



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

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

НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



NICA

MPD



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Перспективы измерения короткоживущих мезонных резонансов в $\text{Xe}+\text{W}$ столкновениях при энергии $2,5 \text{ A} \cdot \text{ГэВ}$ в эксперименте MPD на ускорителе NICA

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



Секция ядерной физики Отделения физических наук
Российской академии наук
и Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
сессия-конференция
«Физика фундаментальных взаимодействий»



Российская Академия Наук

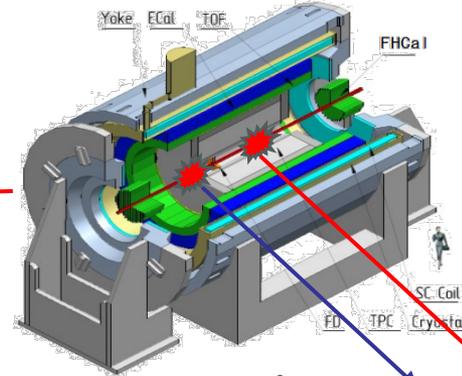
Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009)

10 Марта 2026

Эксперимент MPD на ускорителе NICA

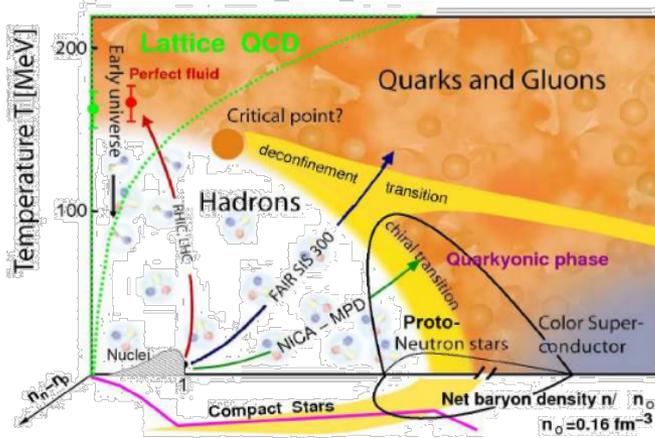


- Один из двух экспериментов на ускорителе NICA по изучению столкновений тяжелых ядер при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ

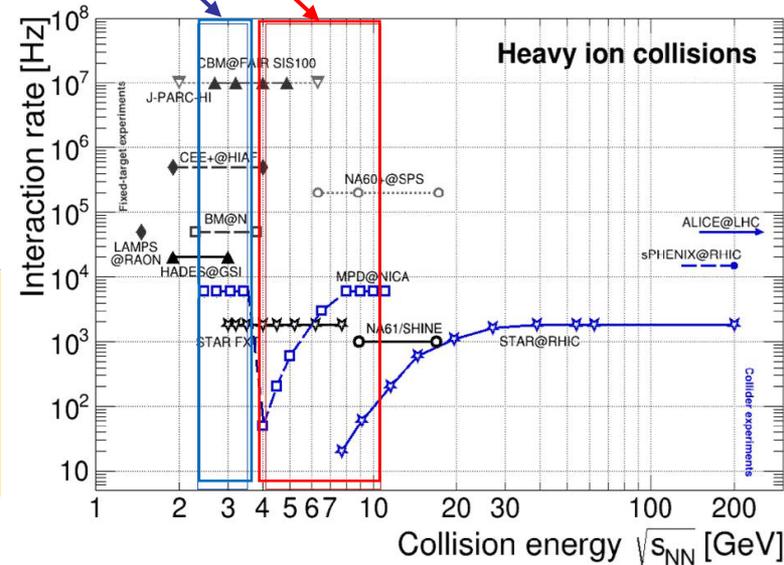
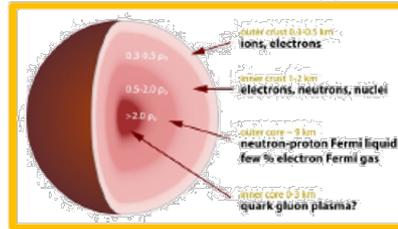


Этап - I

- 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

Резонансы как пробники столкновений тяжелых ядер

Резонансы в столкновениях тяжелых ядер

- Наиболее часто/легко измеряемые резонансы:



Particle	Mass (MeV/c ²)	Width (MeV/c ²)	Decay	BR (%)
ρ^0	770	150	$\pi^+\pi^-$	100
$K^{*\pm}$	892	50.3	$\pi^+K_s^-$	33.3
K^{*0}	896	47.3	π^+K^0	66.7
ϕ	1019	4.27	K^+K^-	48.9
Σ^{*+}	1383	36	$\pi^+\Lambda$	87
Σ^{*-}	1387	39.4	$\pi^-\Lambda$	87
$\Lambda(1520)$	1520	15.7	$K^-\rho$	22.5
Ξ^{*0}	1532	9.1	$\pi^+\Xi^-$	66.7

