



Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
имени М.В.Ломоносова

# Оценка влияния ядерной среды на рождение странных частиц в столкновениях $p$ - $A$ , $d$ - $A$ и $A$ - $A$ при энергиях эксперимента STAR

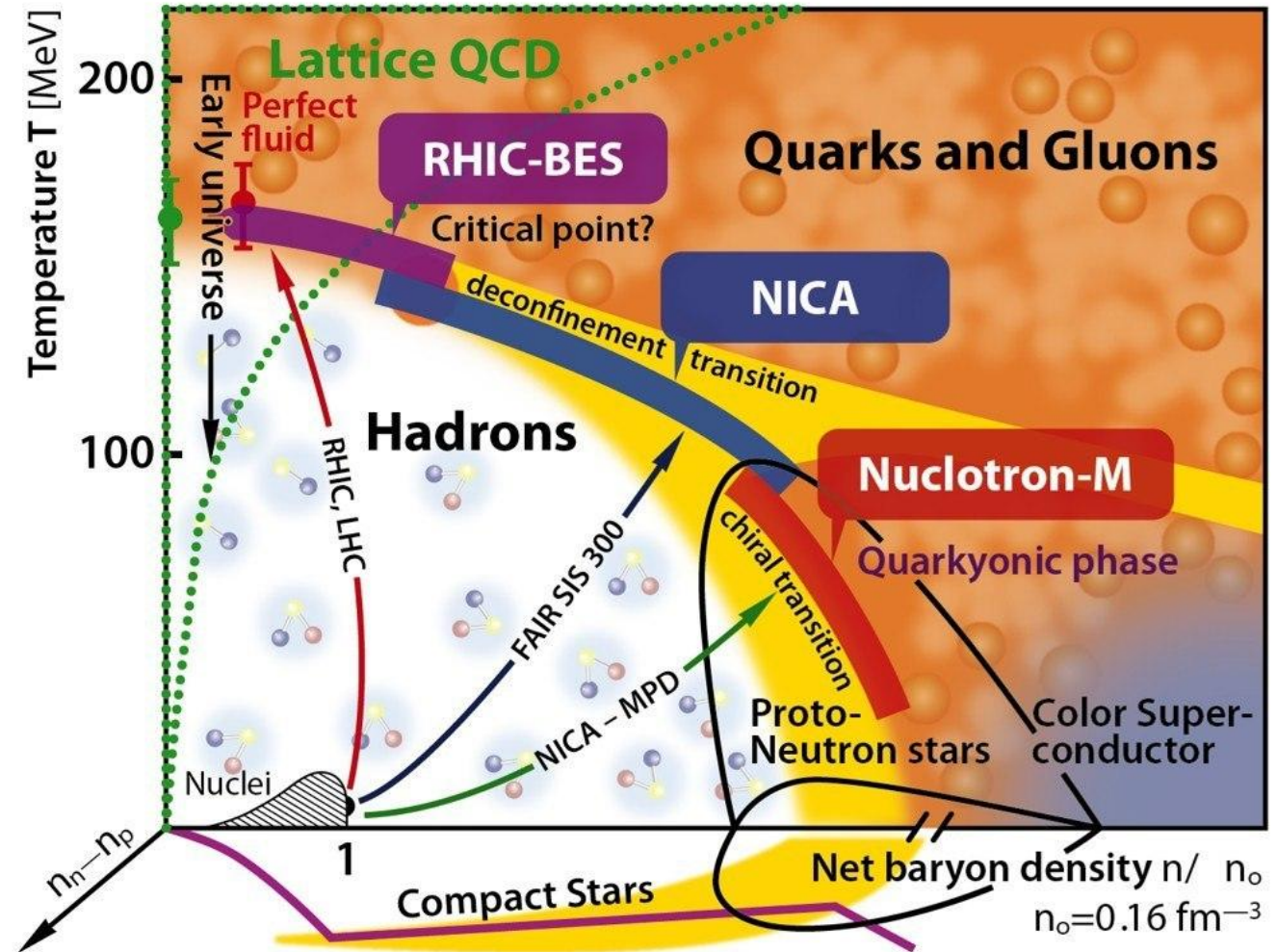
Выполнил студент 609 группы Карташов Никита Янович  
Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. Теряев Олег Валерианович  
Научный консультант: к. ф.-м. н. Апарин Алексей Андреевич

Дубна, 29 мая 2026



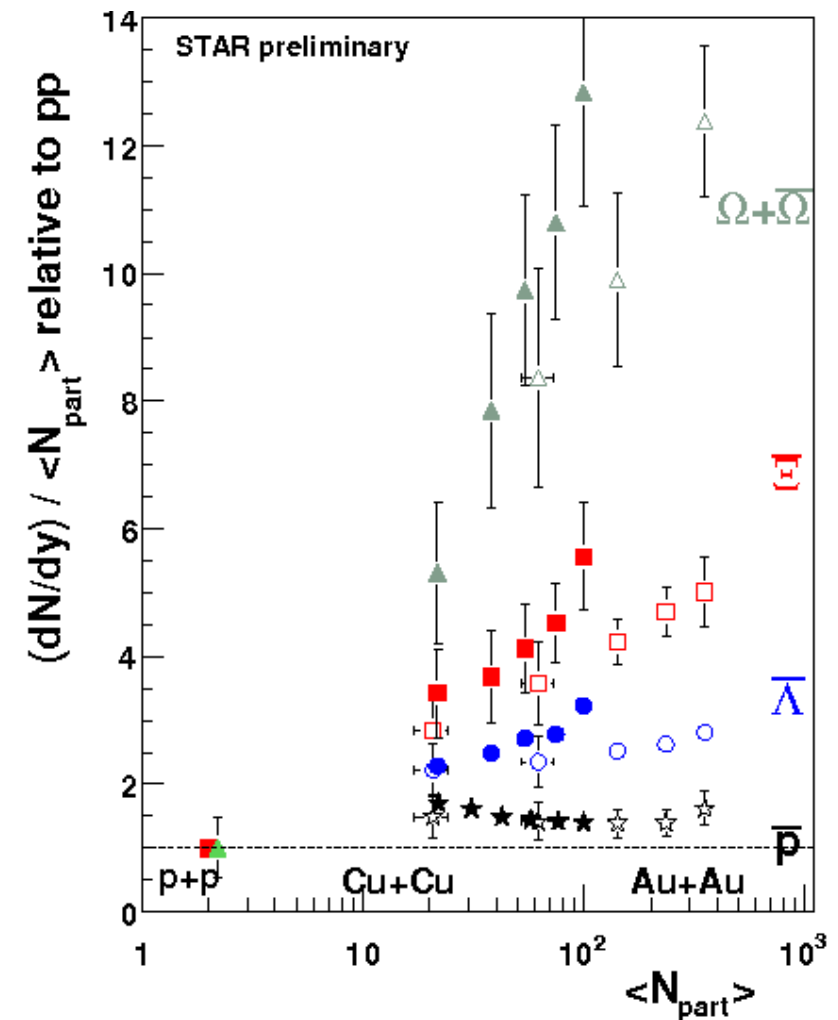
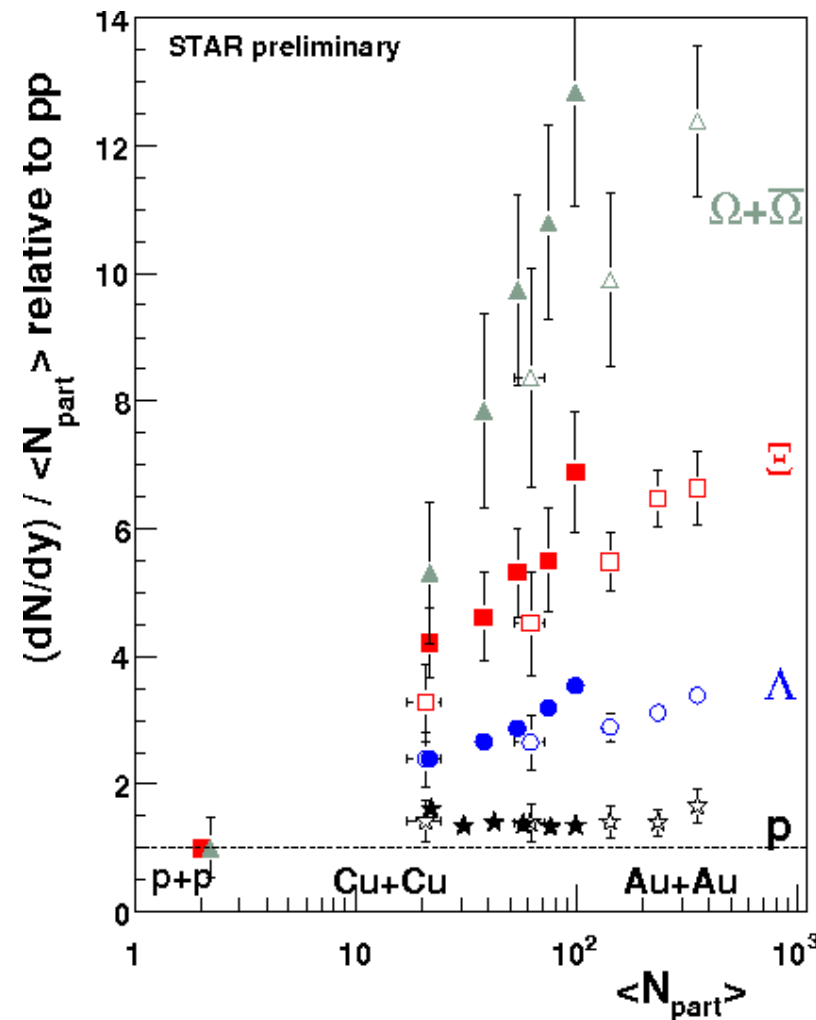
# Введение: КХД и КГП

- Квантовая хромодинамика (КХД):
  - Асимптотическая свобода - ослабление связи на малых расстояниях
  - Конфайнмент - кварки не наблюдаются в свободном состоянии
- Кварк-глюонная плазма:
  - Состояние деконфайнмента кварков и глюонов
  - Существовала в ранней Вселенной ( $\sim 10^{-6}$  с после Большого взрыва)
  - Воспроизводится на ускорителях RHIC, LHC



# Странные частицы как сигнатура КГП

- В момент до столкновения странные частицы отсутствуют
- Странные частицы крайне чувствительны к условиям, создающимся на ранних этапах столкновения

