 \chi d\chi \exp\left[-\frac{m_T \chi \rho \chi(y - \eta)}{T}\right] I_0\left(\frac{p_T \text{sh } \rho}{T}\right)$$

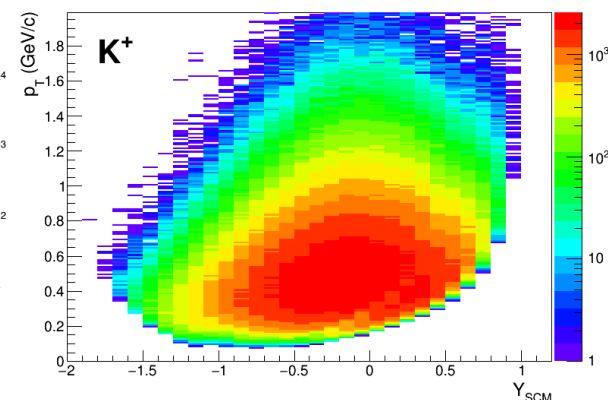
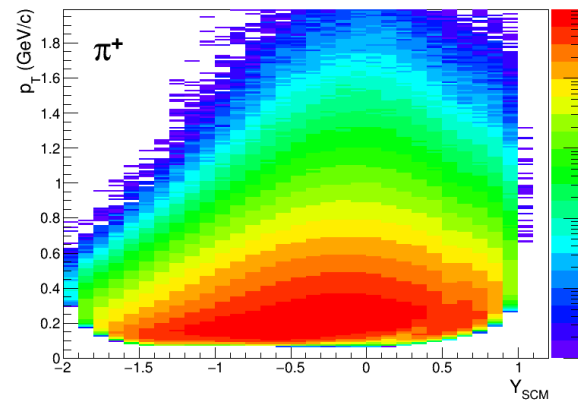
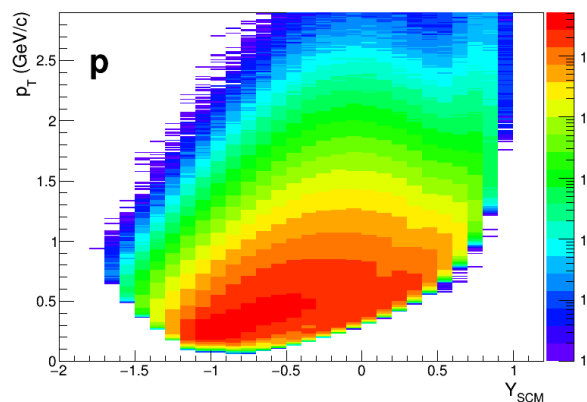
Phys.Rev.C48:2462-2475,1993

Тепловой источник + гидродинамическое расширение ("взрывная волна")

**Возможности MPD измерять $\pi^\pm$, $K^\pm$ и p в столкновениях
Xe+W@2,5A ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,87$ ГэВ)**

Модельные расчеты

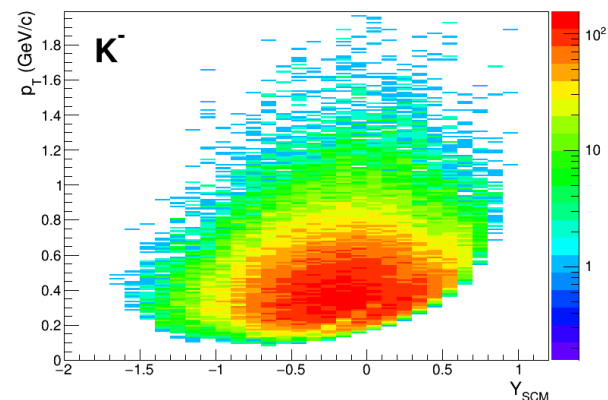
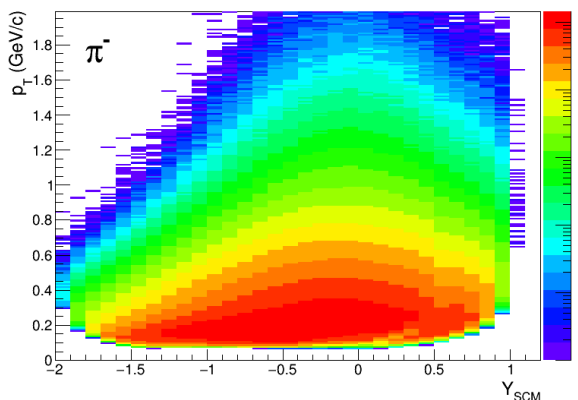
- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления событий с использованием UrQMD v.3.4 (Xe+W@2,5A ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,87$ ГэВ), 15 млн. событий)
- Прохождение частиц через MPD посредством MPDroot (Geant v.4):
 - ✓ реалистичное моделирование отклика подсистем
 - ✓ восстановление треков



- Центральная область быстрот
 $-0,5 < y_{SCM} < 0$

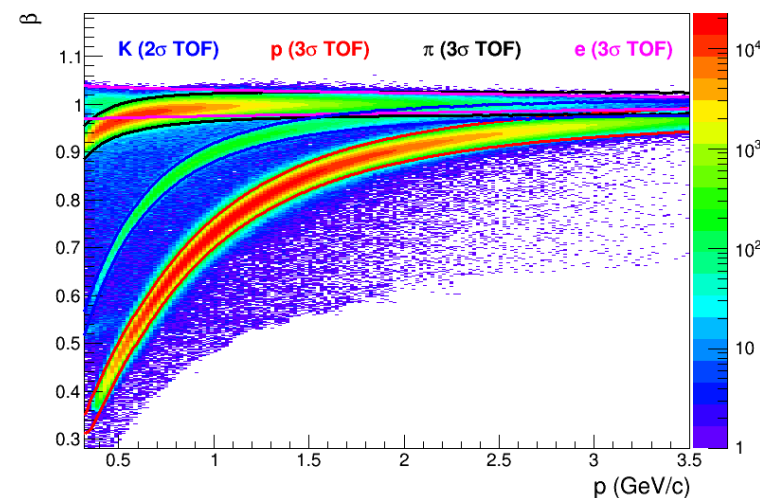
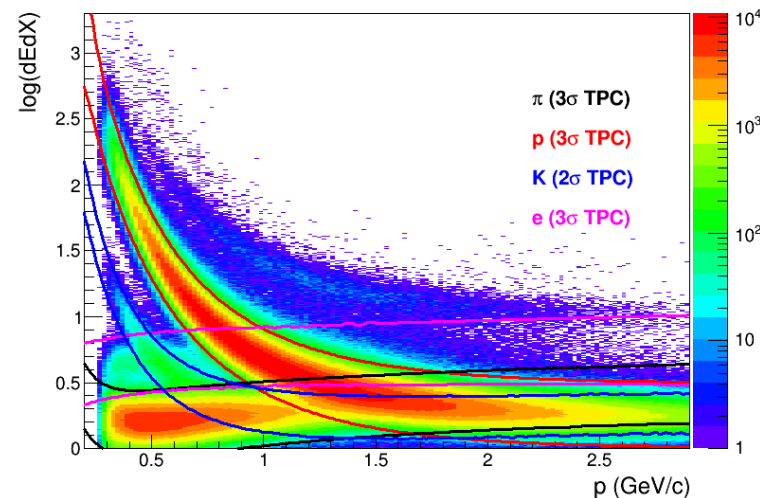
- Ограничение по p_T :