- Свойства резонансов в вакууме измерены достаточно хорошо (m , τ , КВ и т.д.)
- Обильно рождаются в столкновениях тяжелых ионов при энергиях порядка \sim ГэВ, имеют большие вероятности распада в адронные каналы \rightarrow возможно измерить
- Используются для исследования динамики реакций и механизмов рождения частиц в зависимости от размера системы и энергии \sqrt{s}_{NN} :
 - ✓ адронная химия и рождение странности, ϕ обладает скрытой странностью и является одним из ключевых пробников
 - ✓ динамики реакций и форма спектров по p_T , p/K^* , p/ϕ в зависимости от p_T
 - ✓ время жизни и свойства адронной фазы
 - ✓ спиновая ориентация векторных мезонов во вращающейся КГП (поляризация кварков вследствие спин-орбитальных взаимодействий)
 - ✓ поток, сравнение с измерениями пар e^+e^- , гашение струй, фон в других исследованиях и т.д.

Адронная фаза и модификации в среде

- Резонансы обладают малым $\tau \sim 1 - 45$ фм/с, часть резонансов распадается в Файерболе

increasing lifetime \longrightarrow

	$\rho(770)$	$K^*(892)$	$\Sigma(1385)$	$\Lambda(1520)$	$\Xi(1530)$	$\phi(1020)$
τ (fm/c)	1.3	4.2	5.5	12.7	21.7	46.2
σ_{rescatt}	$\sigma_{\pi}\sigma_{\pi}$	$\sigma_{\pi}\sigma_K$	$\sigma_{\pi}\sigma_{\Lambda}$	$\sigma_K\sigma_p$	$\sigma_{\pi}\sigma_{\Xi}$	$\sigma_K\sigma_K$

Восстанавливаемые выходы резонансов в столкновениях тяжелых ядер определяются

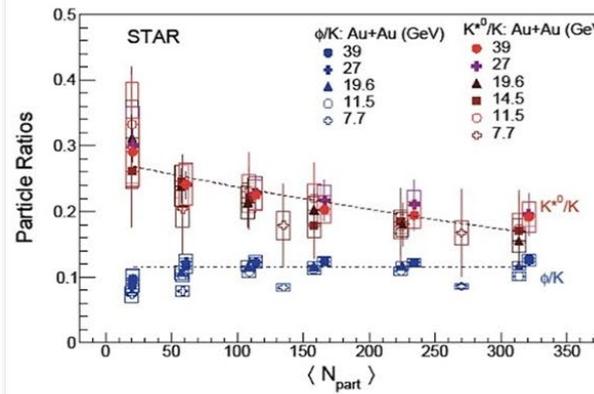
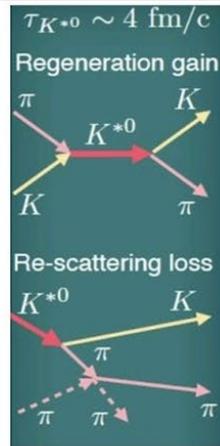
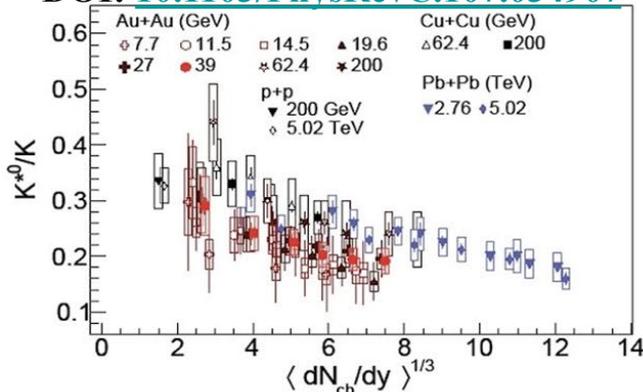
✓ Выходами резонансов при химической заморозке

✓ Адронными процессами между химической и кинетической заморозками:

перерасеяние: упругое или псевдо-упругое дочерних частиц с окружающими адронами \rightarrow материнская частицы на восстанавливается \rightarrow потеря сигнала

регенерация: псевдо-упругое рассеяние адронов ($\pi K \rightarrow K^{*0}$, $KK \rightarrow \phi$ и т.д.) \rightarrow избыточный выход

DOI: [10.1103/PhysRevC.107.034907](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.107.034907)

