



Faculty of Physics
Lomonosov Moscow
State University



Рождение странных адронов в столкновениях ядер золота при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ в эксперименте STAR

Выполнил студент 609 группы Тимофеев Артем Александрович

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. Теряев Олег Валерианович

Научный консультант: к. ф.-м. н. Апарин Алексей Андреевич

Физический факультет МГУ

Кафедра физики элементарных частиц

29 мая 2026

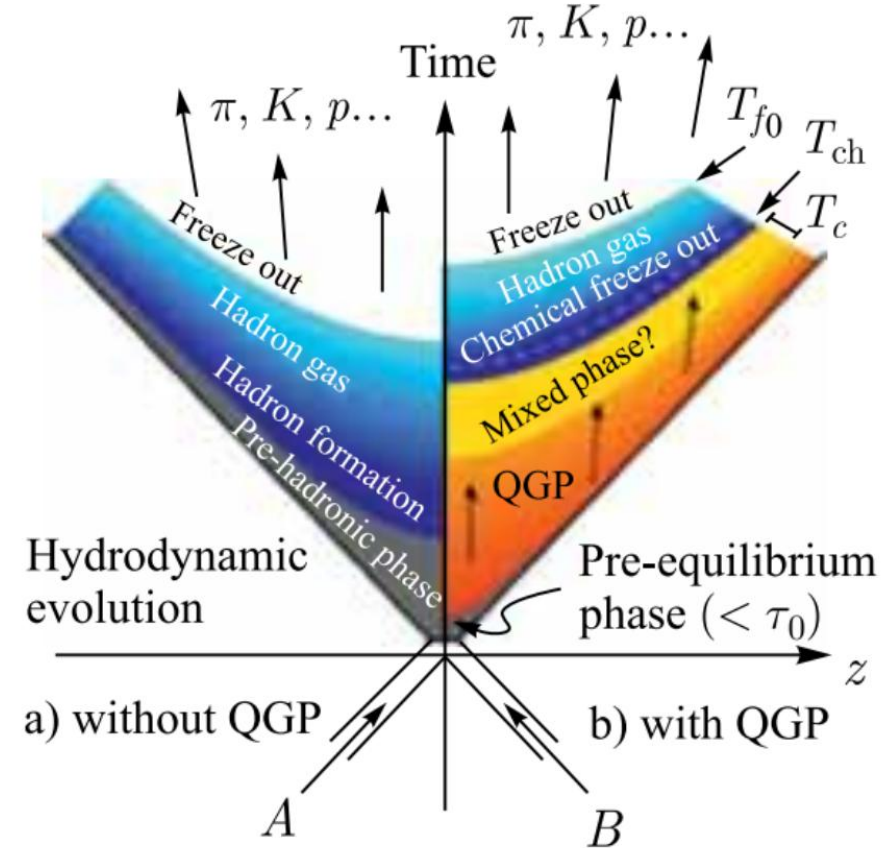
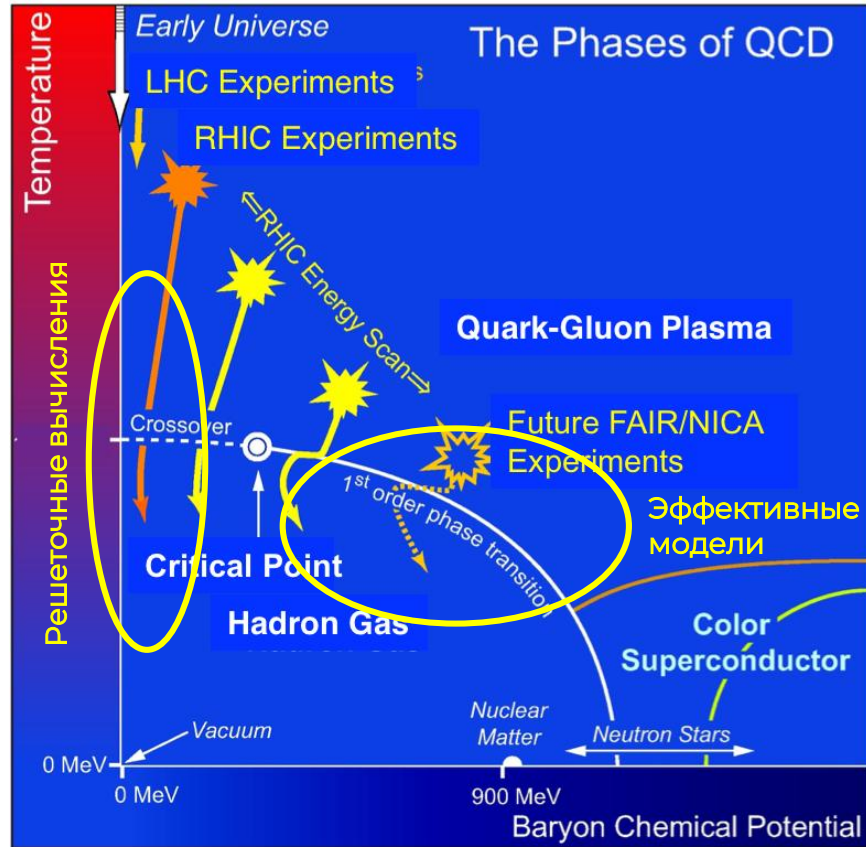


