



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

# Исследование рождения $\phi(1020)$ -, заряженных $K^*(892)$ - мезонов и заряженных $\Sigma(1385)$ -барионов в столкновениях ядер висмута при энергии 9,2 ГэВ в эксперименте MPD на ускорителе NICA

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

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,  
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

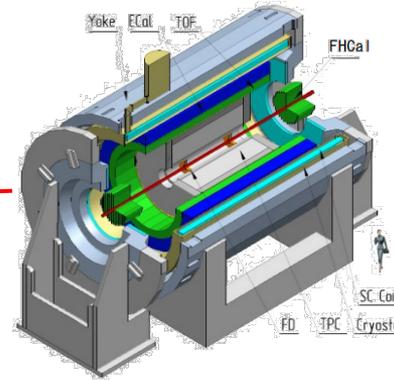
Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009)

21 Февраля 2025

# Эксперимент MPD на ускорителе NICA

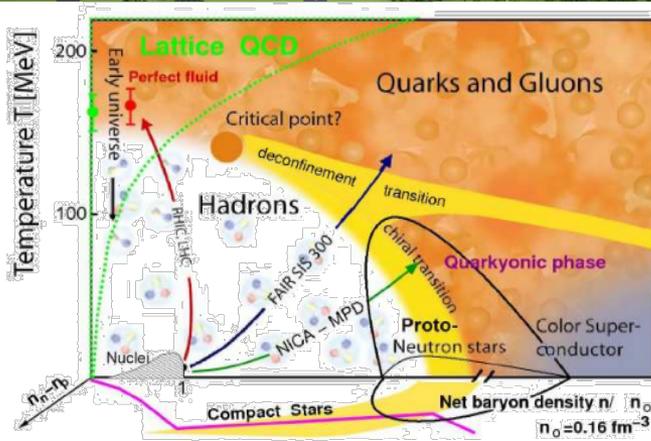


- Один из двух экспериментов на ускорителе NICA по изучению столкновений тяжелых ядер при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 4 - 11$  ГэВ

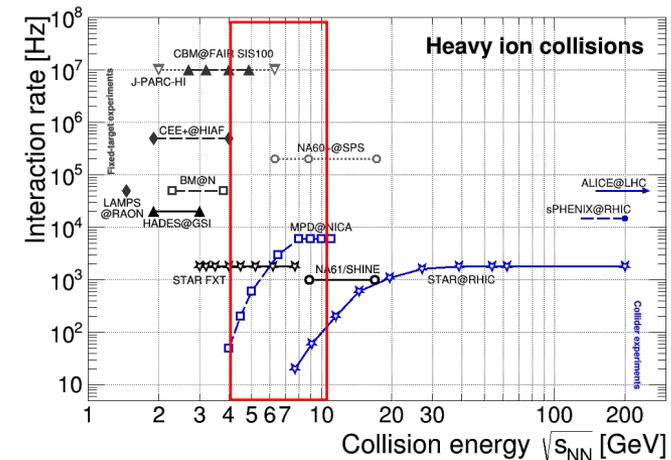
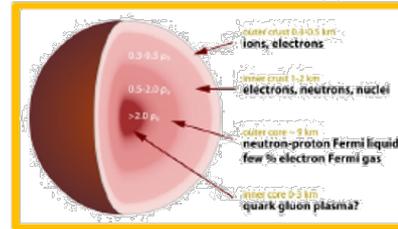


## Этап - I

- 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) и будущие эксперименты (CBM) в ~ одинаковой области энергий

# **Резонансы как пробники столкновений тяжелых ядер**

# Резонансы в столкновениях тяжелых ядер

- Наиболее часто/легко измеряемые резонансы:



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

- Свойства резонансов в вакууме измерены достаточно хорошо ( $m$ ,  $\tau$ , 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,  $\phi$  обладает скрытой странностью и является одним из ключевых пробников
  - ✓ динамики реакций и форма спектров по  $p_T$ ,  $p/K^*$ ,  $p/\phi$  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  $\longrightarrow$

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

Восстанавливаемые выходы резонансов в столкновениях тяжелых ядер определяются

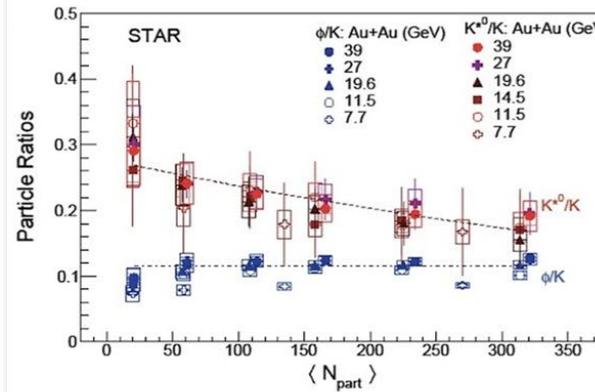
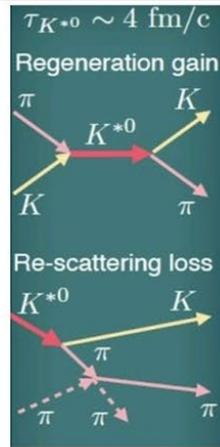
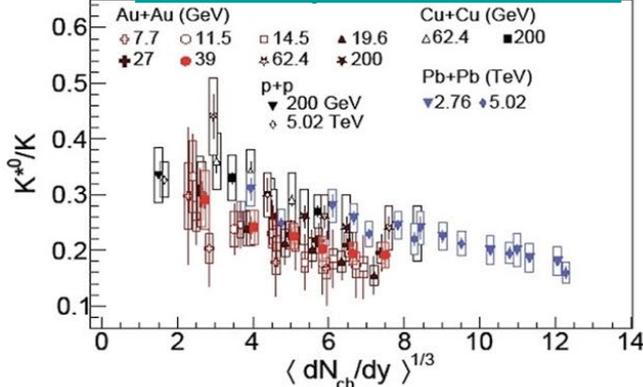
✓ Выходами резонансов при химической заморозке