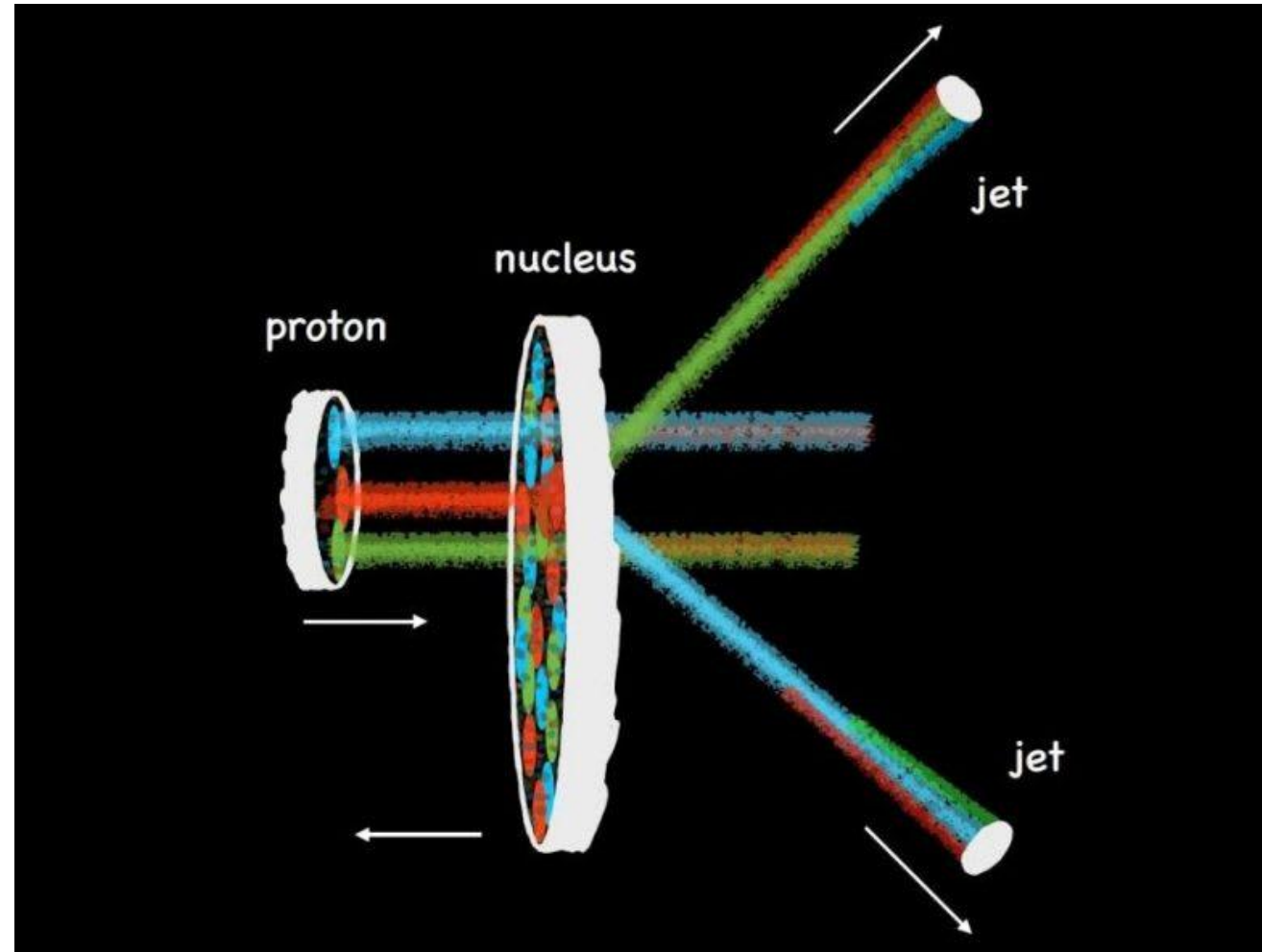


Ref: J. Takahashi, R. Derradi de Souza, Strangeness production in STAR, 24th Winter Workshop on Nuclear Dynamics, South Padre Island, Texas, 2008



# Ассиметричные системы

- На выход конечных продуктов столкновения, помимо эффектов КГП, влияние оказывают модификации функций партонных распределений, множественное перерассеяние, EMC-эффект
- В столкновениях  $p(d) + A$  не ожидается образование КГП
- Эксперименты по столкновениям  $p(d) + A$  позволяют выделить влияние эффектов, не связанных с образованием кварк-глюонной плазмы



# UrQMD

- UrQMD (Ultra-relativistic Quantum Molecular Dynamics) – это транспортная модель, предназначенная для описания столкновений тяжелых ионов, протон-ионных, и протон-протонных столкновений в широком диапазоне  $\sqrt{s_{NN}} \sim 0.1 - 5000$  ГэВ.
- Основная идея – прослеживает эволюцию системы во времени и пространстве через последовательность элементарных процессов (адронные перерассеяния).
- Основные принципы:
  - Между столкновениями частицы двигаются по классическим траекториям (уравнения Гамильтона)

$$\varphi_j(x_j, t) = \left(\frac{2\alpha}{\pi}\right)^{3/4} \exp \left[ -\alpha(x_j - r_j(t))^2 + \frac{i}{h} p_j(t) \cdot x_j \right]$$

- Реализуется широкий набор процессов: упругие / неупругие рассеяния, рождение и поглощение резонансов, струны.
- 2 режима работы: **Cascade** (взаимодействие только при столкновении) и **Potential** (взаимодействие засчет потенциальных полей соседей)



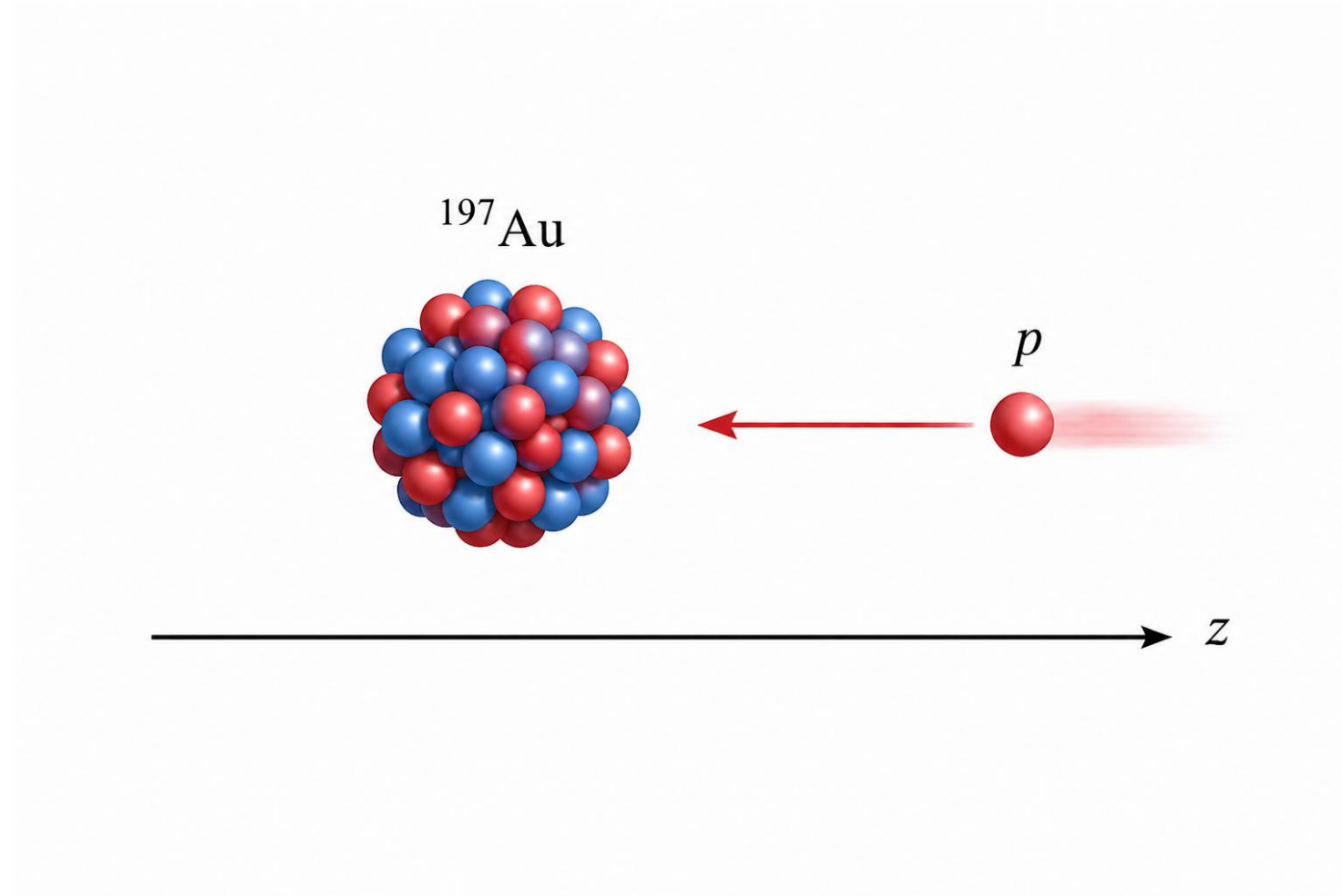
# Сгенерированные данные

UrQMD 4.0, CASCADE mode,  
EoS = 0

p+p, p+Au, d+Au

$\sqrt{s_{NN}} = 27, 19.6, 14.6, 11.5, 7$  ГэВ

Для каждой системы и  
энергии сгенерировано  
~3-4 млн событий



# Отбор событий и центральность

Геометрия:

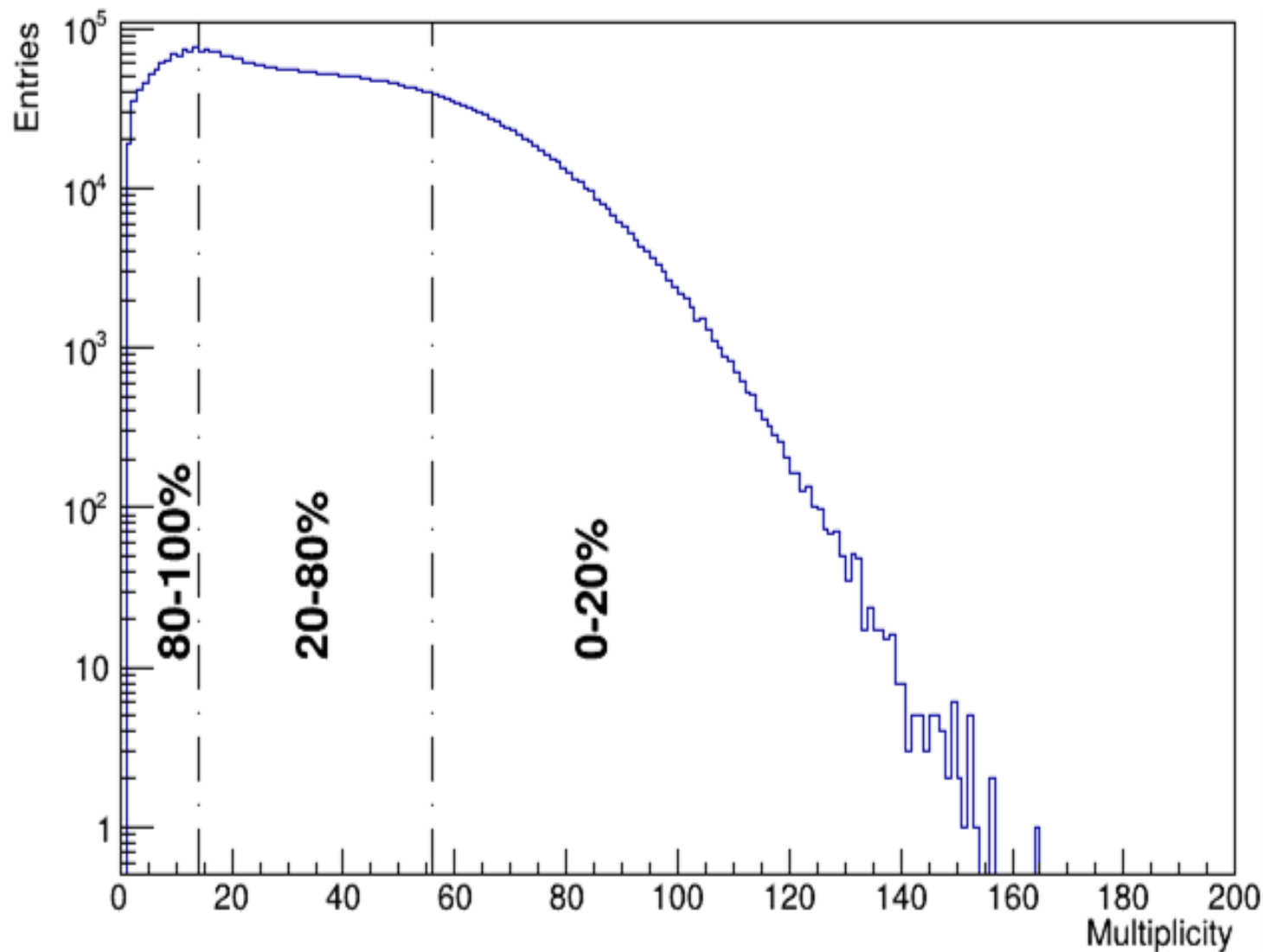
d(p)+Au - фиксированная мишень

Отобраны частицы, летящие вперед ( $\eta < -0.5$ )