- ✓ пионы: $p_T > 0,05$ ГэВ/с
- ✓ каоны: $p_T > 0,15$ ГэВ/с
- ✓ протоны: $p_T > 0,25$ ГэВ/с



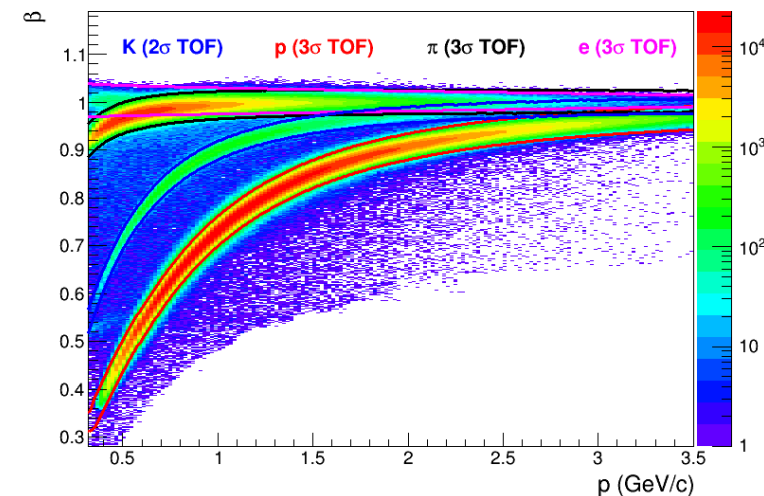
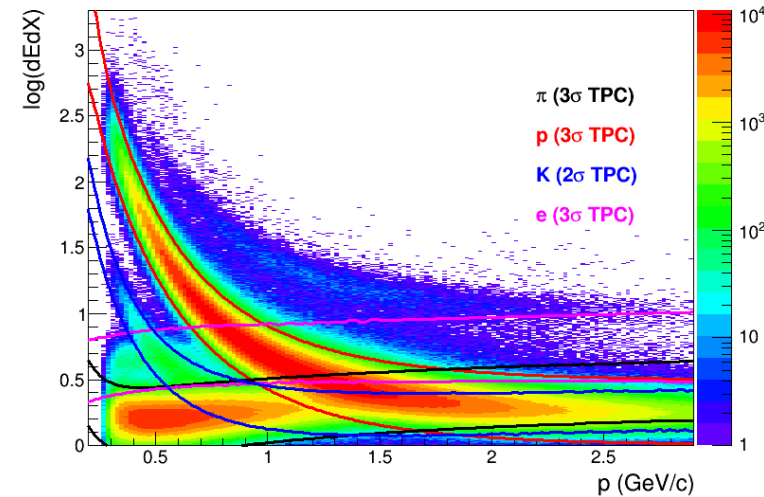
Идентификация пионов и протонов

- Отбор столкновений:
 - ✓ центральность 0–90% (7 интерв.)
- Отбор треков:
 - ✓ число точек TPC > 28
 - ✓ $DCA\text{-}to\text{-}PV < 2\sigma_{x,y,z}$
 - ✓ $-0,5 < y_{\text{СЦМ}} < 0$
- Два подхода идентификации пионов и протонов:
- **(TPC-TOF)**
 - ✓ TPC-отбор (2σ) для заданного типа частицы (π, p)
 - ✓ дополнительное условие для треков с TOF-совпадением: если трек имеет TOF-совпадение в пределах 3σ то применяется TOF-отбор (2σ)
- **(TOF-TPC)**
 - ✓ TOF-отбор (2σ) для заданного типа частицы (π, p)
 - ✓ TPC-отбор (2σ) для заданного типа частицы (π, p)
- Спектры восстанавливаются с чистотой > 95%
- Спектры корректируются с учетом примесей → для величины коррекции вводится 50% неопределенность ($0,5 \times 5\% = 2,5\%$ p_T -коррелированная систематическая погрешность для спектров)
- Окончательный спектр – объединенные **TPC-TOF** и **TOF-TPC** спектры, с наименьшими стат. ошибками