✓ 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)

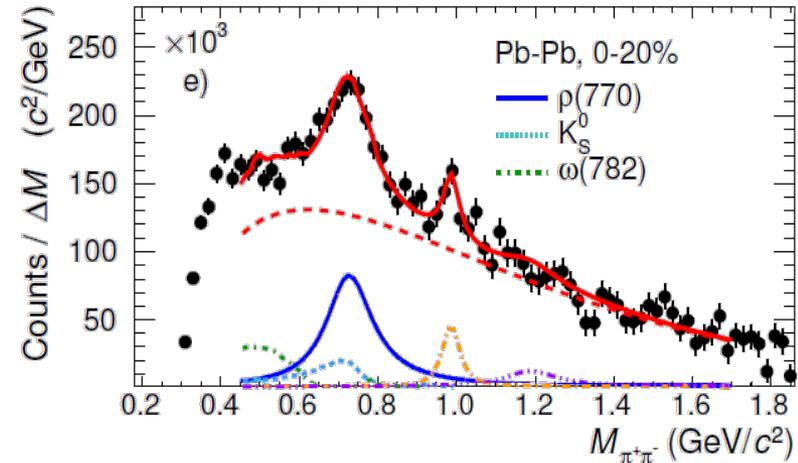
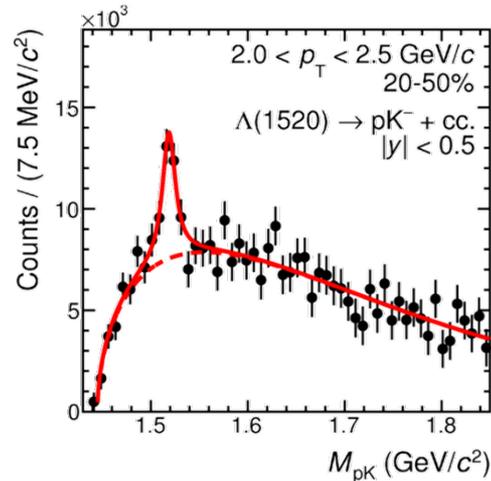
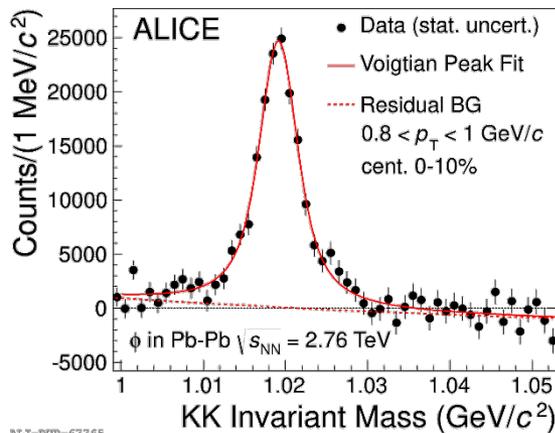


• Точные измерения на установке NICA необходимы для проверки описания адронной фазы в моделях.

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

# Восстановление резонансов

- Свойства адронных резонансов восстанавливают 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  $\phi$ ,  $\Lambda(1520)$  и  $\rho(770)^0$ :

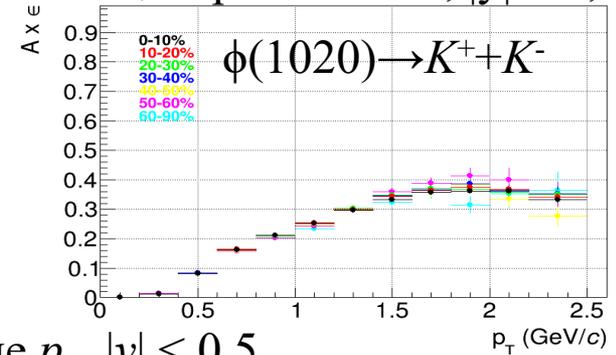
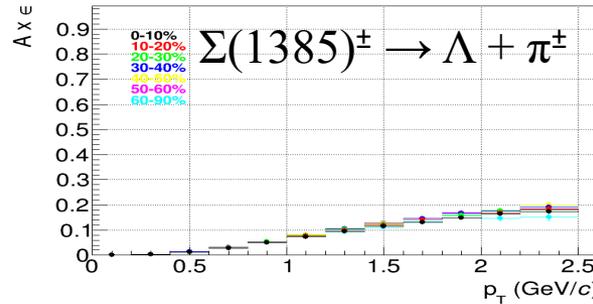
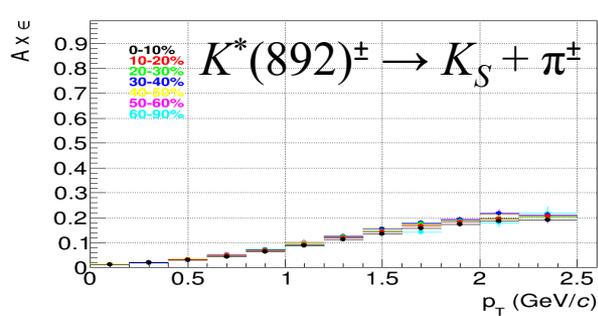