На протоны наложено дополнительное ограничение по быстроте  $\eta > \eta_{spectator}$

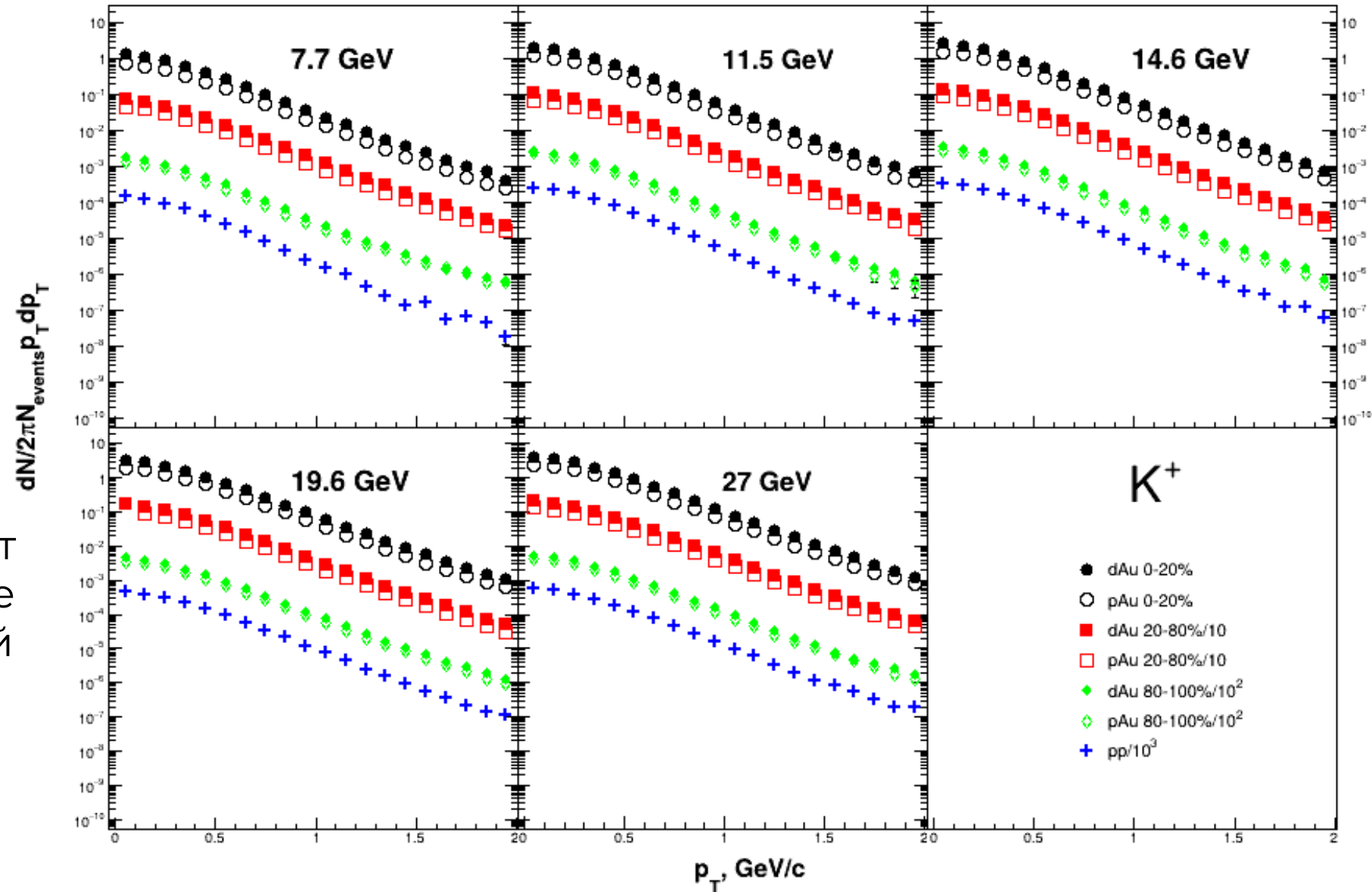
Отбор по центральности - множественность заряженных частиц ( $\pi$ , K, p)

Классы центральности - 0-20%, 20-80%. 80-100%

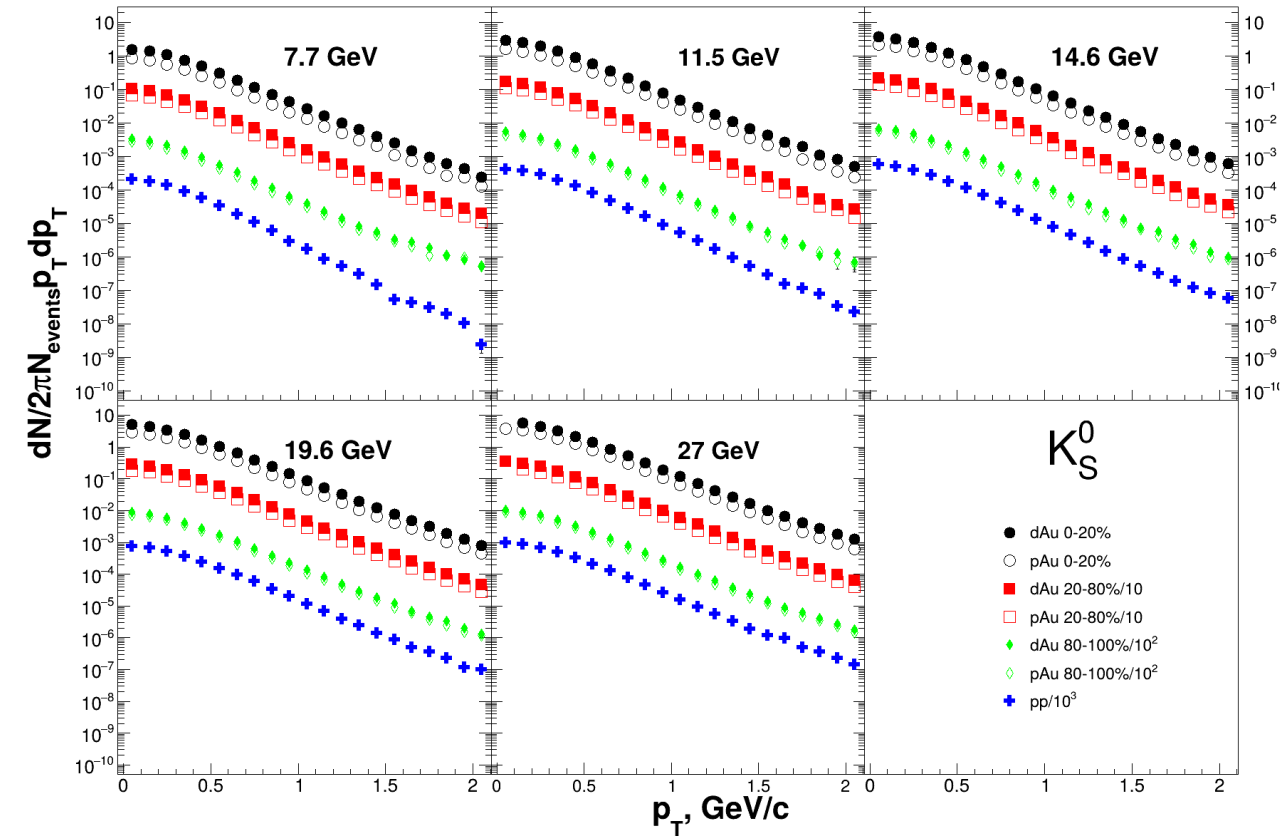
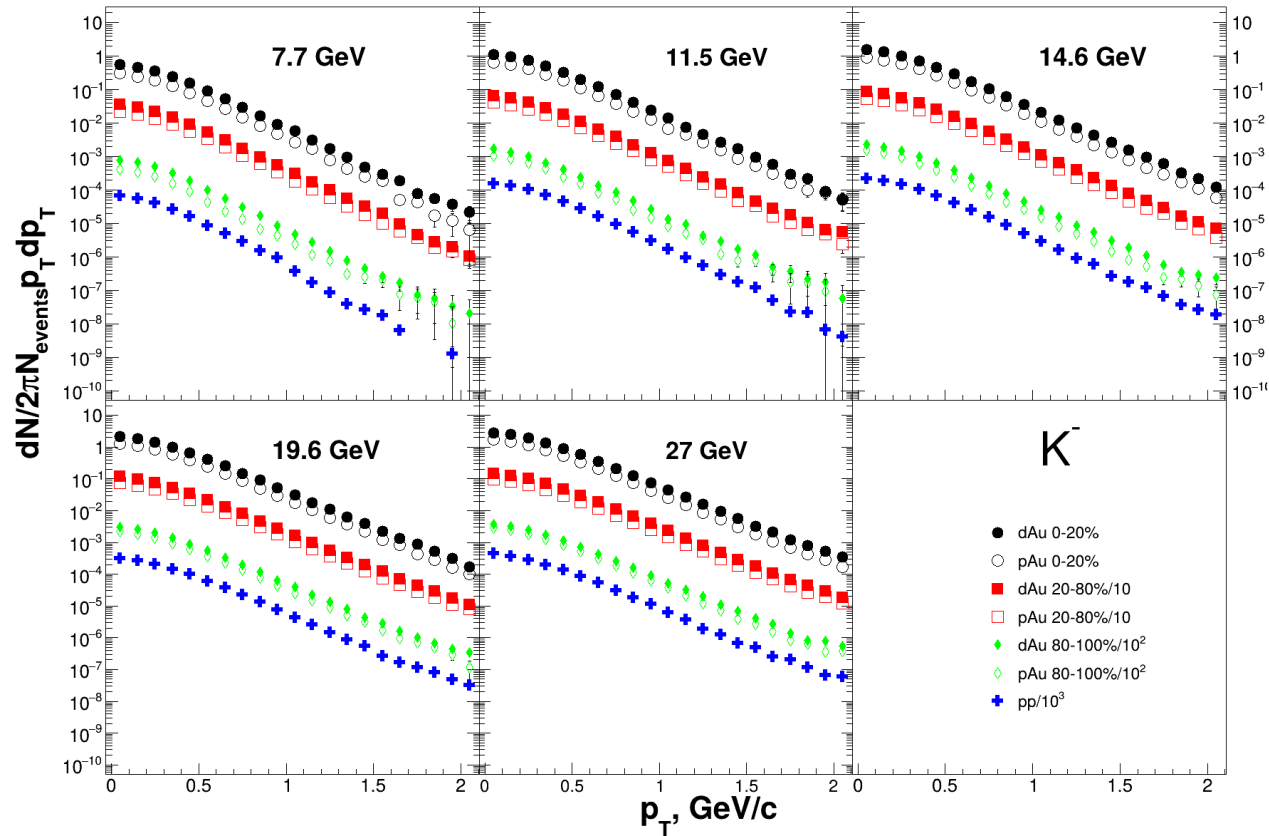