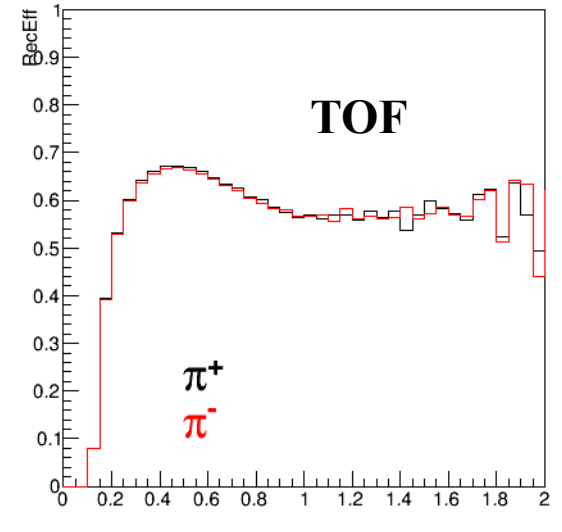
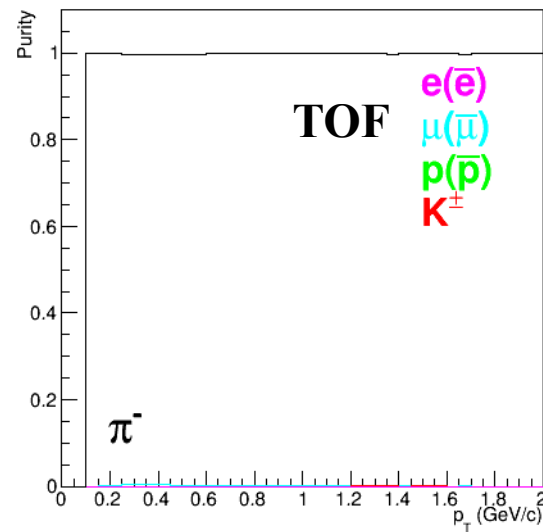
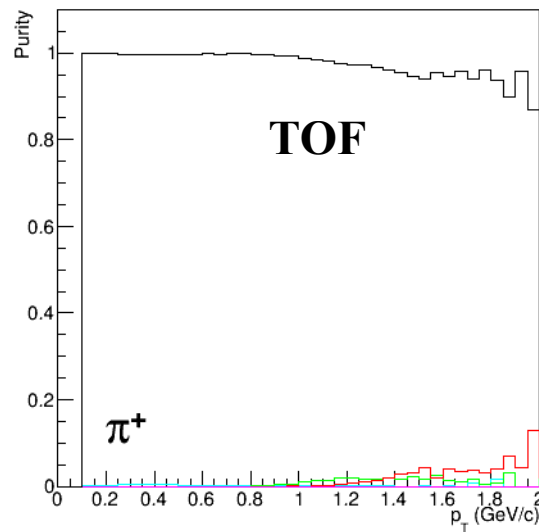
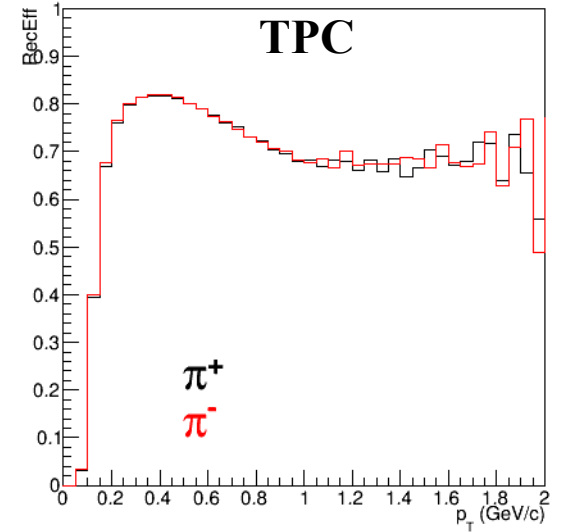
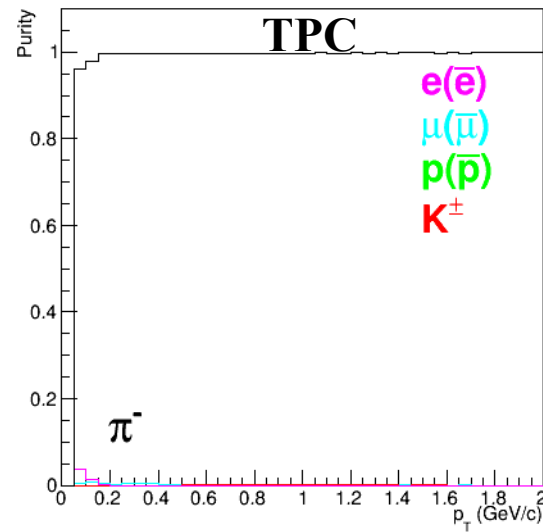
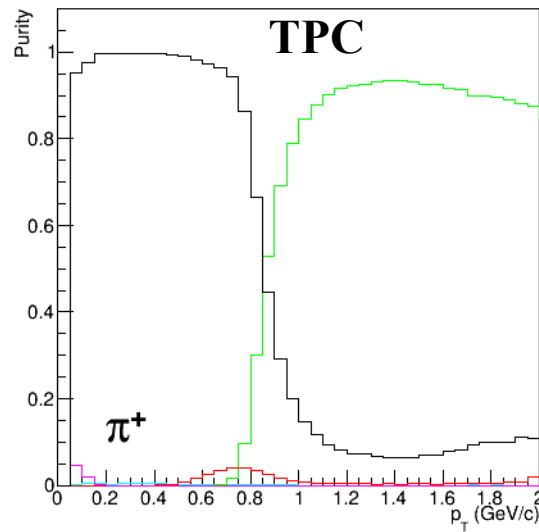


Идентификация каонов

- Отбор столкновений:
 - ✓ центральность 0–90% (7 интерв.)
- Отбор треков:
 - ✓ число точек TPC > 28
 - ✓ $DCA\text{-}to\text{-}PV < 2\sigma_{x,y,z}$
 - ✓ $-0,5 < y_{сцм} < 0$
- Два подхода идентификации каонов:
- **(TPC-TOF)**
 - ✓ TPC-отбор (1σ) для заданного типа частицы (K)
 - ✓ дополнительное условие для треков с TOF-совпадением: если трек имеет TOF-совпадение в пределах 3σ то применяется TOF-отбор (1σ)
 - ✓ TPC 3σ veto-критерий не быть другой частицей ($e/\pi/p$)
- **(TOF-TPC)**
 - ✓ TOF-отбор (1σ) для заданного типа частицы (K)
 - ✓ TPC-отбор (1σ) для заданного типа частицы (K)
 - ✓ TOF 3σ veto-критерий не быть другой частицей ($e/\pi/p$)
- Спектры восстанавливаются с чистотой > 90%
- Спектры корректируются с учетом примесей → для величины коррекции вводится 50% неопределенность ($0,5 \times 10\% = 5\%$ p_T -коррелированная систематическая погрешность для спектров)
- Окончательный спектр – объединенные TPC-TOF и TOF-TPC спектры, с наименьшими стат. ошибками