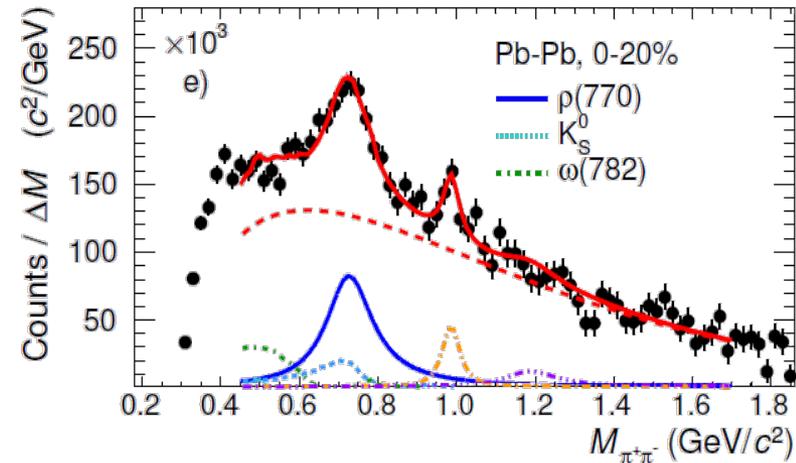
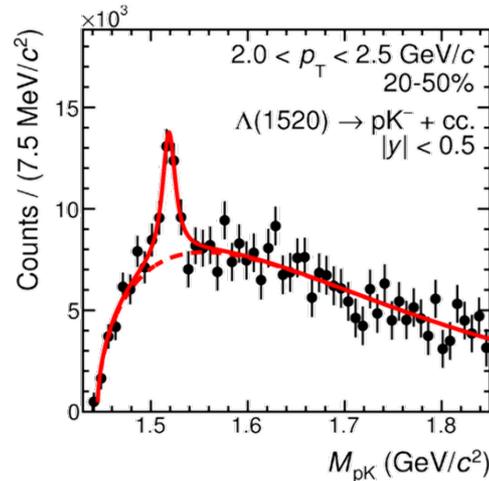
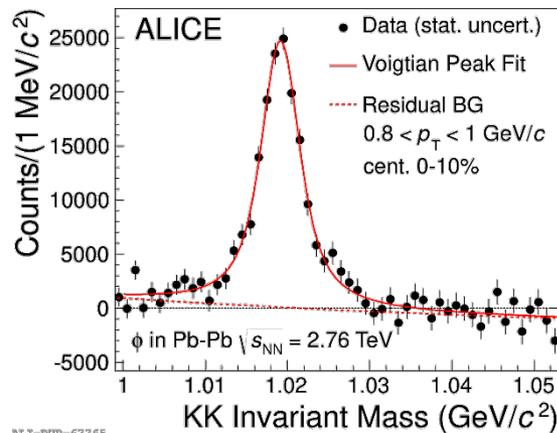


• Точные измерения на установке NICA необходимы для проверки описания адронной фазы в моделях.

- Подавление выхода короткоживущих резонансов ($\tau < 20$ фм/с) в центральных А+А столкновениях \rightarrow перерасеяние преобладает на регенерацией
- Модификации не наблюдается для долгоживущих резонансов, ϕ -мезон ($\tau \sim 40$ фм/с)
- Изменение выхода зависит от множественности частиц, а не от сталкивающейся системы/энергии

Восстановление резонансов

- Свойства адронных резонансов восстанавливаются в экспериментах с использованием метода инвариантной массы
- После вычитания некоррелированного комбинаторного фона (оценивается методом смешивания событий, пар одинаково заряженных частиц и т.д.), пики резонансов аппроксимируются с использованием заданной модели пика (например, функция Брейта-Вигнера + разрешение по массе + зависящая от массы ширина + поправка на фазовое пространство + ...) и функцией, описывающей фон.
- Примеры распределений инвариантной массы и их аппроксимации из эксперимента ALICE для ϕ , $\Lambda(1520)$ и $\rho(770)^0$:



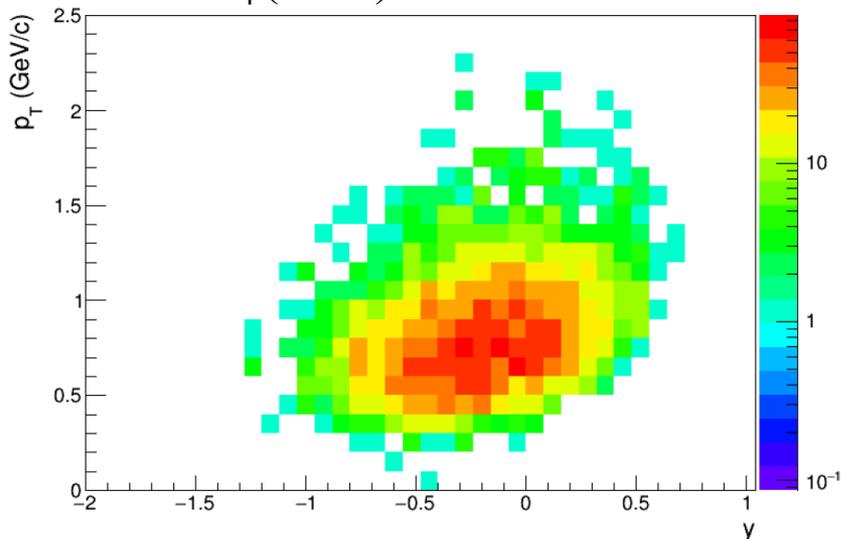
- В большинстве случаев модели пиков основаны на теории и результатах измерений в элементарных столкновениях e^+e^- и/или pp , где эффекты среды не столь значительны.
- Модификации в среде могут приводить к изменению измеряемого выхода и масс/ширин резонансов.

**Возможности МРД измерять $\phi(1020)$ и $K^*(892)^0$ в столкновениях $\text{Xe}+\text{W}@2,5\text{A}$ ГэВ
($\sqrt{s_{NN}} = 2,87$ ГэВ)**

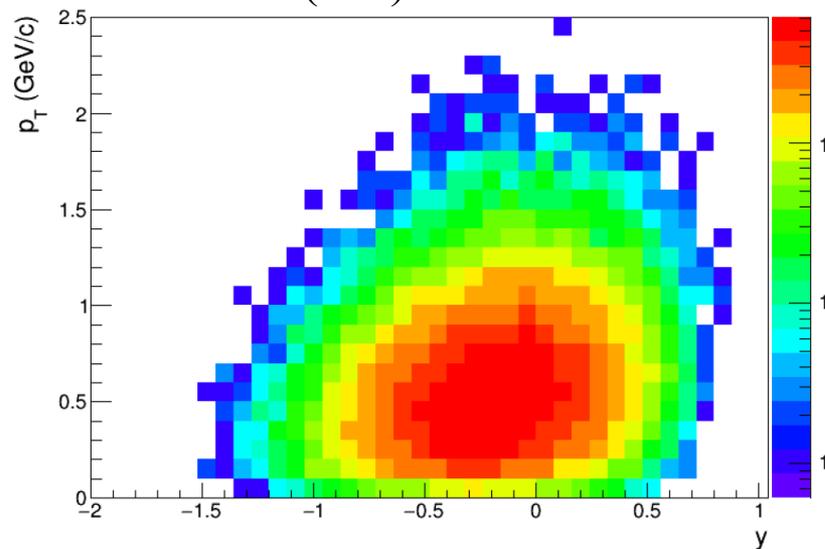
Модельные расчеты

- 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

$\phi(1020) \rightarrow K^+ + K^-$



$K^*(892)^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$



- Центральная область быстрот

✓ $-1 < y_{\text{СЦМ}} < 0$

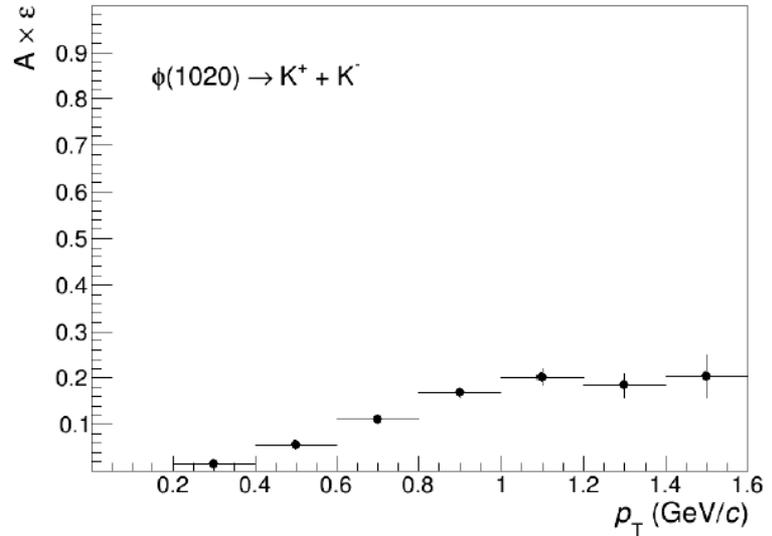
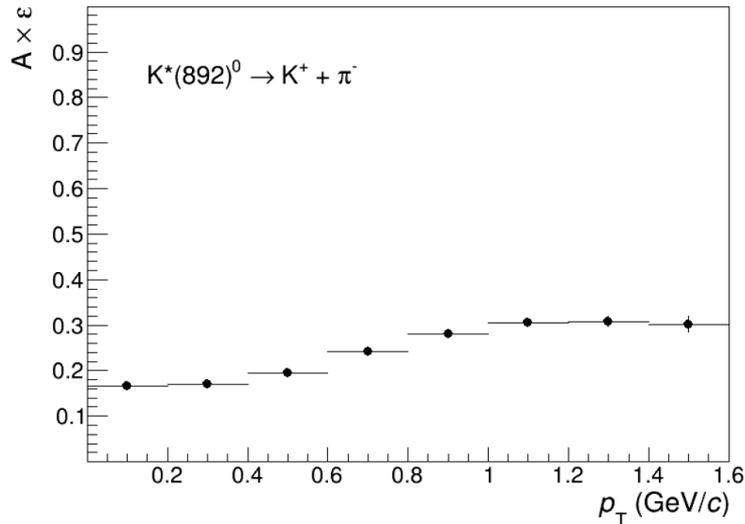
- Ограничение по p_T :