# Спектры поперечного импульса

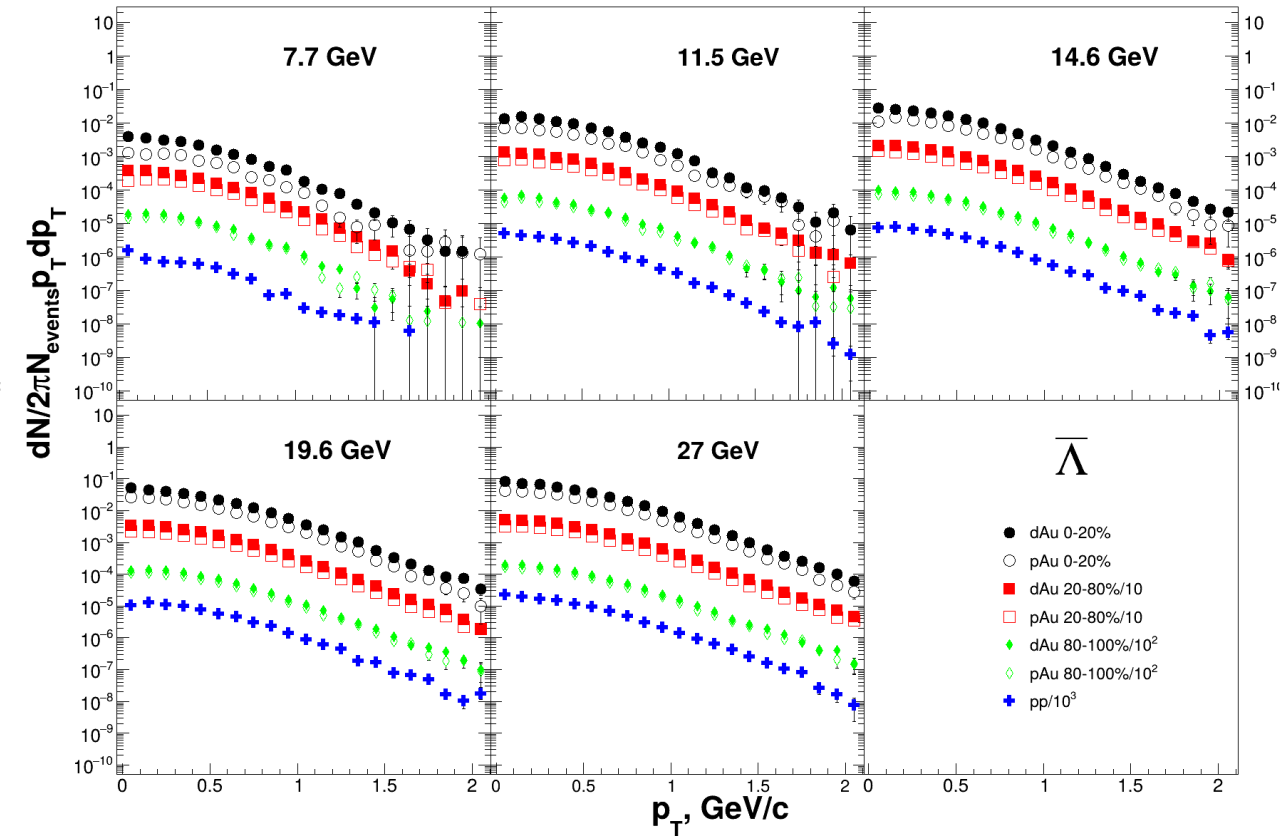
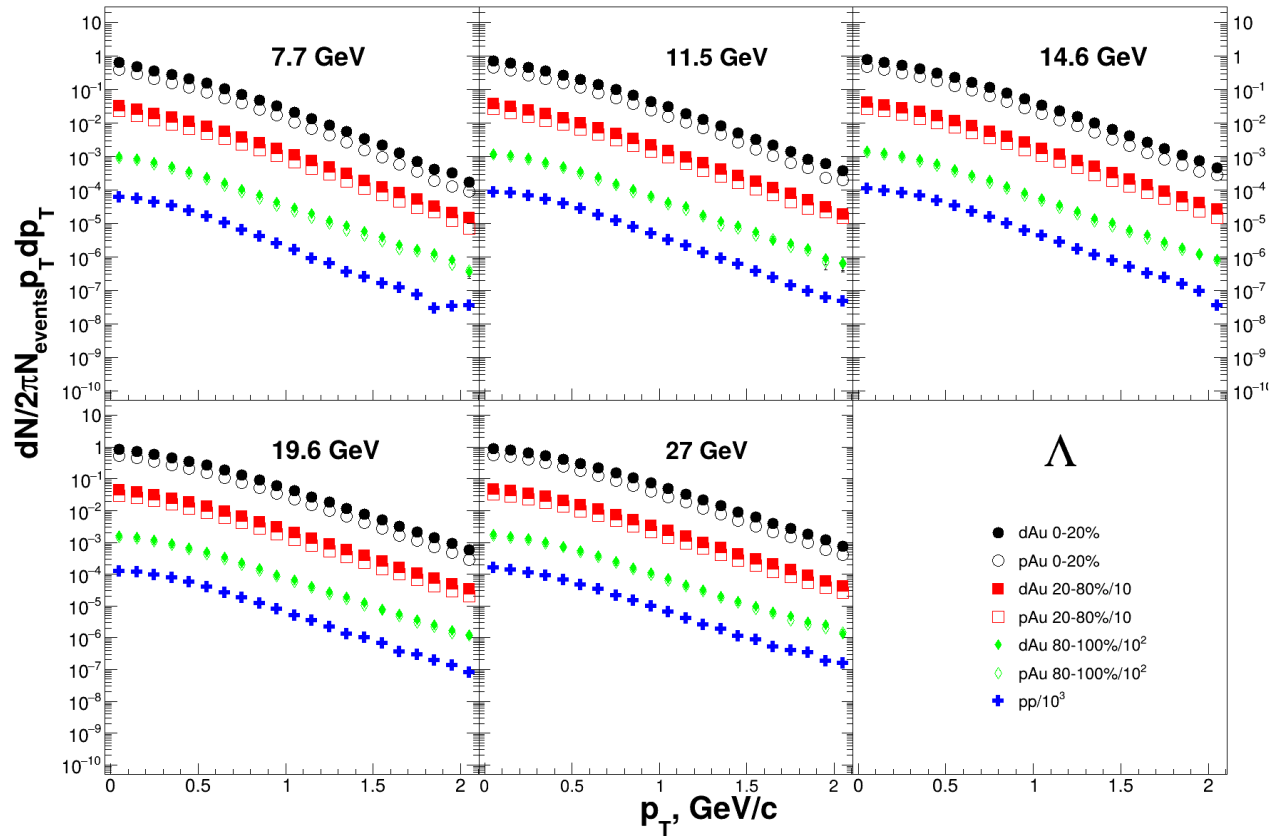
- Спектры для разных центральностей нормированы на степени 10 для читаемости
- Спектры показывают типичное поведение – экспоненциальный спад выхода с ростом  $p_T$