Пионы



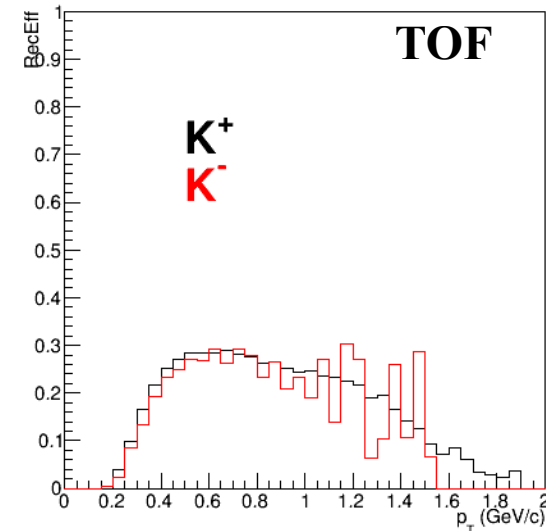
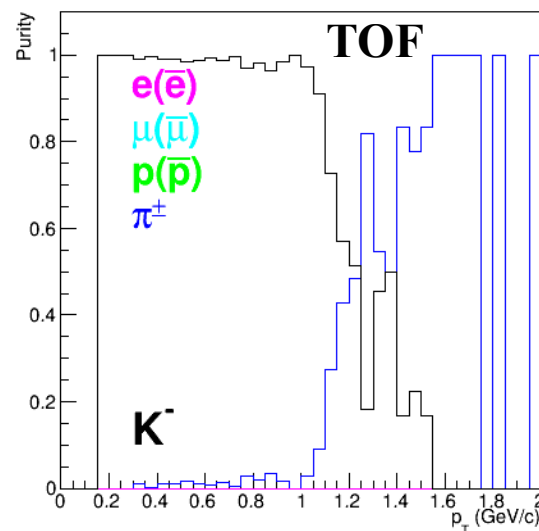
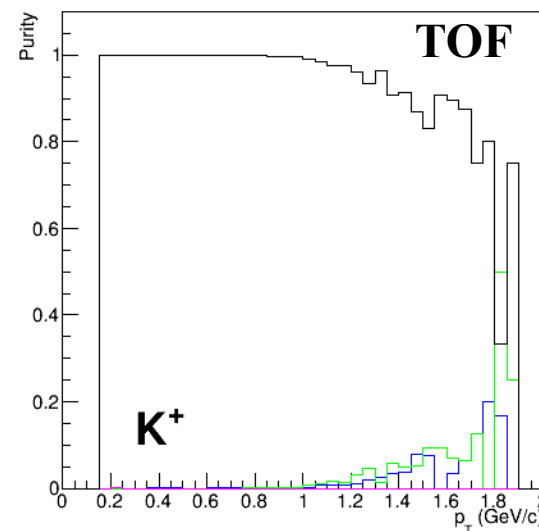
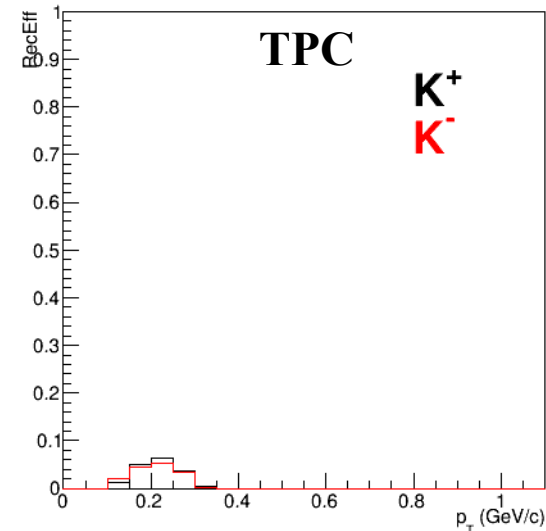
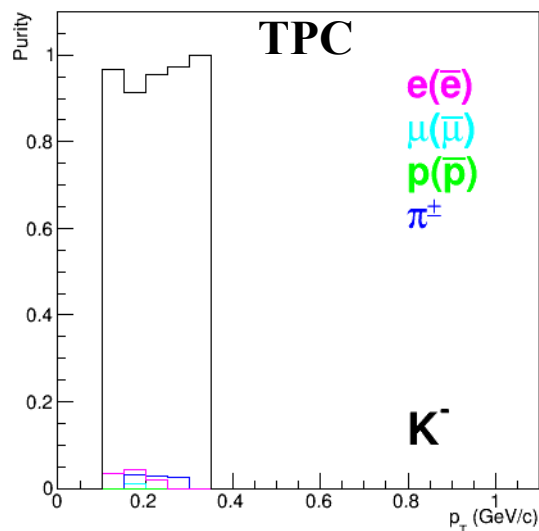
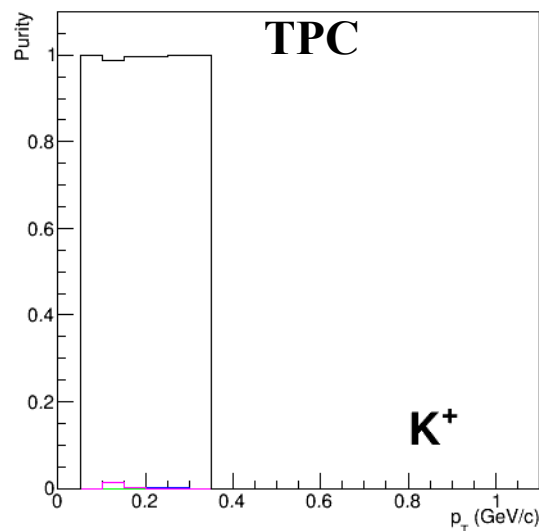
• Приемлемая чистота спектра $> 95\%$ в области:

✓ π^- : $0.1 < p_T < 2$ ГэВ/с

✓ π^+ : $p_T < 0.6$ (TPC-TOF) и 1.4 (TOF-TPC) ГэВ/с

• Приемлемые значения эффективностей в широком диапазоне p_T

Каоны



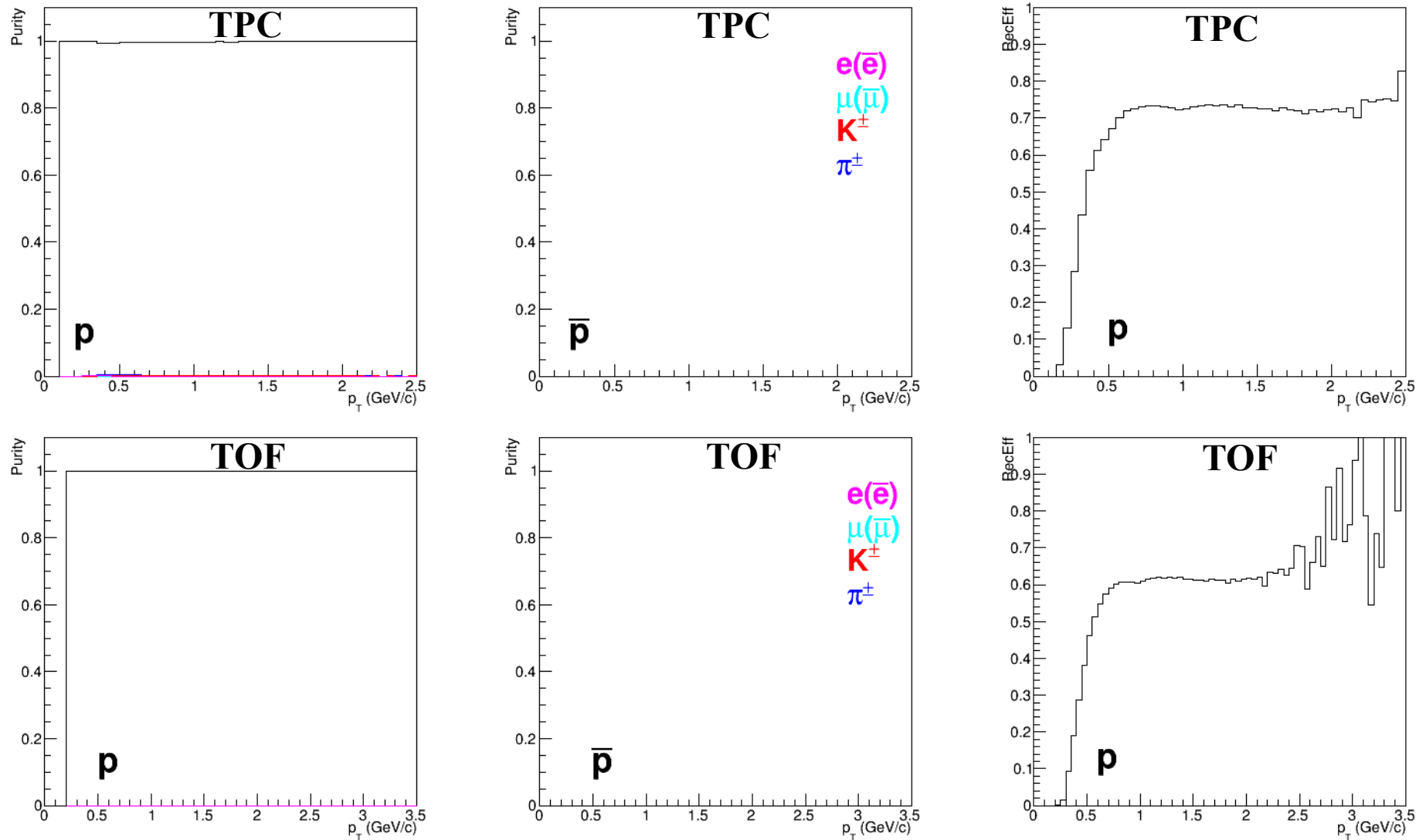
• Приемлемая чистота спектра $> 90\%$ в области:

✓ K^- : $p_T < 1$ ГэВ/с

✓ K^+ : $p_T < 1,4$ ГэВ/с

• Эффективность TOF-TPC $> \text{TPC} \sim 30\%$ (макс.)