✓ $K^*(892)^0$: $p_T > 0$ ГэВ/с

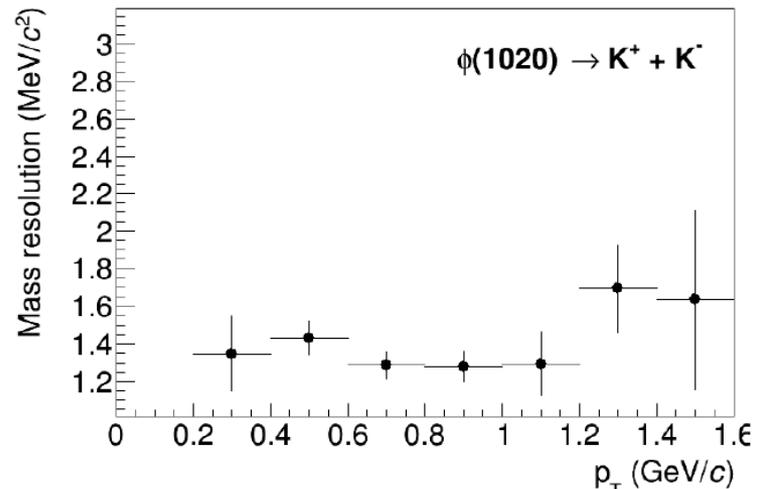
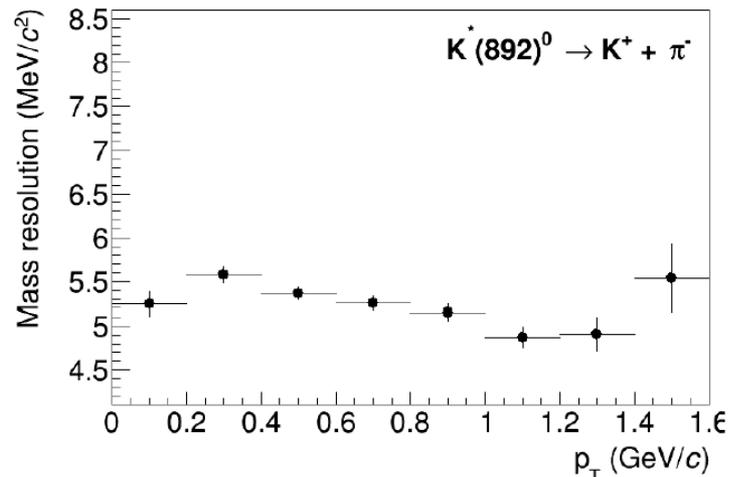
✓ ϕ : $p_T > \sim 0,2$ ГэВ/с

Эффективность регистрации и массовое разрешение

- Типичные эффективности восстановления ($A \times \epsilon$), $-1 < y < 0$



- Приемлемые значения эффективностей в широком диапазоне p_T , $-1 < y < 0$
- Измерения возможны начиная с 0 p_T для $K^*(892)^0$ и с 0,2 для $\phi(1020)$