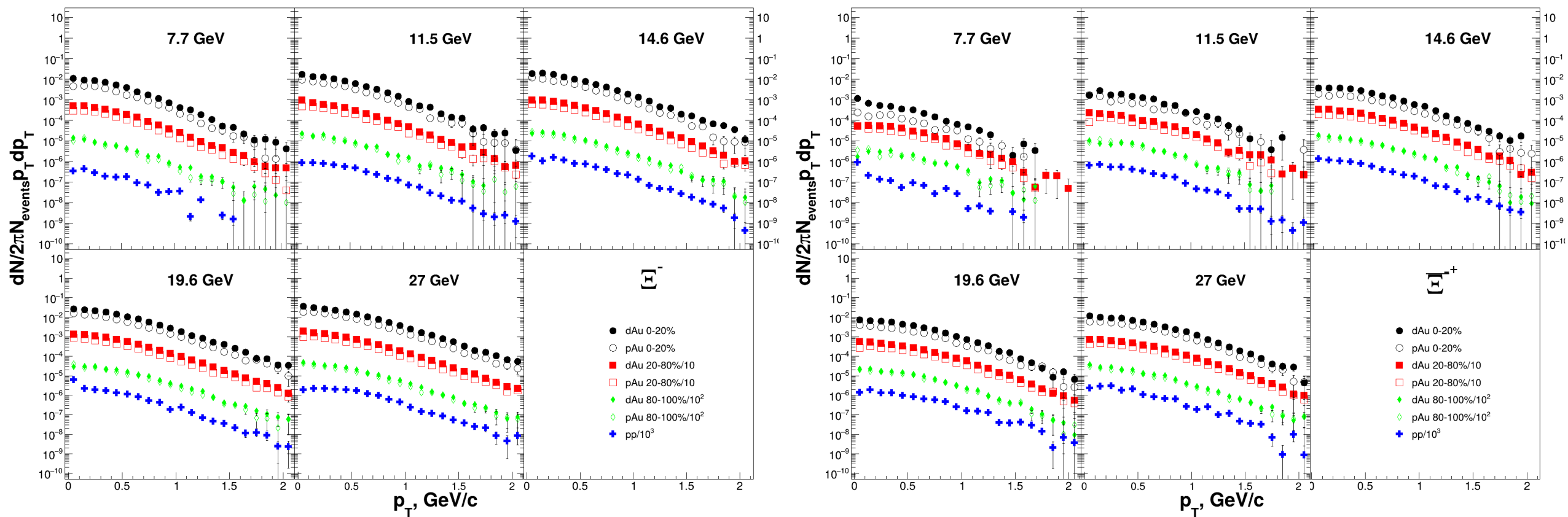
# Спектры поперечного импульса



# Спектры поперечного импульса

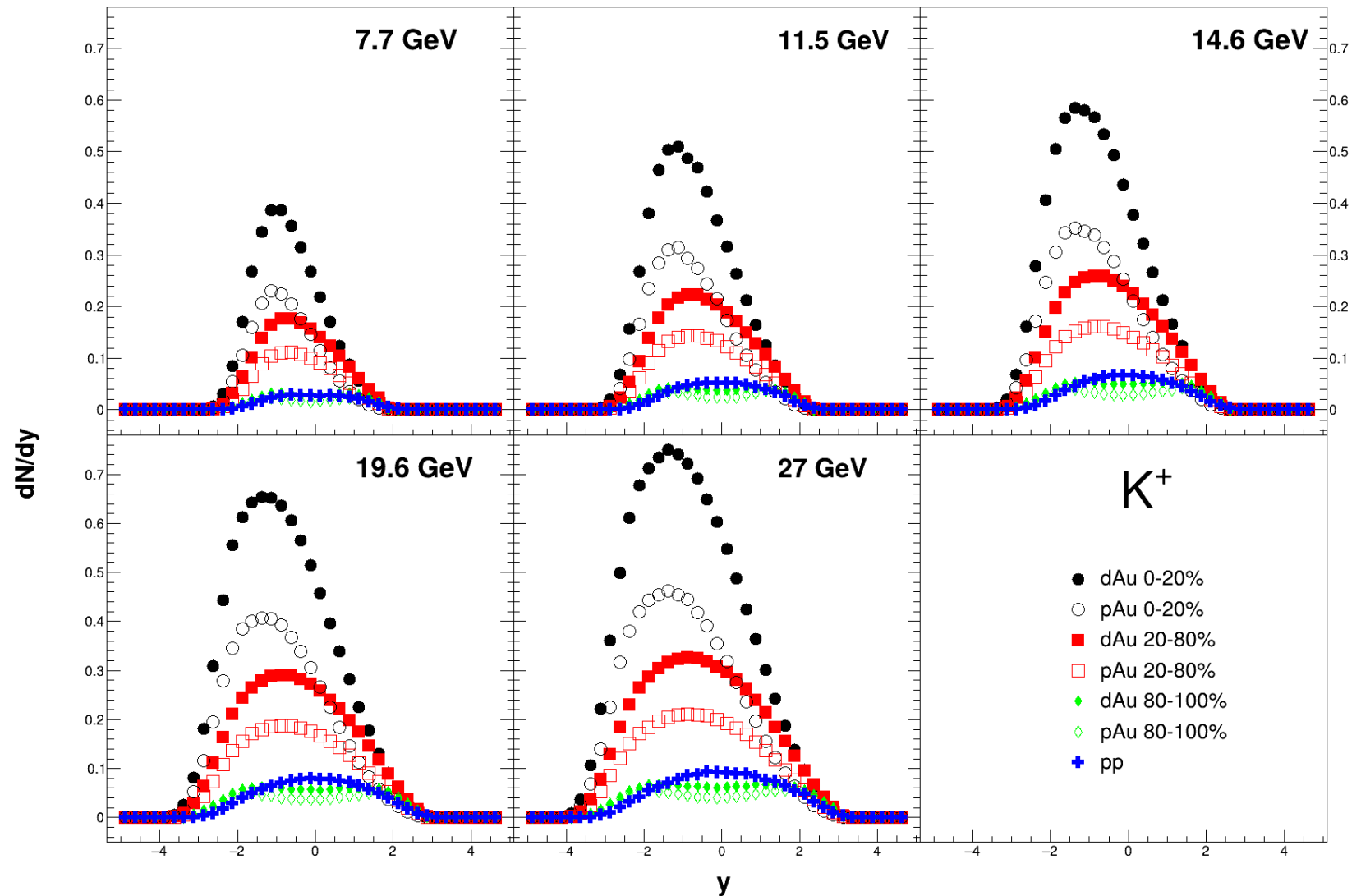


# Спектры поперечного импульса

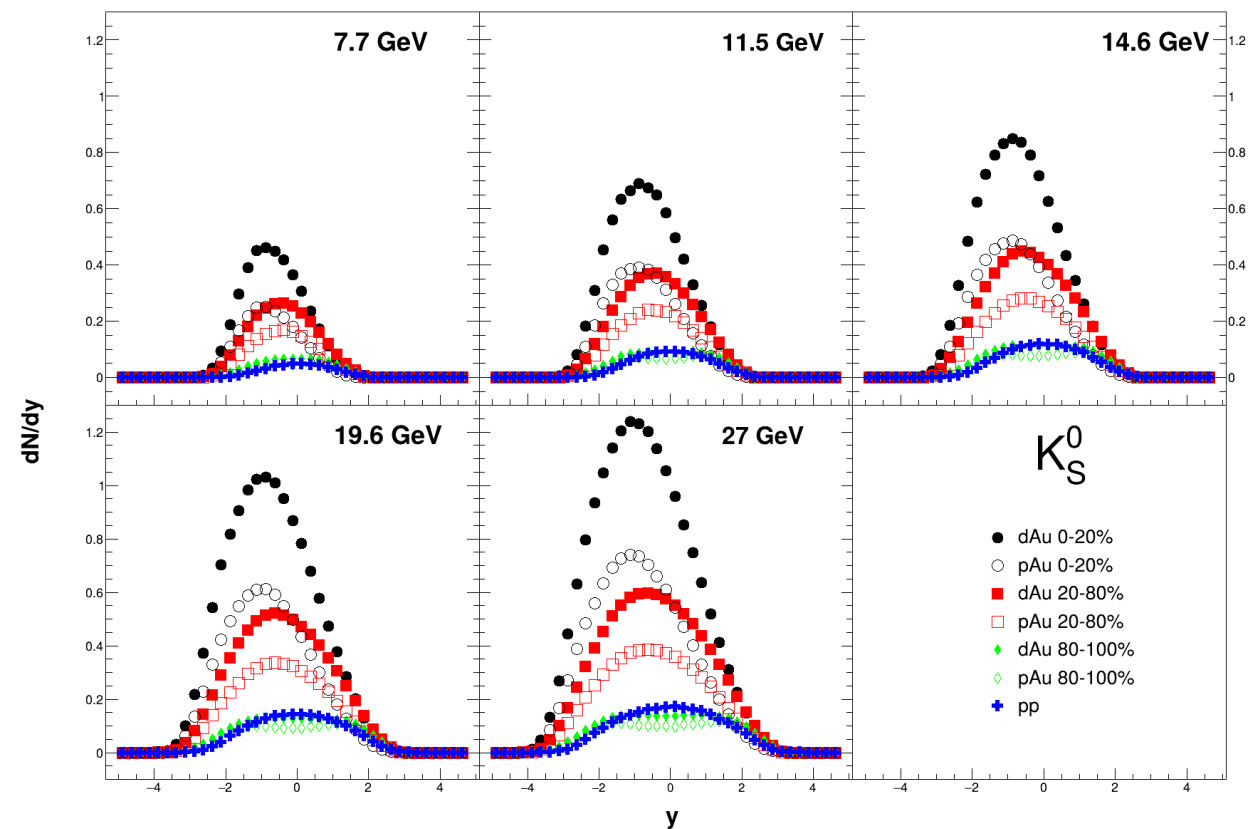
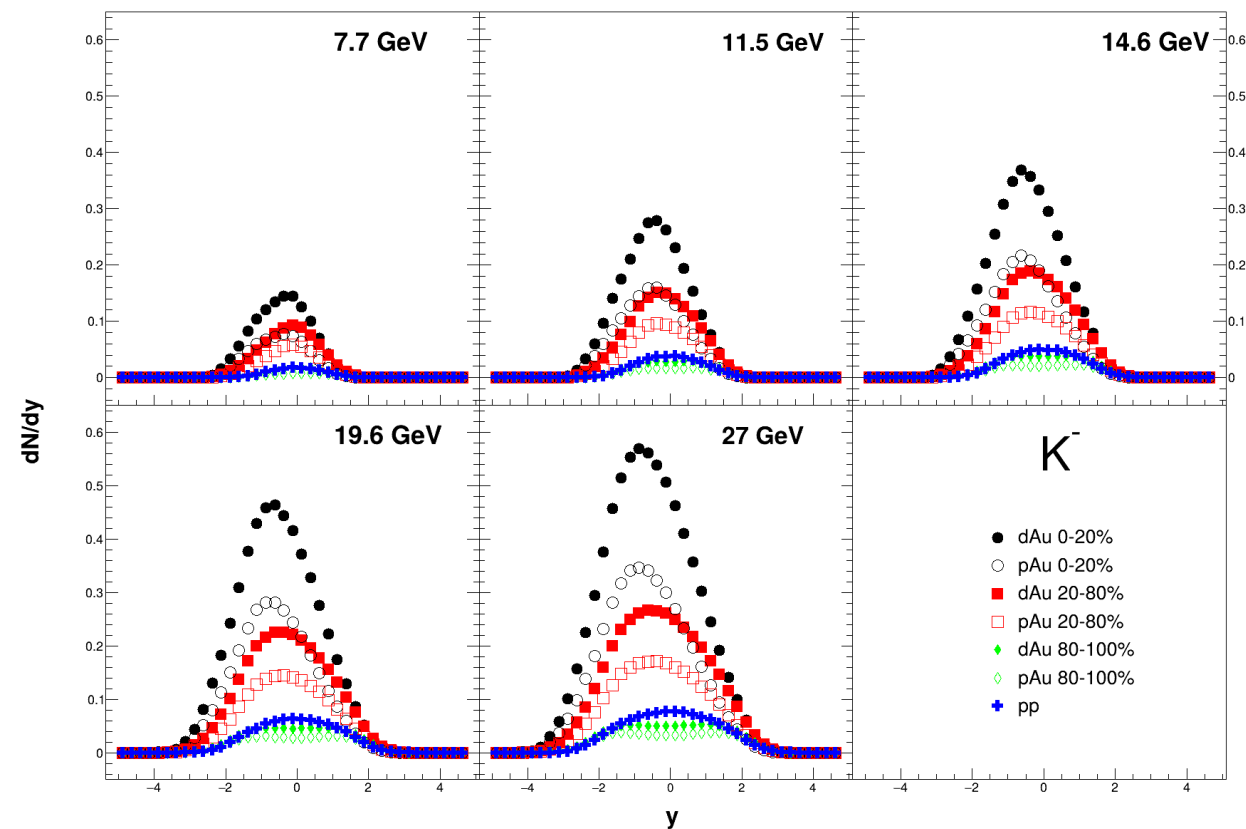