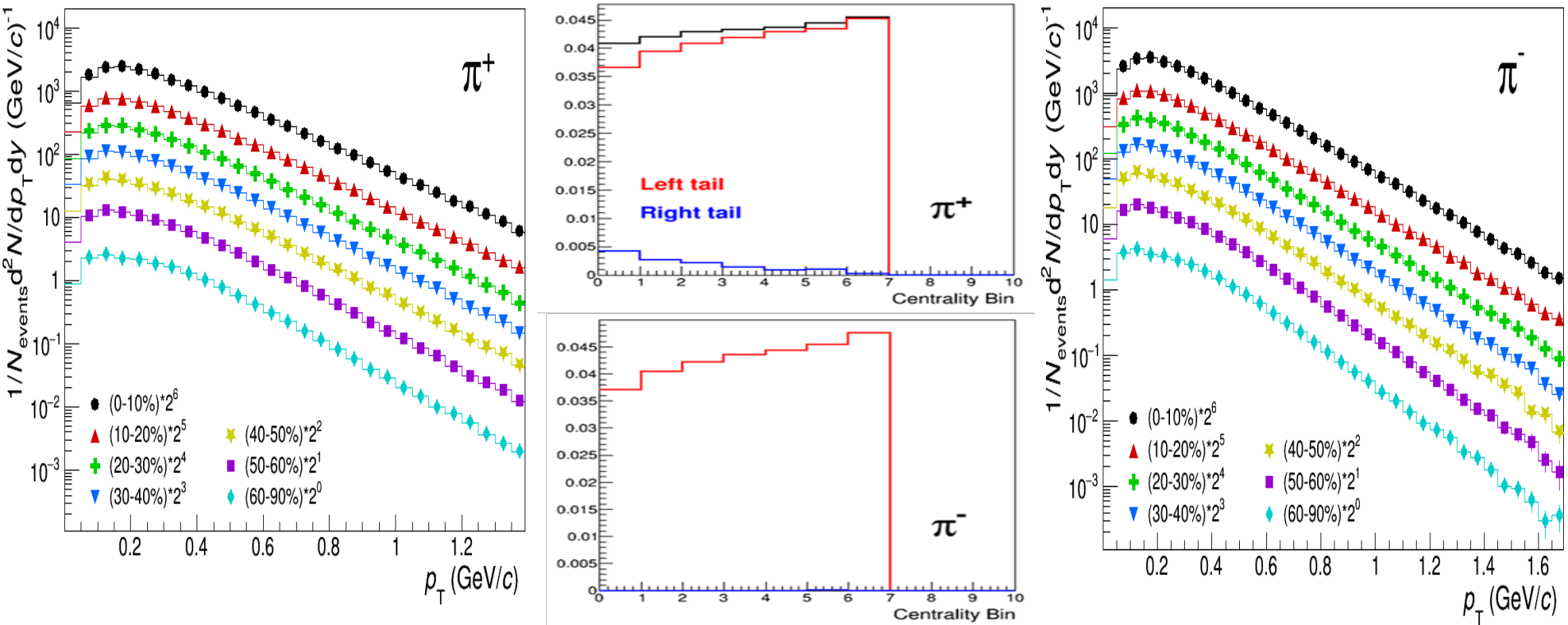
Протоны



- Генератор UrQMD не рождает антипротоны в $\text{Xe}+\text{W}@2,5\text{A ГэВ}$
- Приемлемая чистота спектра $\sim 100\%$
- Приемлемые значения эффективностей в широком диапазоне p_T

Спектры рождения и тест на замкнутость, пионы

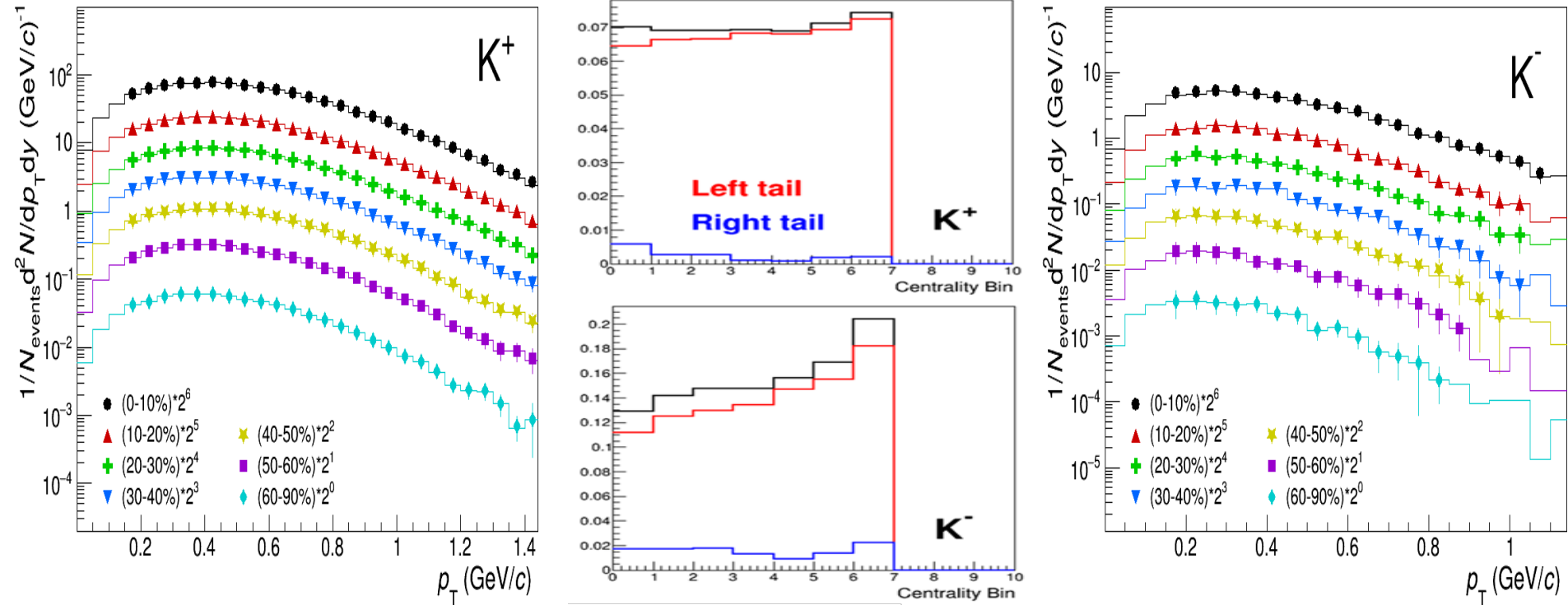
- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров, диапазоны ограничены возможностью извлечения сигналов, $-0,5 < y_{\text{ЦМ}} < 0$



- Реконструированные спектры совпадают со сгенерированными в пределах погрешностей
- Первые измерения рождения пионов в зависимости от центральности станут возможными при накоплении $\sim 10^7$ Xe+W@2,5A ГэВ столкновений
- Измерения возможно выполнить начиная с импульсов близких к нулю (50 МэВ/с)
- Восстанавливается большая часть спектров $\sim 96\%$ от общего выхода, теряется $\sim 4\%$ в области малых p_T