- В большинстве случаев модели пиков основаны на теории и результатах измерений в элементарных столкновениях  $e^+e^-$  и/или  $pp$ , где эффекты среды не столь значительны.
- Модификации в среде могут приводить к изменению измеряемого выхода и масс/ширин резонансов.

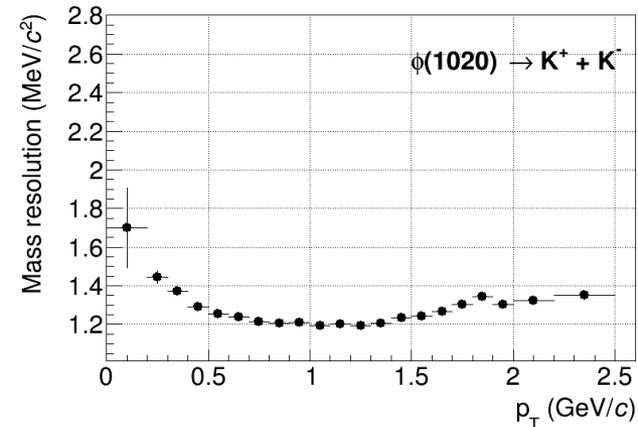
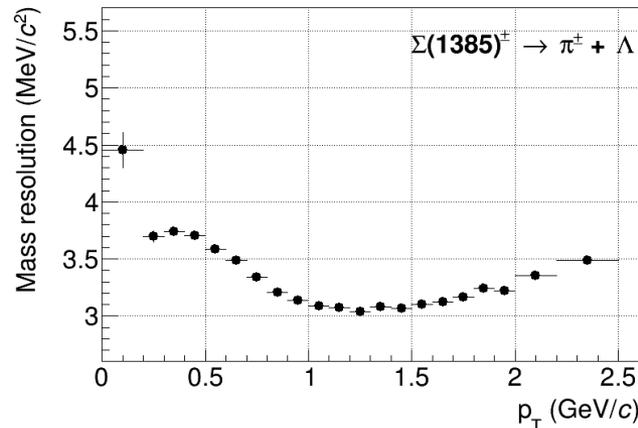
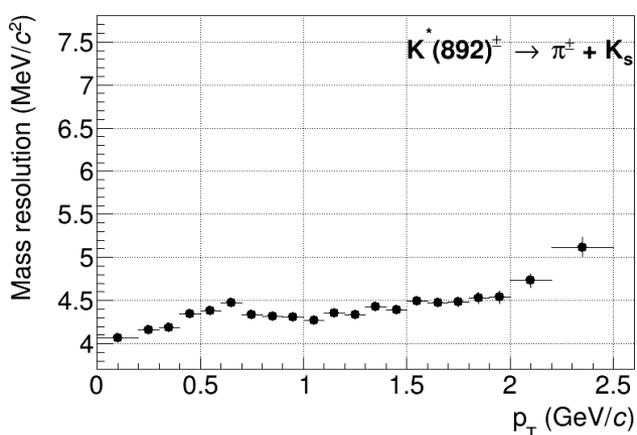
**Возможности MPD измерять  $\phi(1020)$ ,  
 $K^*(892)^\pm$  и  $\Sigma(1385)^\pm$  в  $V_i + V_i$  при  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$   
ГэВ**

# Эффективность регистрации и массовое разрешение

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления событий с использованием UrQMD v.3.4 (BiBi@9,2, 50 млн событий)
- Прохождение частиц через MPD посредством MPDroot (Geant v.4):
  - ✓ реалистичное моделирование отклика подсистем
  - ✓ восстановление треков
- Типичные эффективности восстановления ( $A \times \epsilon$ ) при различных центральностях,  $|y| < 0,5$



- Приемлемые значения эффективностей в широком диапазоне  $p_T$ ,  $|y| < 0,5$
- Измерения возможны начиная с 0  $p_T$  для  $K^*(892)^\pm$  и с 0,2 – 0,4 ГэВ/с для  $\phi(1020)$  и  $\Sigma(1385)^\pm$
- Умеренная зависимость от центральности