# Быстротное распределение

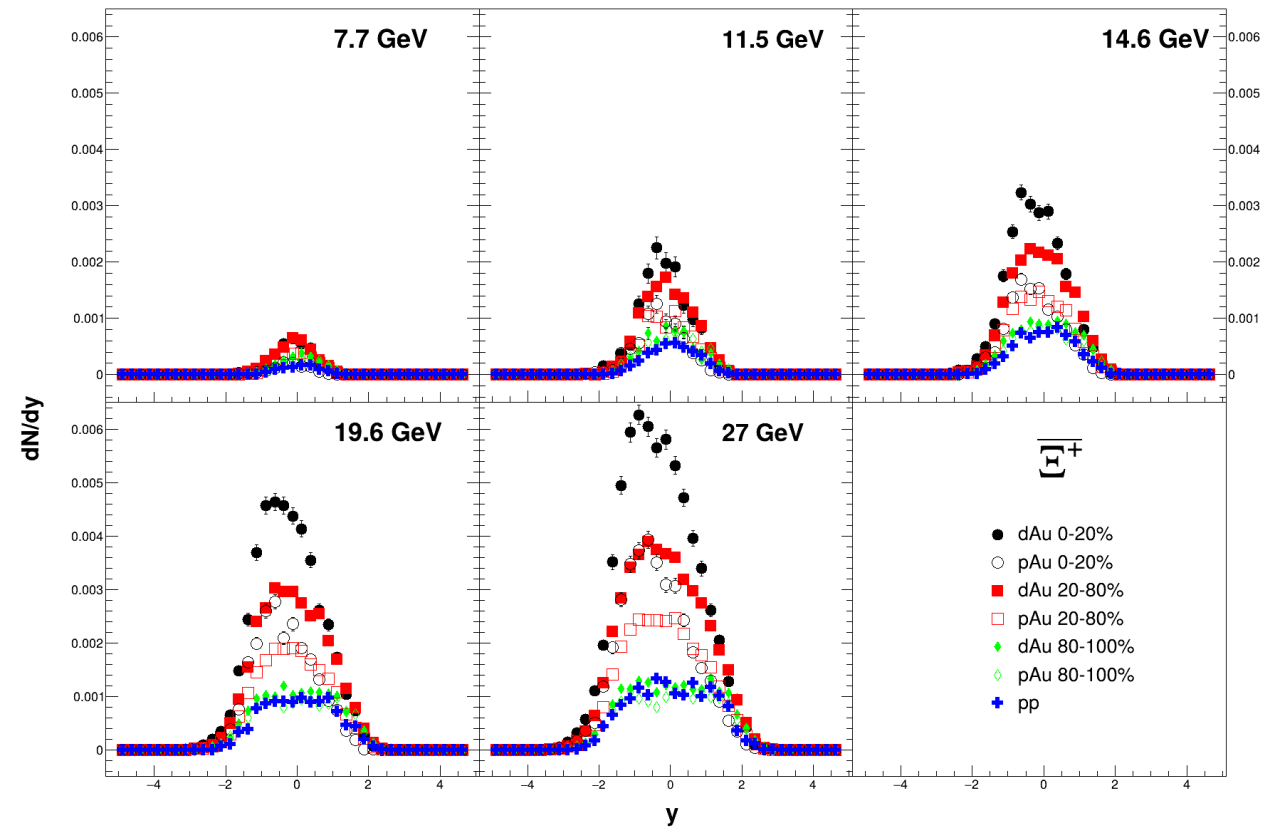
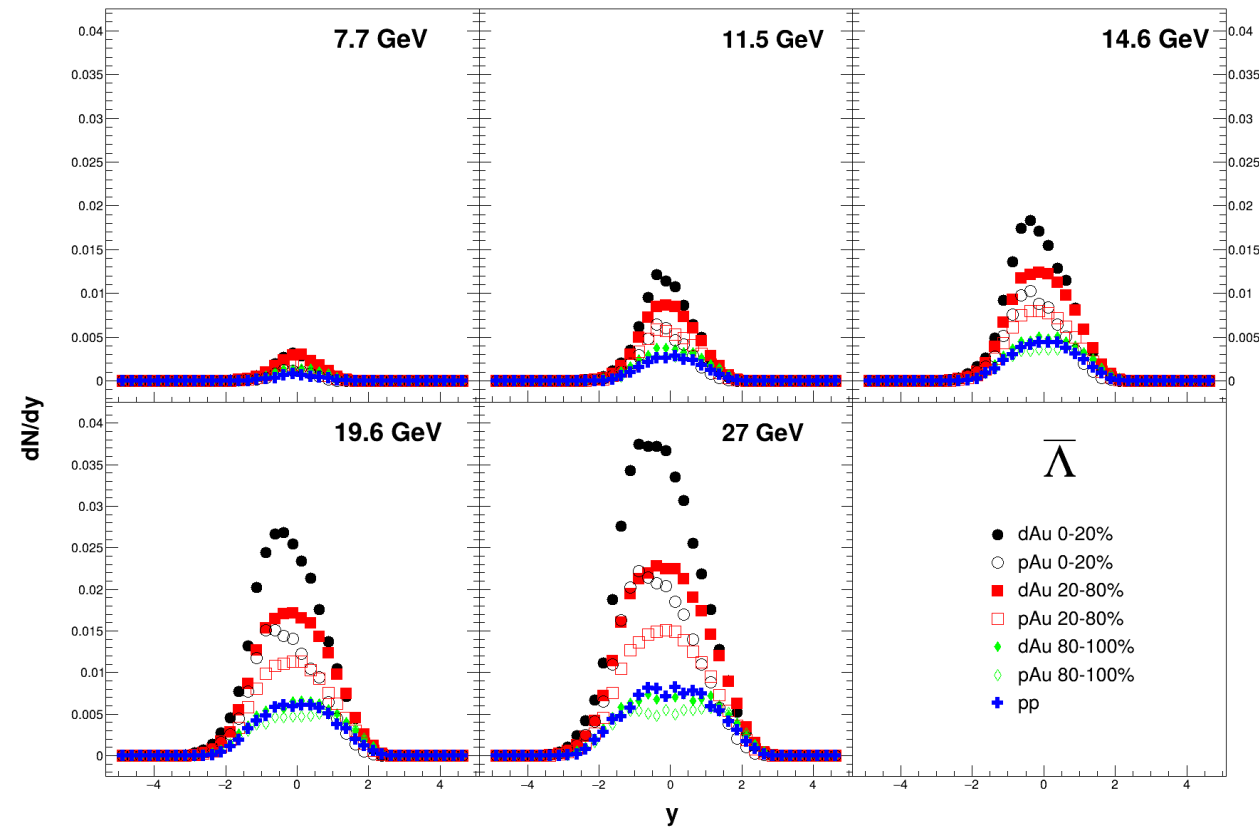
- Для всех частиц в центральных столкновениях  $p(d)+Au$  наблюдается повышенный выход в сторону фрагментации мишени
- Для мезонов и антигиперонов в периферических столкновениях  $p(d)+Au$  выход в поперечном направлении подавлен относительно столкновений  $p+p$