Спектры рождения и тест на замкнутость, каоны

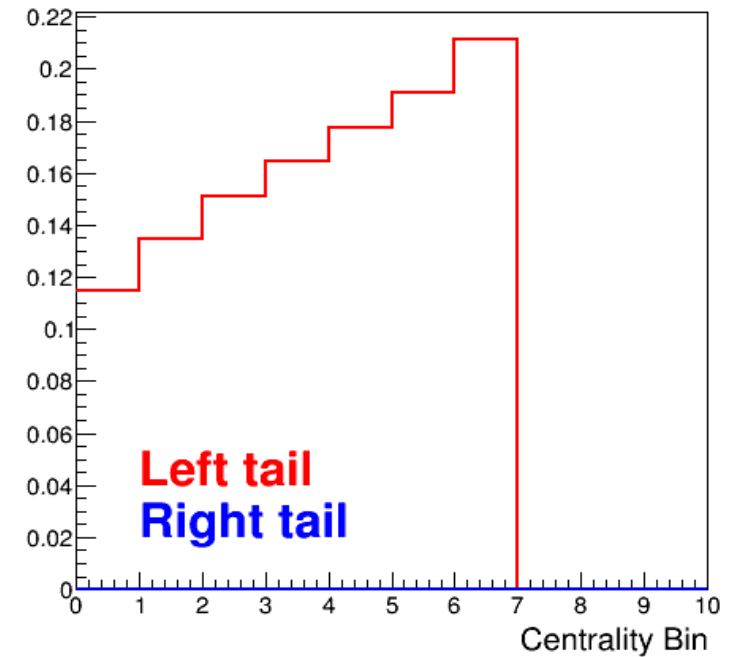
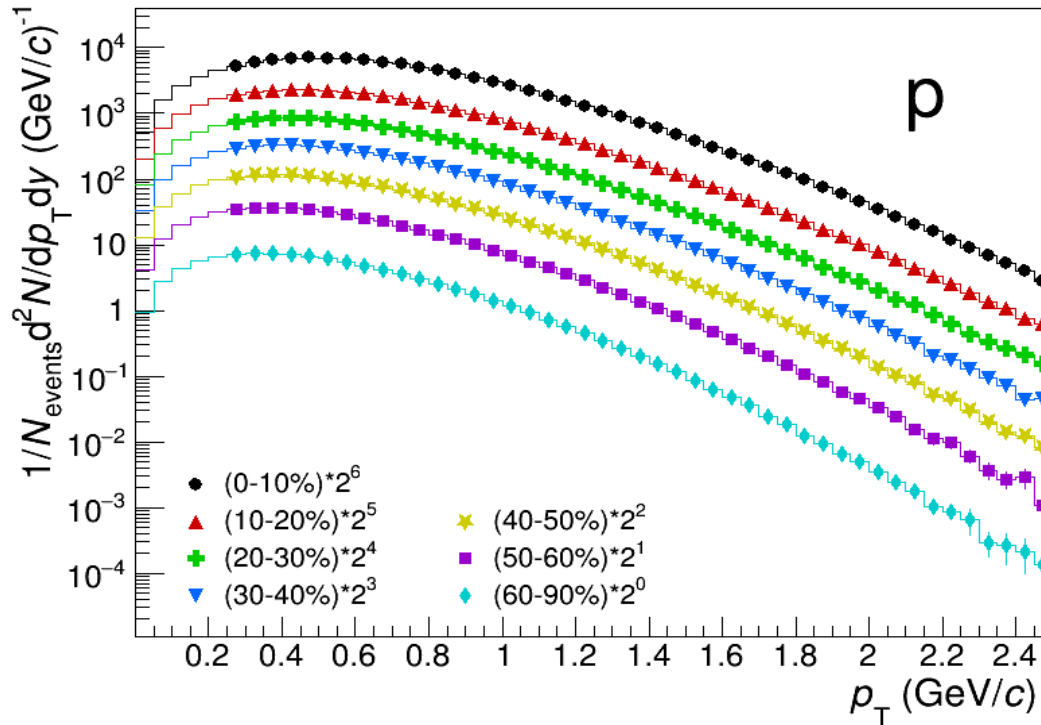
- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров, диапазоны ограничены возможностью извлечения сигналов, $-0,5 < y_{\text{СЦМ}} < 0$



- Реконструированные спектры совпадают со сгенерированными в пределах погрешностей
- Первые измерения рождения каонов в зависимости от центральности станут возможными при накоплении $\sim 10^7$ Xe+W@2,5A ГэВ столкновений
- Измерения возможно выполнить начиная с импульсов близких к нулю (150 МэВ/с)
- Восстанавливается большая часть спектров $\sim 93(K^+) \ 80-88(K^-)\%$ от общего выхода, основная часть теряется в области малых p_T

Спектры рождения и тест на замкнутость, протоны

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров, диапазоны ограничены возможностью извлечения сигналов, $-0,5 < y_{\text{СЦМ}} < 0$



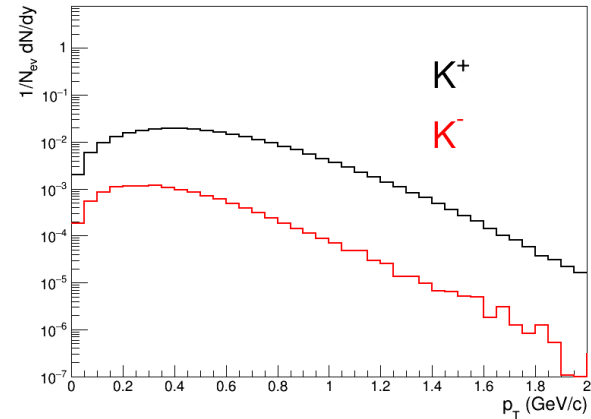
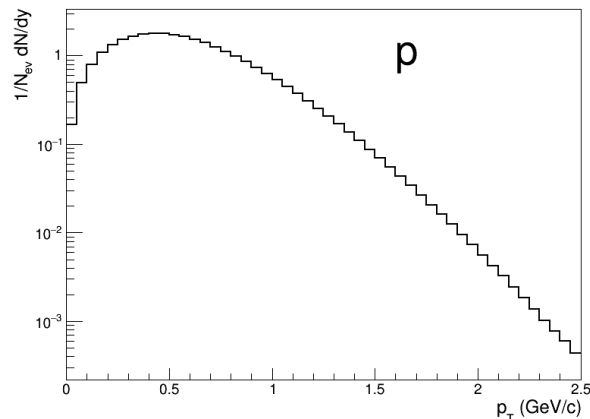
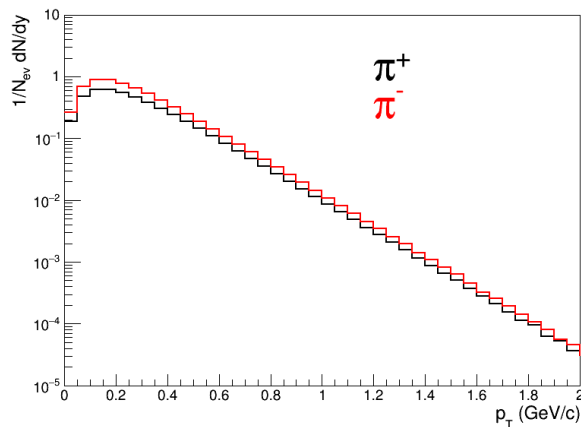
- Реконструированные спектры совпадают со сгенерированными в пределах погрешностей
- Первые измерения рождения протонов в зависимости от центральности станут возможными при накоплении $\sim 10^7$ Xe+W@2,5A ГэВ столкновений
- Измерения возможно выполнить начиная с импульсов близких к нулю (250 МэВ/с)
- Восстанавливается большая часть спектров $\sim 79-88\%$ от общего выхода, теряется $\sim 21-12\%$ в области малых p_T