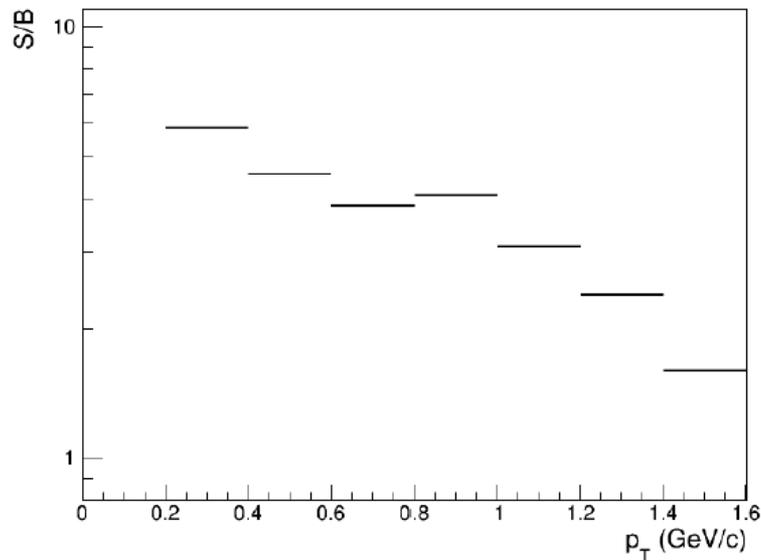
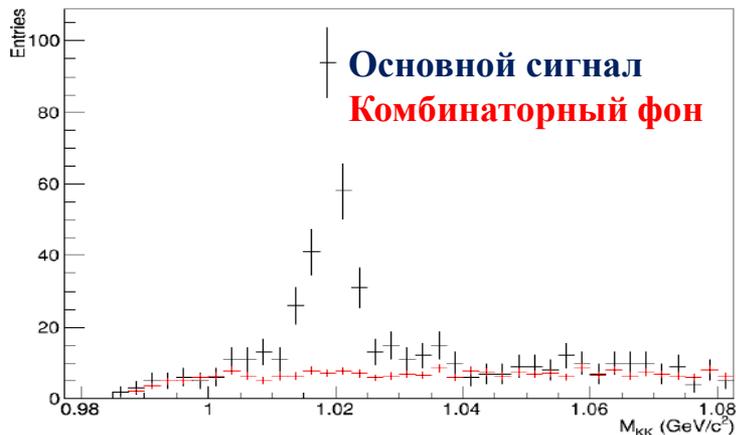


- Массовое разрешение достаточно хорошее для регистрации изменения спектра массы

$\phi(1020)$, ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПИКИ

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров

$$p_T = 0,4 - 0,6 \text{ ГэВ}/c, \phi(1020) \rightarrow K^+ + K^-, -1 < y < 0$$

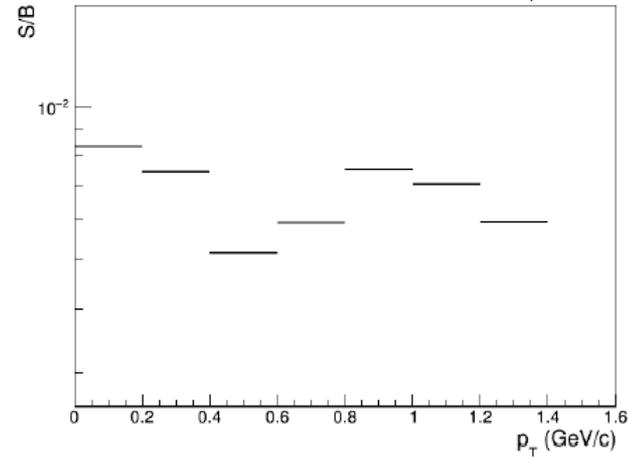
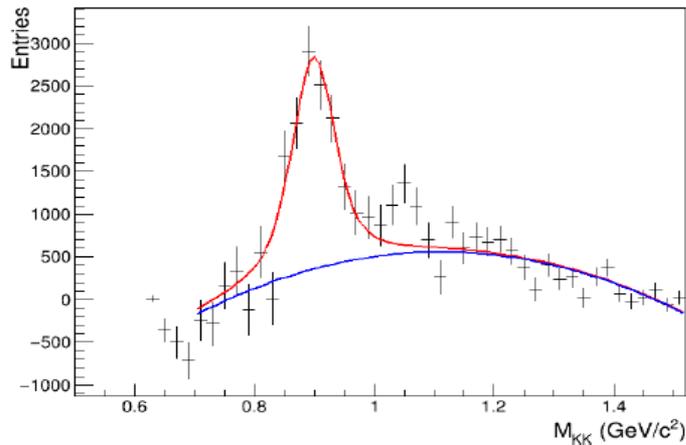
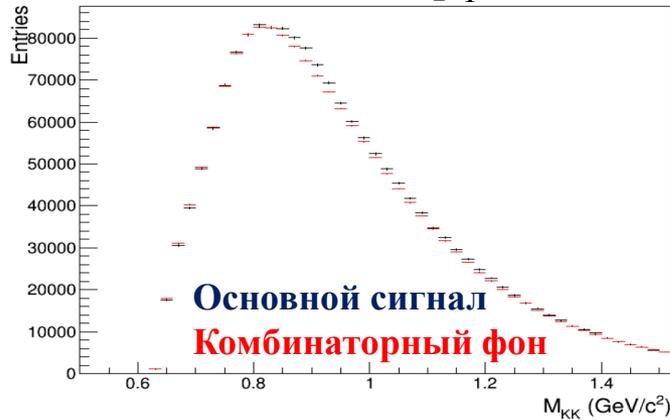