# Быстротное распределение

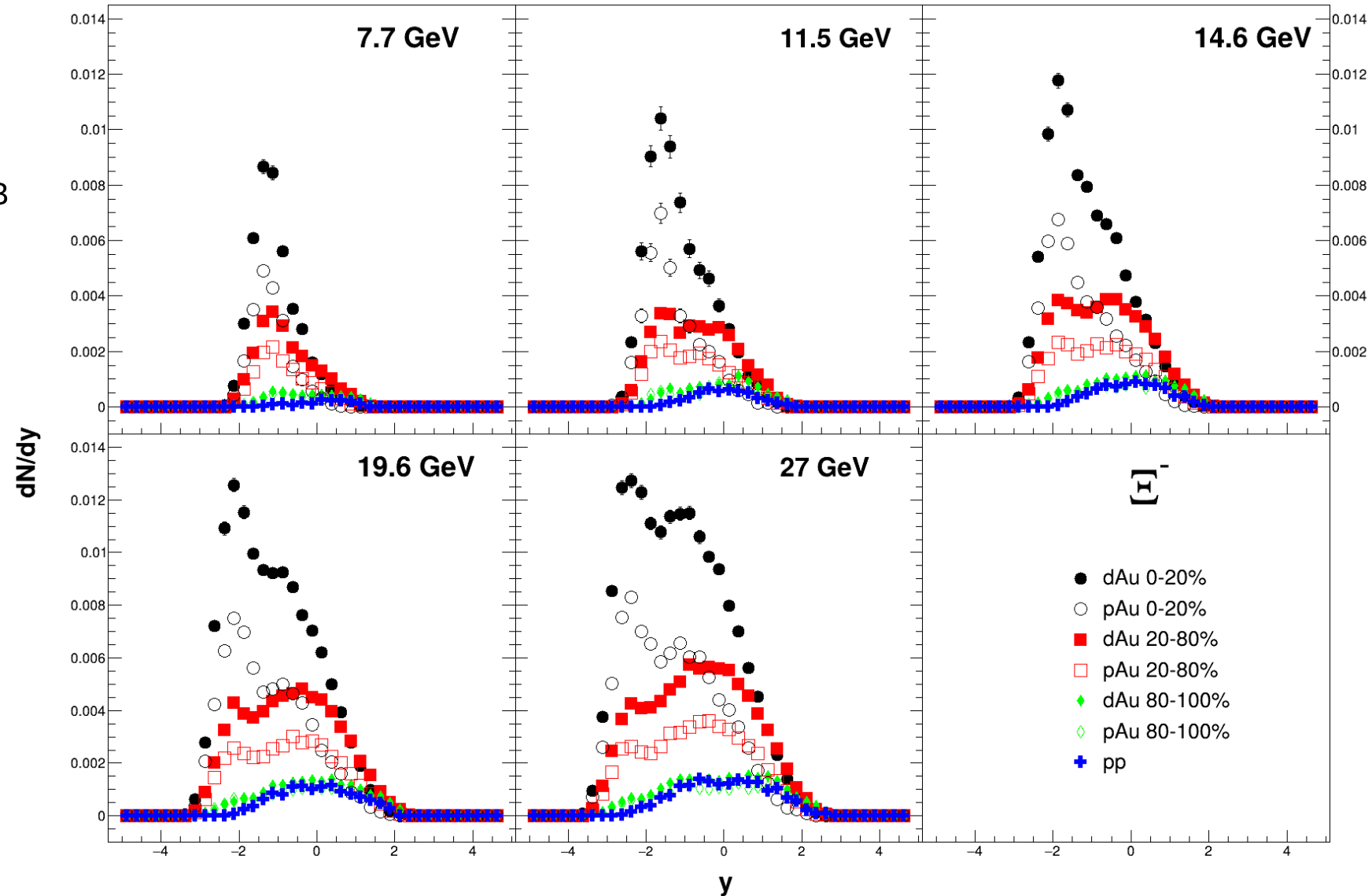


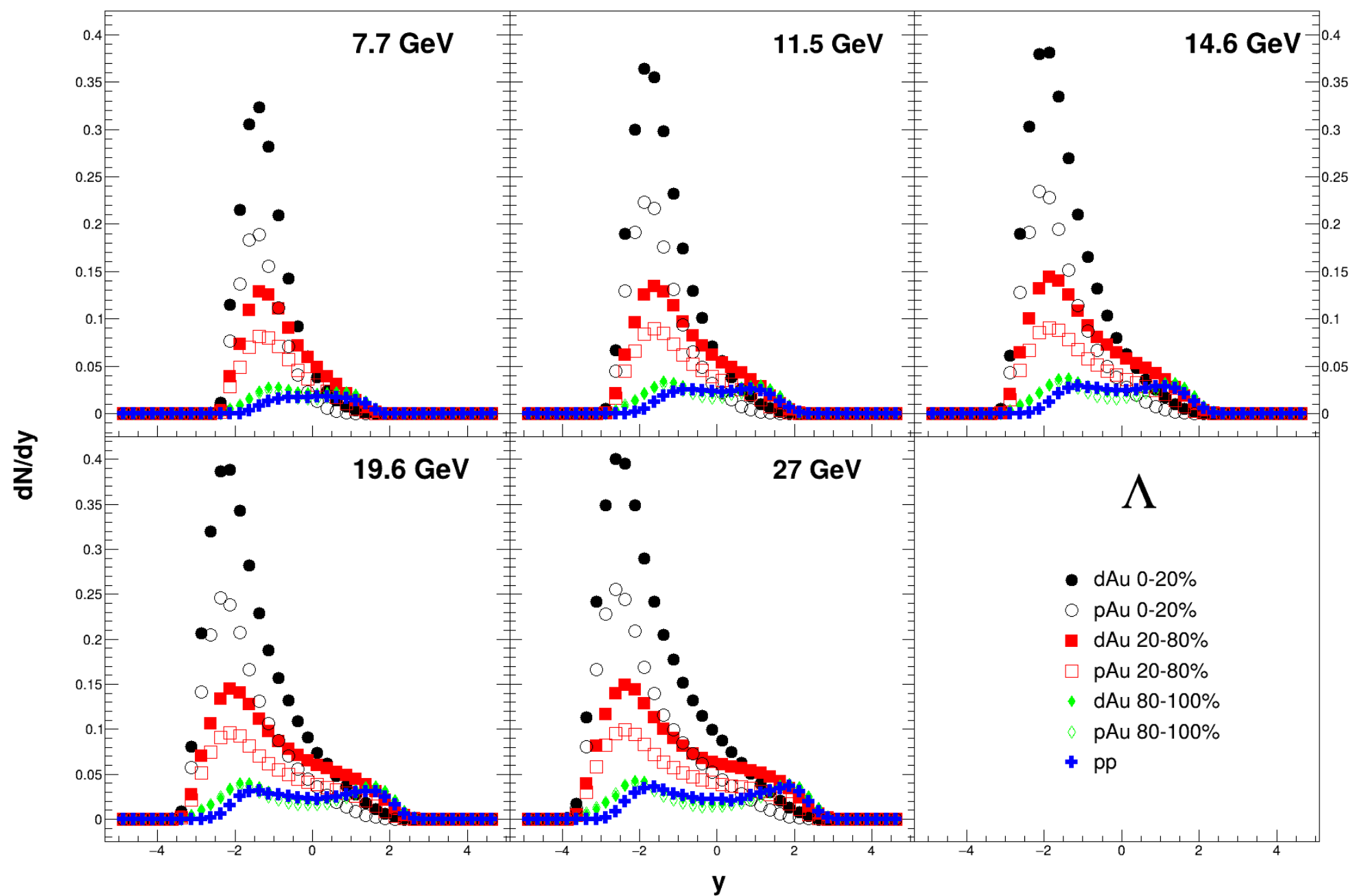
# Быстротное распределение



# Быстротное распределение

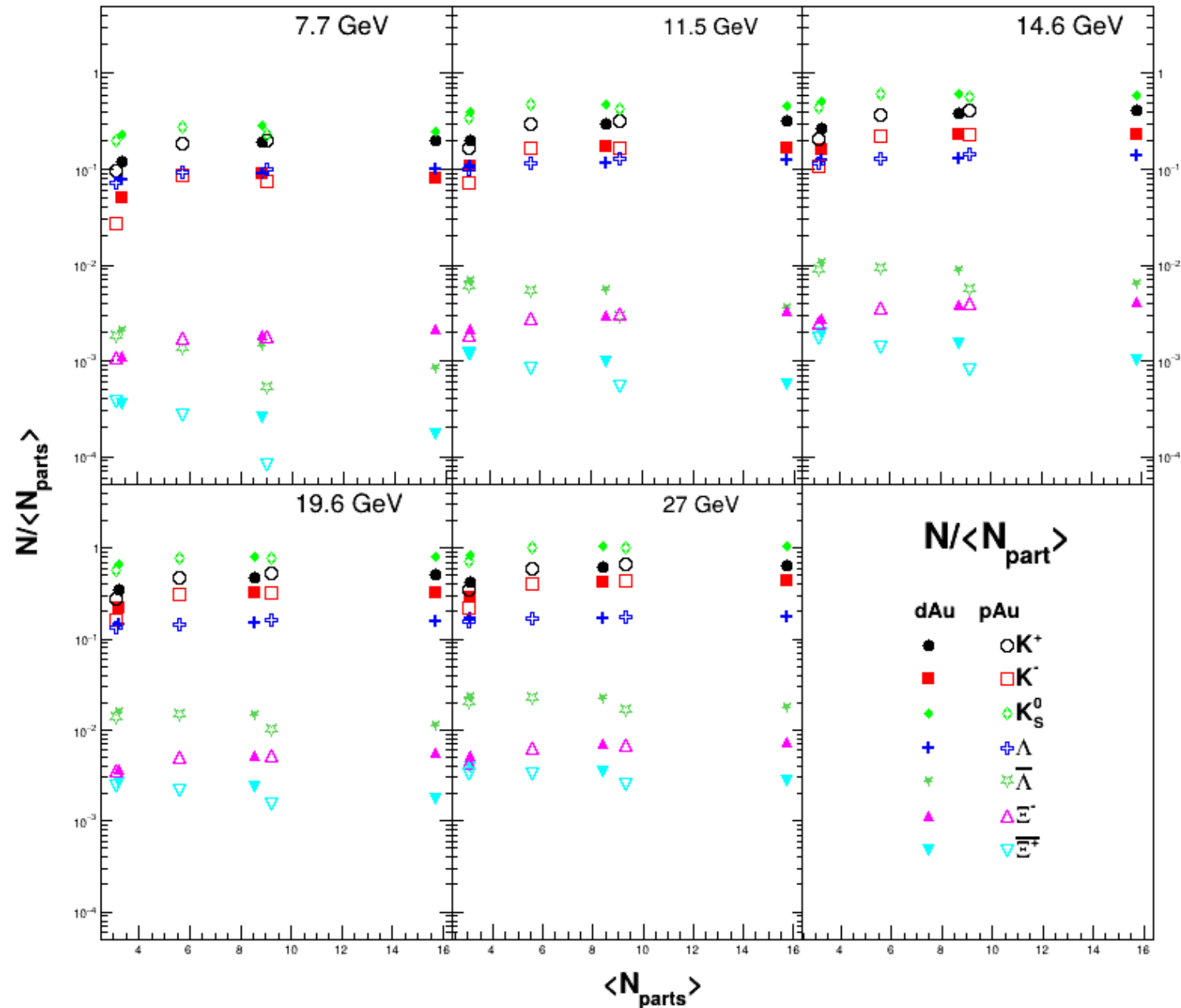
- Выход  $\Lambda$  и  $\Xi^-$  гиперонов в центральных столкновениях характерен еще большей степенью асимметрии по скорости
- В периферических столкновениях  $p(d)+Au$  и столкновениях  $p+p$  распределения  $\Lambda$  и  $\Xi^-$  гиперонов ведут себя схожим образом





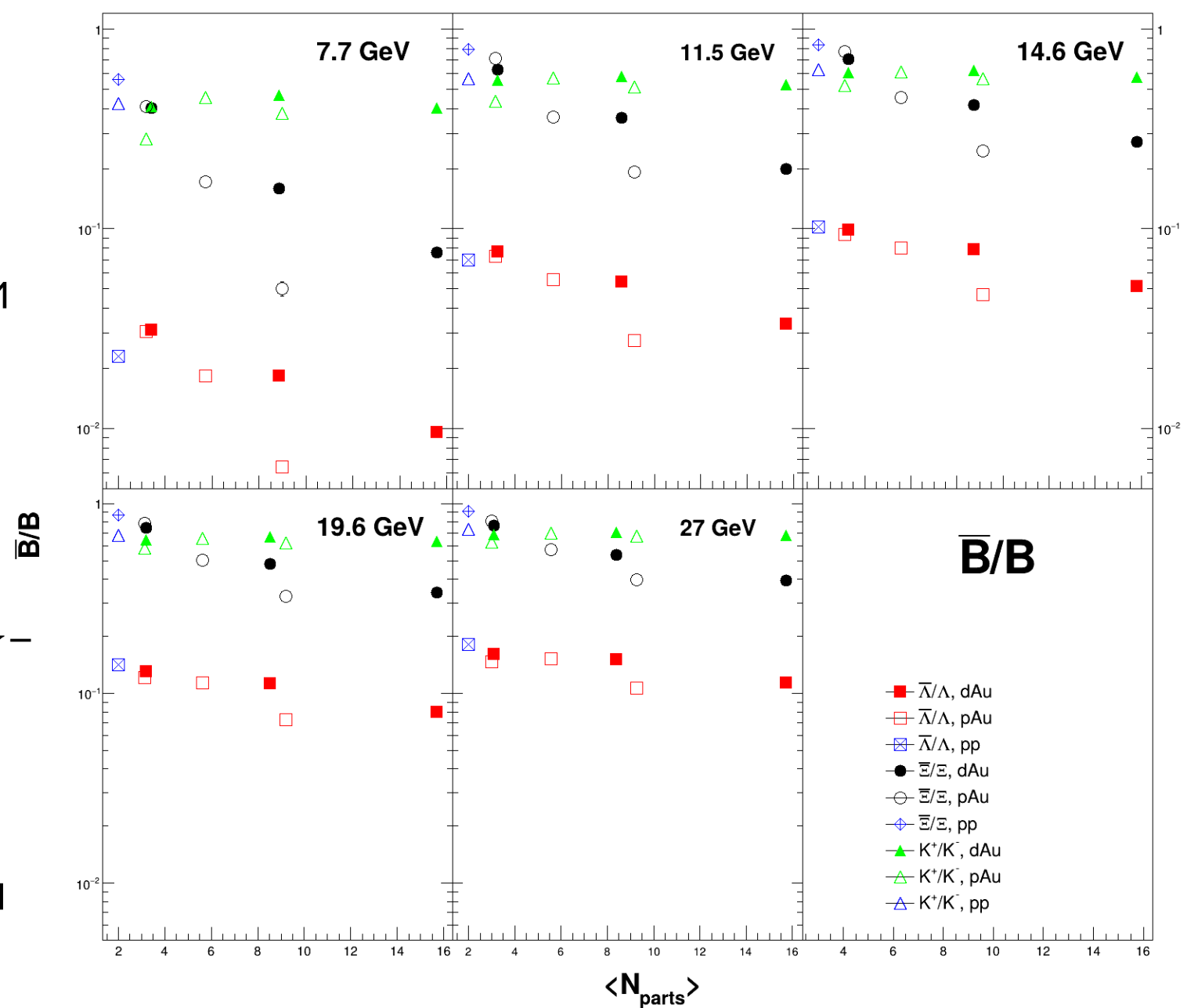
# Интегральные выходы

- В выходе мезонов,  $\Lambda$  и  $\Xi^-$  гиперонов наблюдается насыщение с ростом  $\langle N_{parts} \rangle$
- Выход  $\bar{\Lambda}$  и  $\bar{\Xi}^+$  падает при переходе от периферических к центральным столкновениям
- Подавление выхода антигиперонов более выражено в столкновениях p+Au и при меньших энергиях



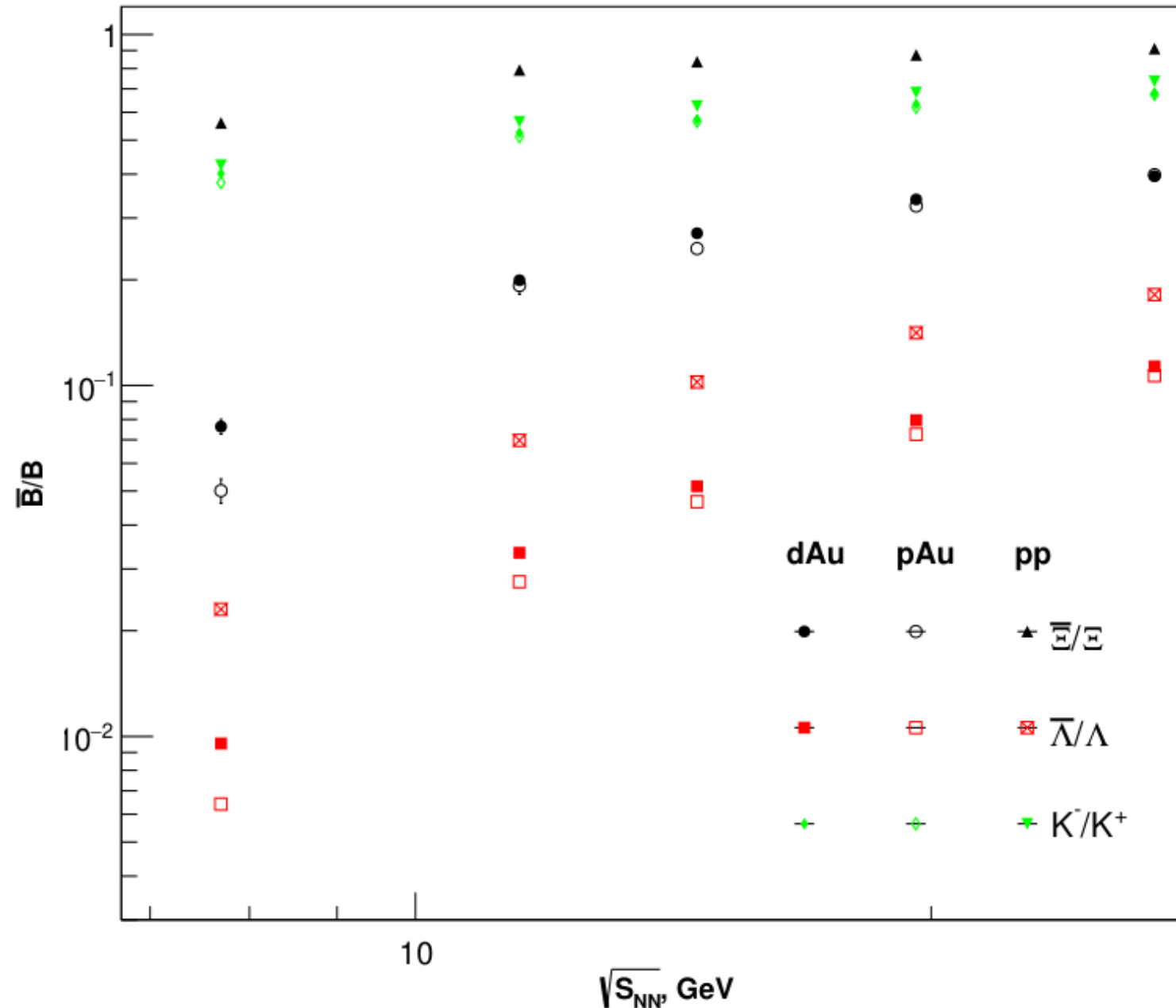
# Отношение выходов антиадрон/адрон

- Отношение выходов  $\bar{\Lambda}/\Lambda$  и  $\bar{\Xi}^+/\Xi^-$  уменьшается при переходе от периферических к центральным событиям
- Отношение выходов  $K^+/K^-$  слабо зависит от центральности столкновения и типа сталкивающейся системы