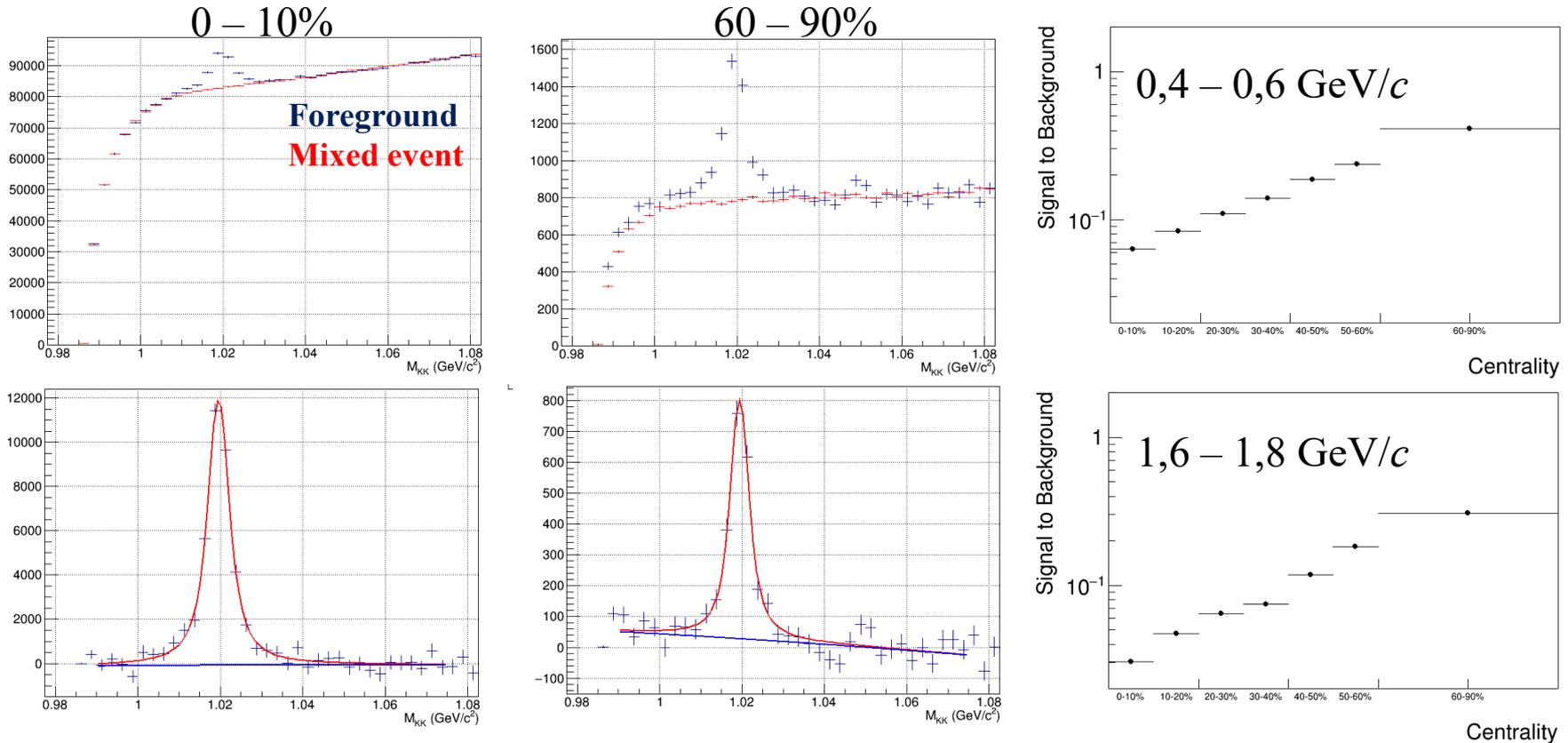


- Массовое разрешение достаточно хорошее для регистрации изменения спектра массы

# $\phi(1020)$ , ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПИКИ

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров

$$p_T = 0,4 - 0,6 \text{ GeV}/c, \phi(1020) \rightarrow K^+ + K^-, |y| < 0,5$$

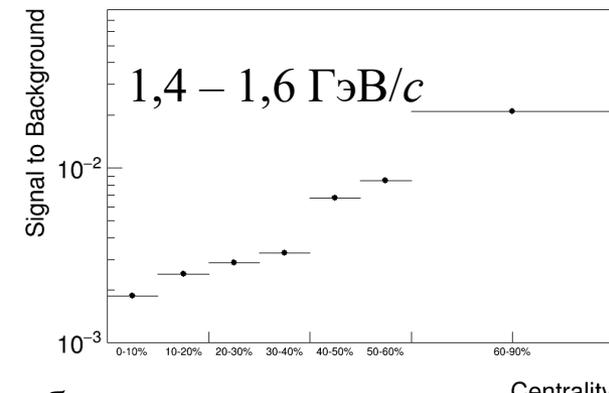
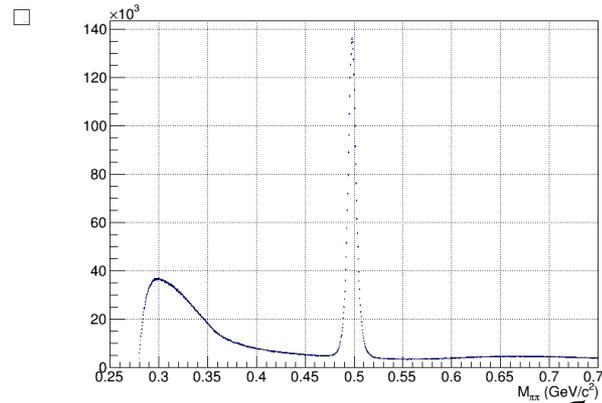
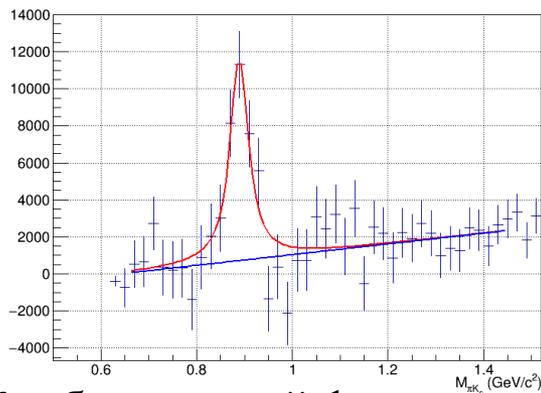
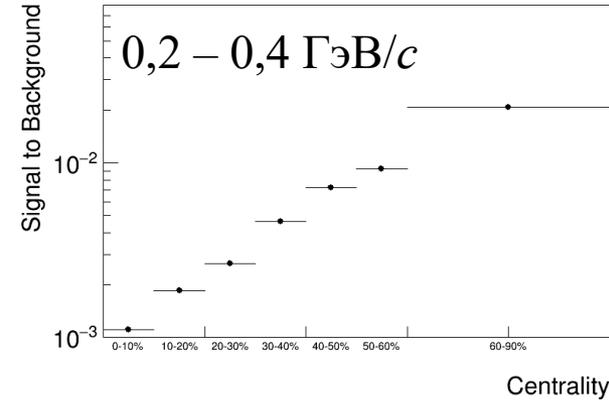
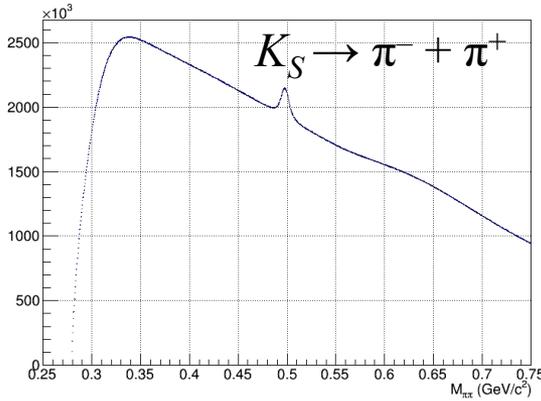
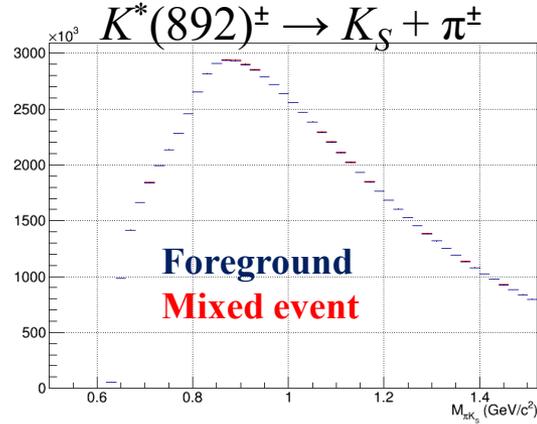


- Комбинаторный фон нормируется на распределение в области больших масс и вычитается
- Распределения аппроксимируются функцией Фойгта + полином (разрешение по массе фиксируется на оцененном значении,  $\Gamma$  – свободный параметр)
- Сигнал может быть восстановлен при  $p_T > 0,2 \text{ ГэВ}/c$ , верхний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

# $K^*(892)^\pm$ , ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПИКИ

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров

$$p_T = 0,2 - 0,4 \text{ GeV}/c, K^*(892)^\pm \rightarrow K_S + \pi^\pm (K_S \rightarrow \pi^- + \pi^+), |y| < 0,5$$