- Комбинаторный фон нормируется на распределение в области больших масс и вычитается
- Распределения аппроксимируются функцией Фойгта + полином (разрешение по массе фиксируется на оцененном значении, Γ – свободный параметр)
- Сигнал может быть восстановлен при $p_T > 0,2 \text{ ГэВ}/c$, верхний предел по p_T ограничен доступной статистикой

$K^*(892)^0$, восстановленные пики

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров

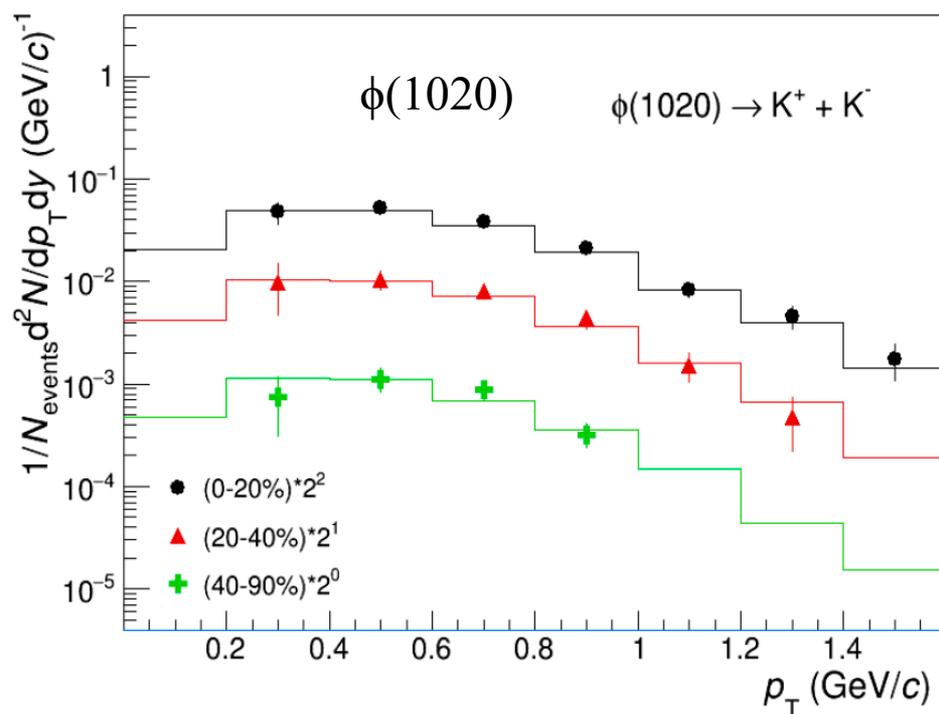
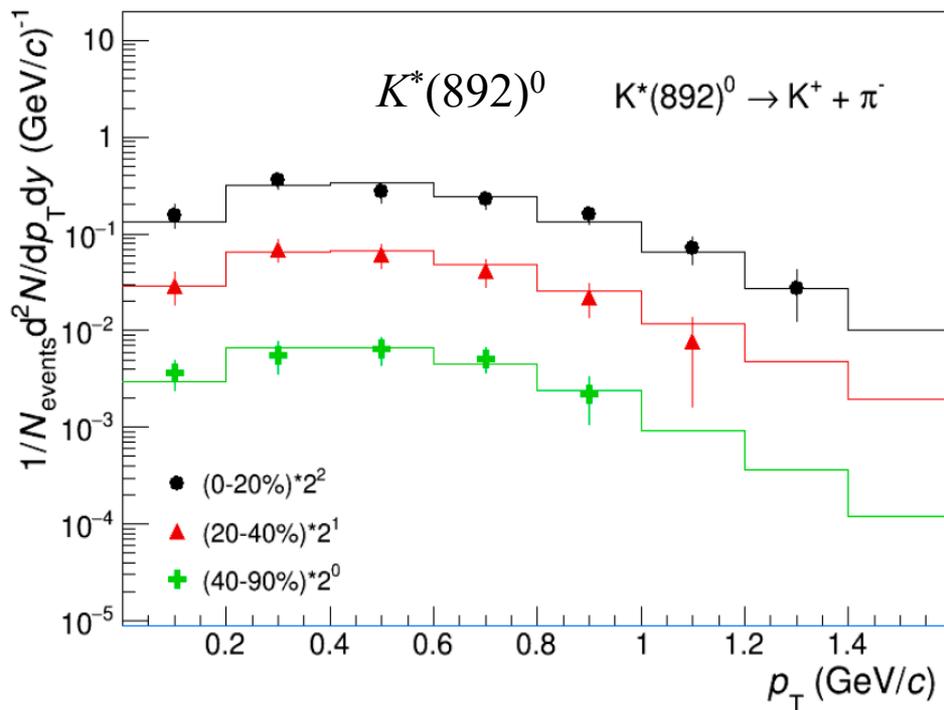
$$p_T = 0,2 - 0,4 \text{ ГэВ/с}, K^*(892)^0 \rightarrow K^+ + \pi^-, -1 < y < 0$$