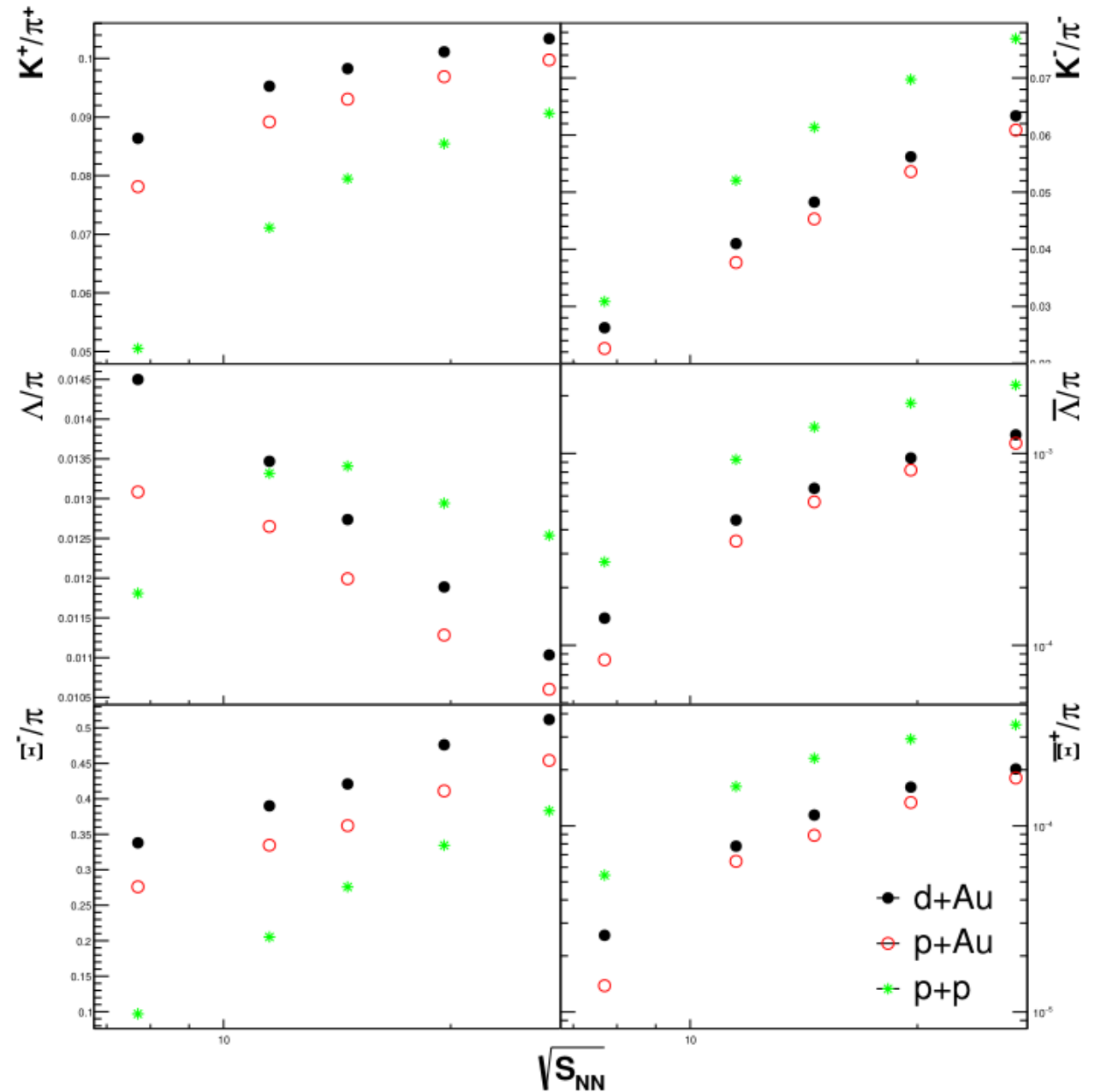
# Отношение выходов антиадрон/адрон

- Отношение выходов  $\bar{\Lambda}/\Lambda$  и  $\bar{\Xi}^+/\Xi^-$  растет вместе с ростом энергии
- Выход антибарионов в столкновениях  $p(d)+Au$  подавлен относительно столкновений  $p+p$
- Отношение выходов  $K^+/K^-$  слабо растет с увеличением энергии
- Тип сталкивающейся системы оказывает малое влияние на отношение выходов мезонов



# Отношения выходов адрон/пион

- Выход  $K^-$ ,  $\bar{\Lambda}$ ,  $\bar{\Xi}^+$ , нормированный на выход пионов в центральных столкновениях  $p(d)+Au$  подавлен относительно столкновений  $p+p$
- Обратная ситуация наблюдается для  $K^+$  и  $\Xi^-$
- Выход  $\Lambda$  гиперонов в столкновениях  $p+p$  ведет себя нетривиальным образом

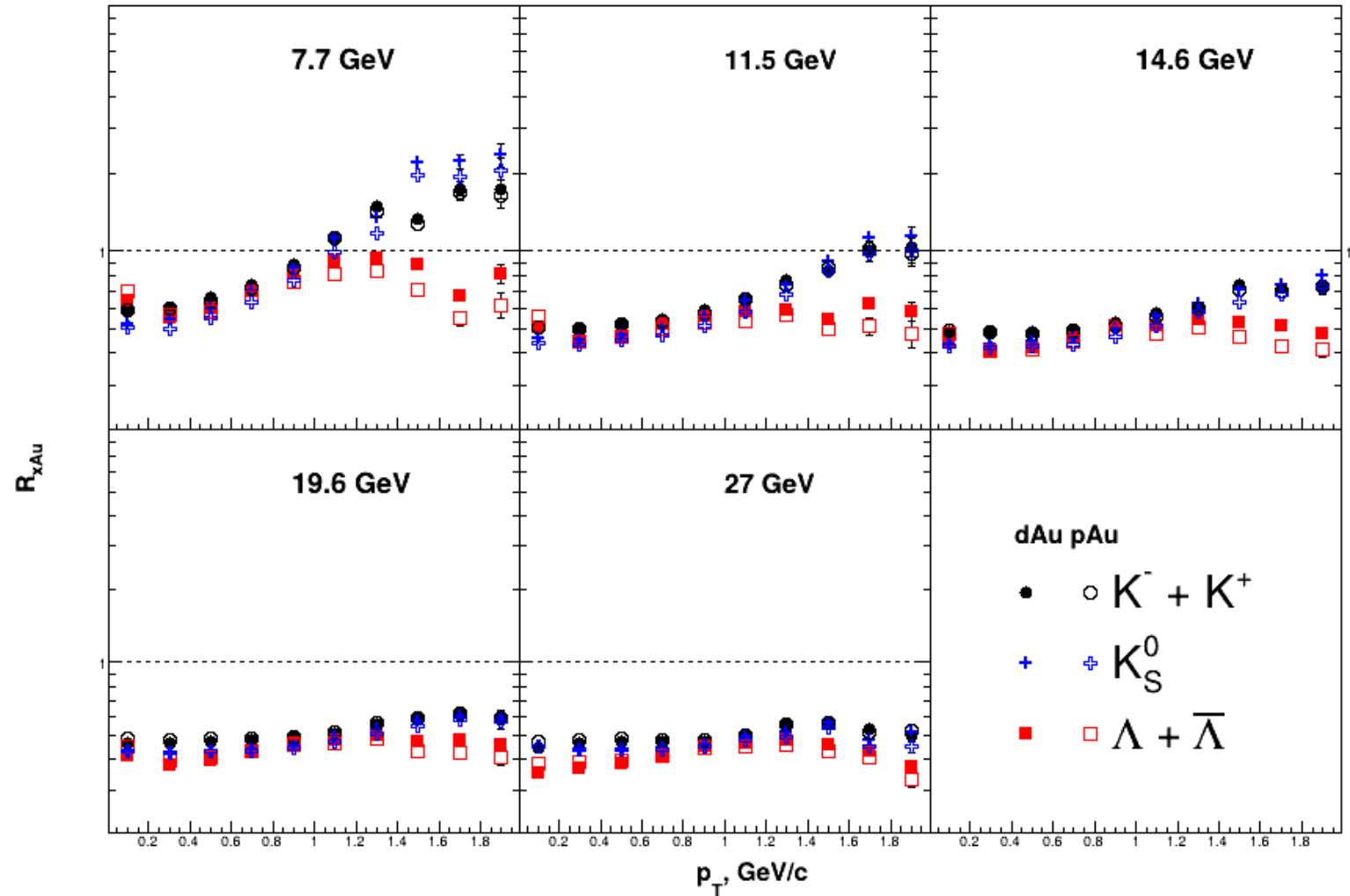


# Фактор ядерной модификации

$$R_{xA} = \frac{dN_{xA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T \cdot \langle N_{coll} \rangle}$$

где  $\langle N_{coll} \rangle$  - среднее число неупругих бинарных столкновений

- Фактор ядерной модификации  $\Lambda$  – гиперонов и мезонов в области  $p_T < 1$  ГэВ/с ведет себя схожим образом
- Для мезонов при энергии 11.5 ГэВ в области  $p_T > 1.6$  ГэВ/с не наблюдается подавление, при энергии 7.7 ГэВ в области  $p_T > 1$  ГэВ/с их выход повышен



# Выводы

В ходе выполнения работы:

- Проведена генерация данных по столкновениям  $p+p$ ,  $p+Au$  и  $d+Au$  при энергиях эксперимента STAR с помощью модели UrQMD 4.0
- На полученных данных были построены спектры поперечного импульса, быстротные распределения и интегральные выходы рожденных  $K^\pm$ ,  $K_S^0$ ,  $\Lambda$ ,  $\bar{\Lambda}$ ,  $\Xi^-$  и  $\bar{\Xi}^+$
- Построены зависимости отношений выходов антиадрон/адрон в зависимости от среднего количества участников столкновений и от энергии столкновения
- Построены зависимости отношения выходов антиадрон/пион в зависимости от энергии столкновения и фактор ядерной модификации

Подобный анализ на модельных данных может быть реперной точкой для интерпретации результатов по столкновениям тяжелых ионов в эксперименте STAR на коллайдере RHIC и будущего эксперимента MPD на коллайдере NICA в отсутствие достаточных данных по столкновениям ассиметричных систем в энергетической области этих экспериментов



Спасибо за внимание!



# Благодарности

Выражаю благодарность:

- научному руководителю **Теряеву Олегу Валериановичу** (ЛТФ ОИЯИ, МГУ) и научному консультанту **Апарину Алексею Андреевичу** (ЛФВЭ ОИЯИ, МФТИ) за помощь в написании дипломной работы
- коллегам **Лыонгу Ба Виню** (ЛФВЭ ОИЯИ; DNRI, Вьетнам) и **Недорезову Егору Вячеславовичу** (ЛФВЭ ОИЯИ, МФТИ) за ценные советы и замечания
- Коллективу кафедры **ФЭЧ физического факультета МГУ**