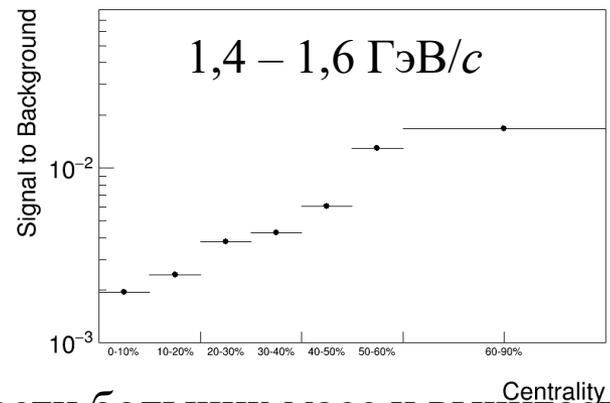
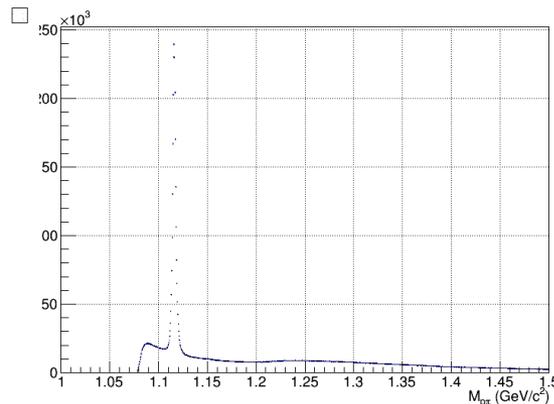
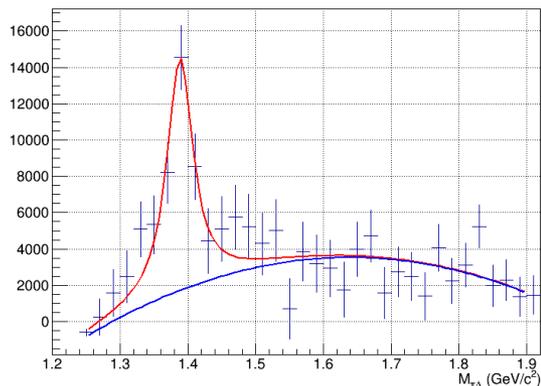
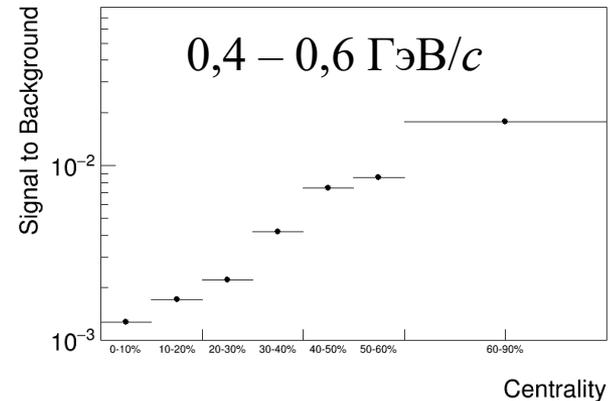
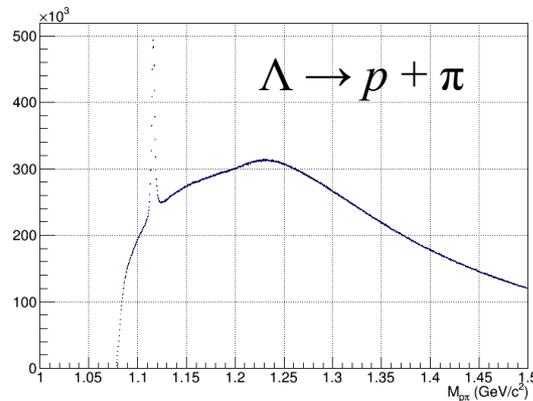
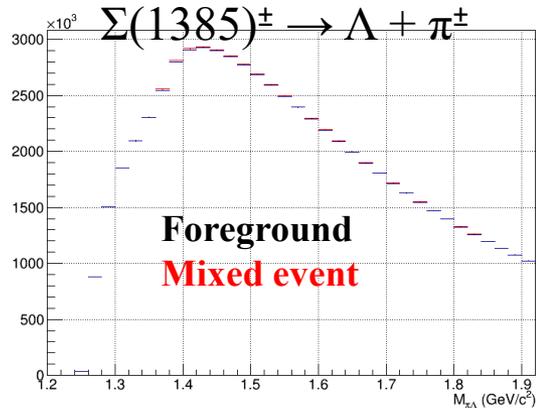


- Комбинаторный фон нормируется на распределение в области больших масс и вычитается
- Распределения аппроксимируются функцией Фойгта + полином (разрешение по массе фиксируется на оцененном значении,  $\Gamma$  – свободный параметр)
- Сигнал может быть восстановлен при  $p_T > 0$  ГэВ/с, верхний предел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