- Комбинаторный фон нормируется на распределение в области больших масс и вычитается
- Распределения аппроксимируются функцией Фойгта + полином (разрешение по массе фиксируется на оцененном значении, Γ – свободный параметр)
- Сигнал может быть восстановлен при $p_T > 0$ ГэВ/с, верхний предел по p_T ограничен доступной статистикой

Спектры рождения и тест на замкнутость

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров, диапазоны ограничены возможностью извлечения сигналов, $-1 < y < 0$



- Реконструированные спектры совпадают со сгенерированными в пределах погрешностей
- Первые измерения резонансов в зависимости от центральности станут возможными при накоплении $\sim 10^8$ Xe+W@2,5A ГэВ столкновений
- Измерения возможно выполнить начиная с импульсов, близких к нулю \rightarrow регистрируется большая часть выхода, возможно зарегистрировать возможные модификации

Заключение

- Систематическое исследование рождения резонансов является важной частью физической программы MPD
 - ✓ Свойства адронной фазы, рождение странности, механизмы адронизации и коллективные эффекты, адронная химия, спиновая ориентация и др.
- Первые измерения рождения $K^*(892)^0$ и $\phi(1020)$ резонансов в зависимости от поперечного импульса и центральности возможно будет осуществить при набранной статистике $\sim 10^8$ в $\text{Xe}+\text{W}@2,5\text{A}$ ГэВ столкновений
- Измерения возможны начиная с малых импульсов (от 0 – 0,2 ГэВ/ c) с хорошим массовым разрешением \rightarrow высокая чувствительность к различным физическим явлениям, наиболее выраженным при малом p_T
- Дополняют результаты исследования других резонансов (ρ , $K^*(892)^\pm$, $\Sigma(1385)$ и т.д.) формируя картину рождения резонансов в $\text{Xe}+\text{W}@2,5\text{A}$ ГэВ столкновениях по завершению соответствующего исследования

Запасные

Структура анализа, идентификация пионов

- Смоделировано 15 миллионов $\text{Xe}+\text{W}@2,5\text{A}$ ГэВ столкновений генератором событий UrQMD 3.4 с настройками по умолчанию
- Взаимодействие частиц с веществом детектора MPD и трекинг – *MPDpdroot*
- Распады $\phi(1020) \rightarrow K^+K^-$ (~ 46) и $K^*(892)^0 \rightarrow K^+ + \pi^-$ (~ 4)
- Критерии отбора были оптимизированы с целью повышения значимости сигнала
- Отбор столкновений:
 - ✓ $|z_{\text{vrtx}}| < 130$ см, реалистичное распределение с $\sigma_z \sim 50$ см
- Базовый отбор треков:
 - ✓ Число точек ТРС > 24
 - ✓ $-1 < y_{\text{сцм}} < 0$
 - ✓ ТРС-ТОF идентификация в пределах $2-3\sigma$
 - ✓ $|\text{DCA}(x,y,z)| < 2\sigma$
 - ✓ Повторное восстановление треков в ТРС для частиц, идентифицированных каонами
- Комбинаторный фон:
 - ✓ Смешивание событий ($|\Delta_{Z\text{vrtx}}| < 2$ см, $|\Delta_{\text{Mult}}| < 20$, $N_{\text{ev}} = 10$)