Заключение

- Исследование рождения идентифицированных легких заряженных адронов является важной частью физической программы MPD:
 - ✓ свойства горячей и плотной ядерной среды в момент ее распада на конечные адроны;
 - ✓ достижение системой теплового и химического равновесия;
 - ✓ динамика реакции
- Разработан и применен подход к восстановлению инвариантных спектров по поперечному импульсу $\pi^\pm$, $K^\pm$ и p на основе σ -параметризации информации об идентификации частиц в детекторах TPC и TOF:
 - ✓ простой;
 - ✓ минимальное число модельно-зависимых поправок
- Первые результаты измерения рождения $\pi^\pm$ -, $K^\pm$ -мезонов и p в зависимости от поперечного импульса и центральности возможно будет получить при набранной статистике $\sim 10^7$ Xe+W@2,5A ГэВ ($\sqrt{s_{NN}} = 2,87$ ГэВ) столкновений
- Измерения возможны начиная с малых импульсов в области центральных быстрот:
 - ✓ пионы: $p_T > 0,05$ ГэВ/с, 96 % от общего выхода;
 - ✓ каоны $p_T > 0,15$ ГэВ/с, 93 (80–87) % от общего выхода;
 - ✓ протоны, $p_T > 0,25$ ГэВ/с, 79–88 % от общего выхода→ высокая чувствительность к различным физическим явлениям, наиболее выраженным при малом p_T

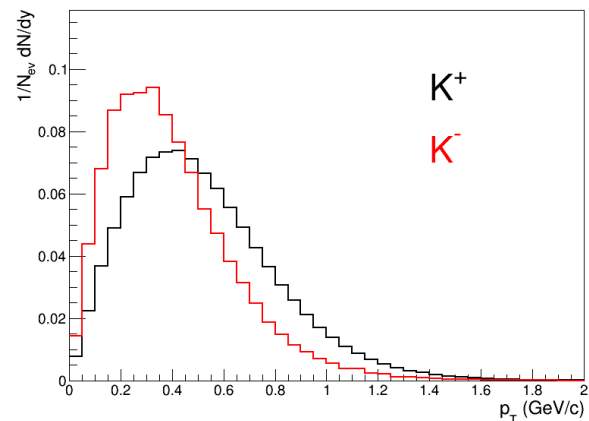
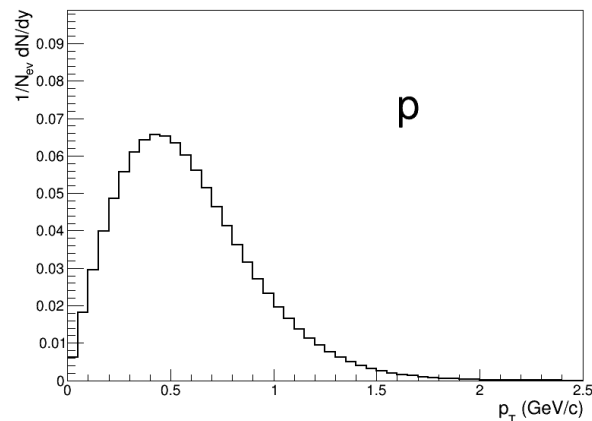
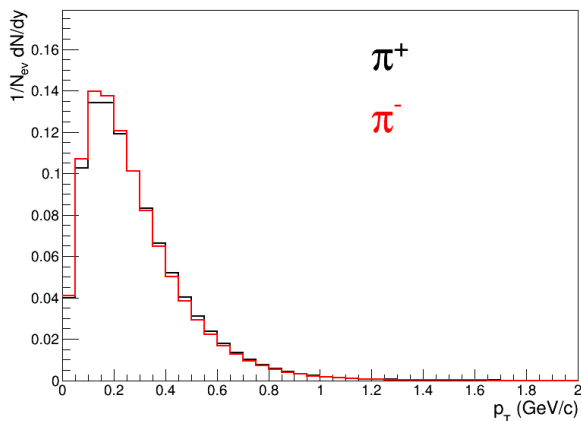
Запасные

Сгенерированные спектры



Почти совпадают для пионов; нет антипротонов; существенная асимметрия для каонов

Нормализованные спектры



Спектры мягкие $\rightarrow$ область малых p_T очень важна

Потери спектра

Доля потеряннного спектра, если спектр начинается с p_T левого столбца

St p_T	Proton	Pi+	Pi-	K+	K-
0.05	0.005	0.037	0.037	0.007	0.014
0.10	0.019	0.131	0.134	0.029	0.053
0.15	0.042	0.259	0.266	0.064	0.114
0.20	0.074	0.394	0.404	0.112	0.193
0.25	0.114	0.514	0.526	0.170	0.279
0.30	0.162	0.616	0.630	0.236	0.370
0.35	0.215	0.700	0.713	0.306	0.462
0.40	0.272	0.767	0.779	0.378	0.547
0.45	0.333	0.820	0.831	0.450	0.623
0.50	0.395	0.861	0.870	0.520	0.691
0.55	0.457	0.893	0.901	0.586	0.747
0.60	0.518	0.918	0.924	0.648	0.798
0.65	0.576	0.937	0.942	0.703	0.840
0.70	0.631	0.952	0.956	0.753	0.874
0.75	0.681	0.963	0.966	0.796	0.900
0.80	0.727	0.972	0.974	0.833	0.920
0.85	0.768	0.979	0.980	0.865	0.938
0.90	0.804	0.984	0.985	0.891	0.951
0.95	0.835	0.988	0.989	0.914	0.962
1.00	0.863	0.991	0.991	0.932	0.970