# $\Sigma(1385)^\pm$ , ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПИКИ

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров

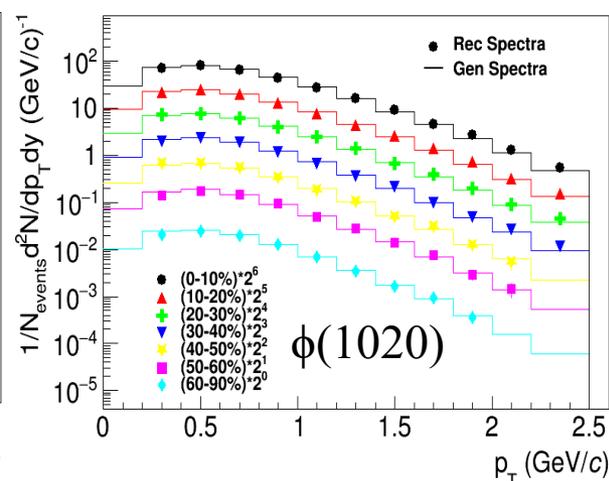
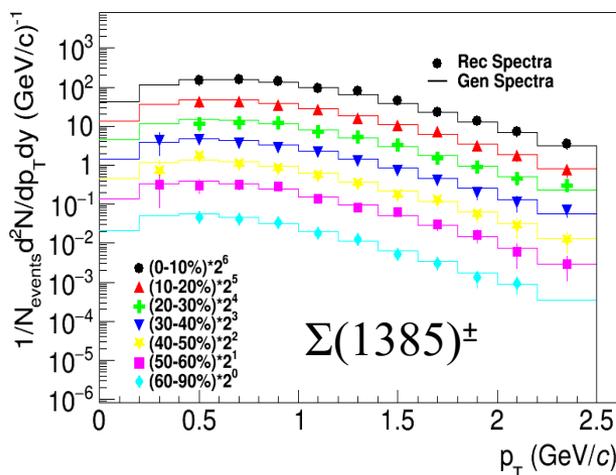
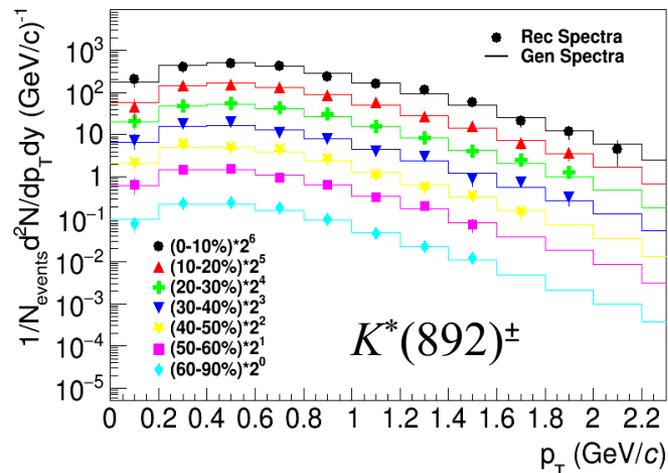
$$p_T = 0,6 - 0,8 \text{ GeV}/c, \Sigma(1385)^\pm \rightarrow \Lambda + \pi^\pm (\Lambda \rightarrow p + \pi), |y| < 0,5$$



- Комбинаторный фон нормируется на распределение в области больших масс и вычитается
- Распределения аппроксимируются функцией Фойгта + полином (разрешение по массе фиксируется на оцененном значении,  $\Gamma$  – свободный параметр)
- Сигнал может быть восстановлен при  $p_T > 0,2$  ГэВ/с в полу-центральных и  $p_T > 0,4$  ГэВ/с в центр. и перифир. столкновениях, верхний предел по  $p_T$  ограничен доступной статистикой
- Отношение сигнал/фон ухудшается с увеличением центральности

# Спектры рождения и тест на замкнутость

- Полная последовательность модельных расчетов и восстановления параметров, диапазоны ограничены возможностью извлечения сигналов,  $|\gamma| < 0,5$



- Реконструированные спектры совпадают со сгенерированными в пределах погрешностей
- Первые измерения резонансов в зависимости от центральности станут возможными при накоплении  $\sim 10^8$   $\text{Vi+Vi}@9,2$  ГэВ столкновений
- Измерения возможно выполнить начиная с импульсов, близких к нулю  $\rightarrow$  регистрируется большая часть выхода, возможно зарегистрировать возможные модификации

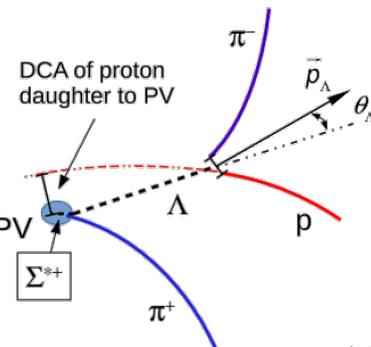
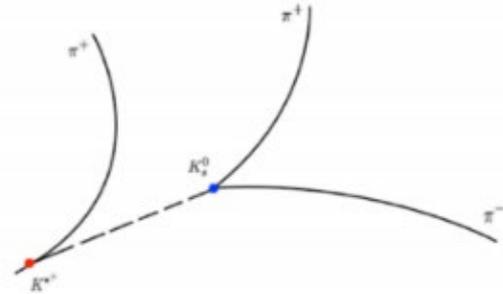
# Заключение

- 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  $K^*(892)^\pm$ ,  $\Sigma(1385)^\pm$ ,  $\phi(1020)$  резонансов в зависимости от поперечного импульса и центральности возможно будет осуществить при набранной статистике  $\sim 10^8$   $W_i + W_i$  столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ
- Измерения возможны начиная с малых импульсов (от 0 – 0,4 ГэВ/c) с хорошим массовым разрешением  $\rightarrow$  высокая чувствительность к различным физическим явлениям, наиболее выраженным при малом  $p_T$
- Дополняют результаты исследования других резонансов ( $\rho$ ,  $K^*(892)^0$  и т.д.) формируя картину рождения резонансов в  $W_i+W_i$  столкновений при  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ

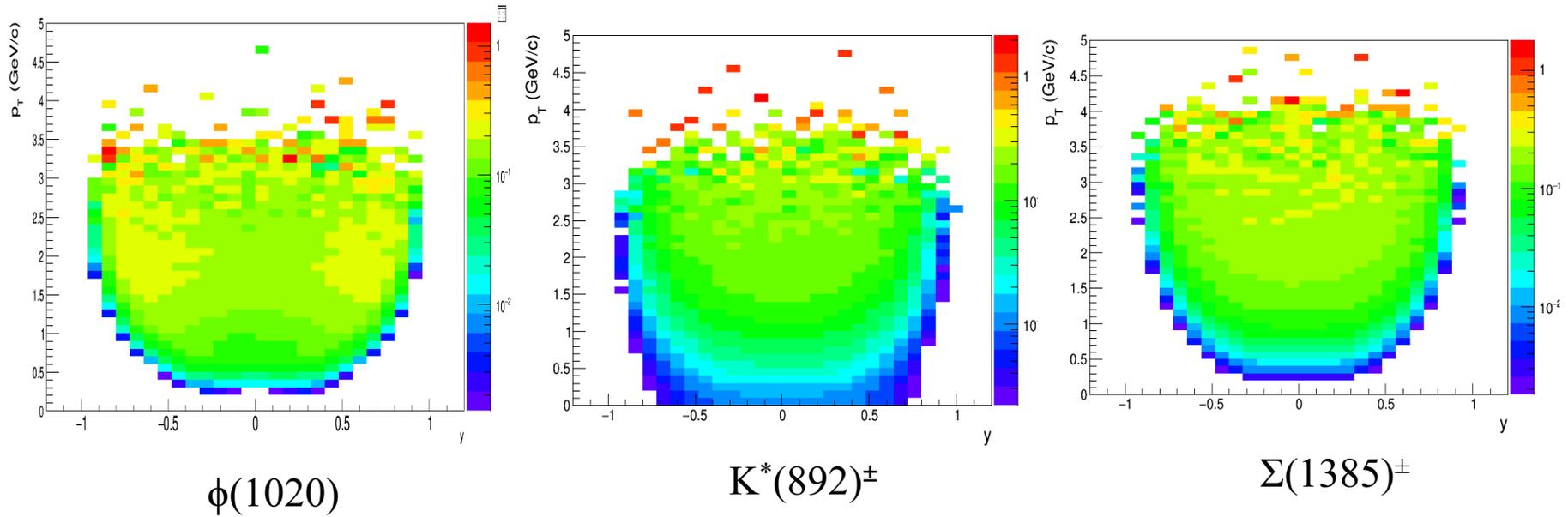
# Запасные

# Структура анализа

- Смоделировано 50 миллионов  $\text{Vi+Vi}$  столкновений при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 9,2$  ГэВ генератором событий UrQMD 3.4 с настройками по умолчанию
- Взаимодействие частиц с веществом детектора MPD и трекинг – *MPDpdroot*
- Распады  $\phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$  ( $\sim 46$ ) и с каскадными модами распада (с наличием вторичной вершины распада):  $K^*(892)^\pm$  ( $\sim 4$ )  $\rightarrow K_S + \pi^\pm$  ( $K_S \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ),  $\Sigma(1385)^\pm$  ( $\sim 5$ )  $\rightarrow \Lambda + \pi^\pm$  ( $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ) были восстановлены объединением в пары сразу или после восстановления вторичной вершины всех дочерних частиц в пределах события.
- Критерии отбора были оптимизированы с целью повышения значимости сигнала
- Отбор столкновений:
  - ✓  $|z_{\text{vtx}}| < 130$  см, реалистичное распределение с  $\sigma_z \sim 50$  см
- Базовый отбор треков:
  - ✓ Число точек TPC  $> 10$
  - ✓  $|\eta| < 1$
  - ✓  $p_T > 100$  МэВ/с
  - ✓ TPC-TOF идентификация в пределах  $2\sigma$
  - ✓ Повторное восстановление треков в TPC для частиц, идентифицированных каонами и протонами
- Основные треки:
  - ✓  $|\text{DCA}(x,y,z)| < 2\sigma$
- Пары:
  - ✓  $|y| < 0,5$
  - ✓ Дополнительные критерии отбора  $\Lambda$  и  $K_S$  + ассоциация с первичной вершиной PV
- Комбинаторный фон:
  - ✓ Смешивание событий ( $|\Delta_{z_{\text{vtx}}}| < 2$  см,  $|\Delta_{\text{Mult}}| < 20$ ,  $N_{\text{ev}} = 10$ )



# Эффективности восстановления 2D



- Приемлемые эффективности в широком диапазоне  $p_T$ ,  $|y| < 0,5$
- Измерения осуществимы начиная с 0 импульсов для  $K^*(892)^\pm$  и с 0,2 – 0,4 ГэВ/с для  $\phi(1020)$  и  $\Sigma(1385)^\pm$