Оглавление

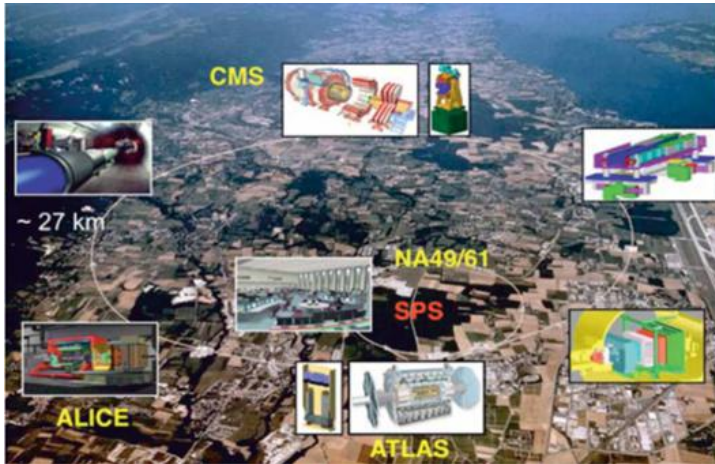
- Введение
 - Эволюция горячей материи
 - Экспериментальное исследование КГП
 - Странные адроны как сигнал КГП
- Эксперимент STAR
 - Детекторные системы
 - Отбор событий
- Реконструкция странных частиц
 - Отбор дочерних частиц
 - Реконструкция V^0 и каскадов
 - Извлечение сигнала
 - Эффективность реконструкции
 - Систематические ошибки
- Спектры по поперечному импульсу
- Интегральный выход частиц
- Выводы



Эволюция горячей материи



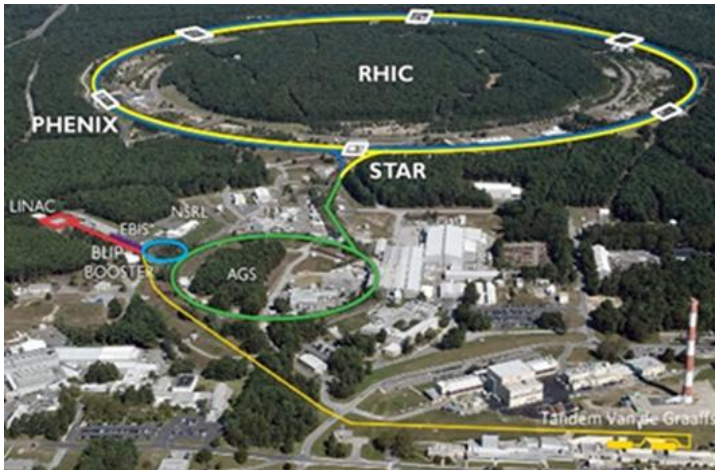
Экспериментальное исследование КГП



LHC (CERN)

Pb+Pb:

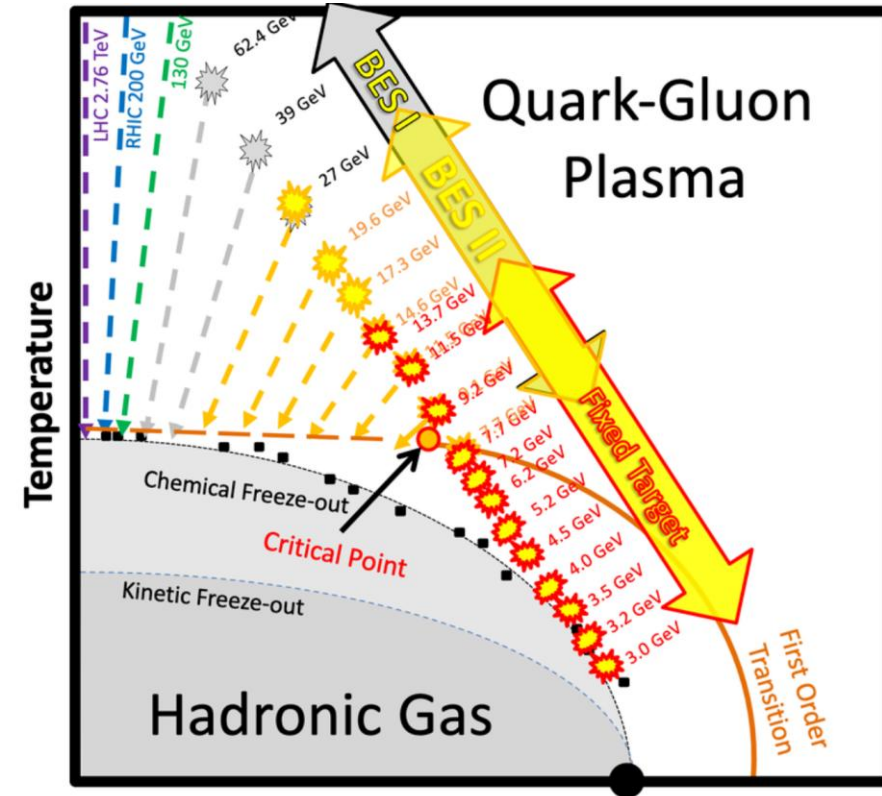
$$\sqrt{s_{NN}} = 2.76, 5.02 \text{ ТэВ}$$



RHIC (BNL)

Au+Au:

$$\sqrt{s_{NN}} = 3 - 200 \text{ ГэВ}$$



BES I, $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 62.4 \text{ ГэВ}$

BES II, $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 27 \text{ ГэВ}$



Экспериментальное исследование КГП



- NICA
- $\sqrt{s_{NN}} = 2 - 11$ ГэВ
- Эксперименты:
 - MPD (ожидается)
 - BM@N (в работе)



Странные адроны как сигнал КГП

Почему странные адроны?

- Исходные ядра не содержат странных кварков → все странные частицы рождаются в ходе взаимодействия

КГП vs адронный газ:

- КГП: $gg \rightarrow s\bar{s}$, $E_{\text{thresh}} \sim 0.2$ ГэВ, насыщение плотности странных кварков за время \sim фм/с
- Адронный газ: адронные процессы ($pp \rightarrow p\Lambda K^+$, $E_{\text{thresh}} \sim 2.5$ ГэВ) — подавление, время насыщения ~ 200 фм/с

Исследуемые частицы:

- K_S^0 — базовый маркер странности; маленькая масса ($m_{K_S^0} \approx 0.498$ ГэВ/ c^2) → большие выходы
- Λ — самый легкий странный барион ($m_\Lambda \approx 1.116$ ГэВ/ c^2); сравнение механизмов рождения мезонов и барионов в горячей среде
- Ξ , Ω — чувствительны к плотности странности поскольку содержат 2 и 3 странных кварка, соответственно.
 $m_\Xi \approx 1.322$ ГэВ/ c^2 , $m_\Omega \approx 1.672$ ГэВ/ c^2

Спектры по p_T странных частиц позволяют извлечь параметры кинетического и химического вымораживаний, проверить предсказания моделей о механизмах рождения странности и идентифицировать границу фазового перехода



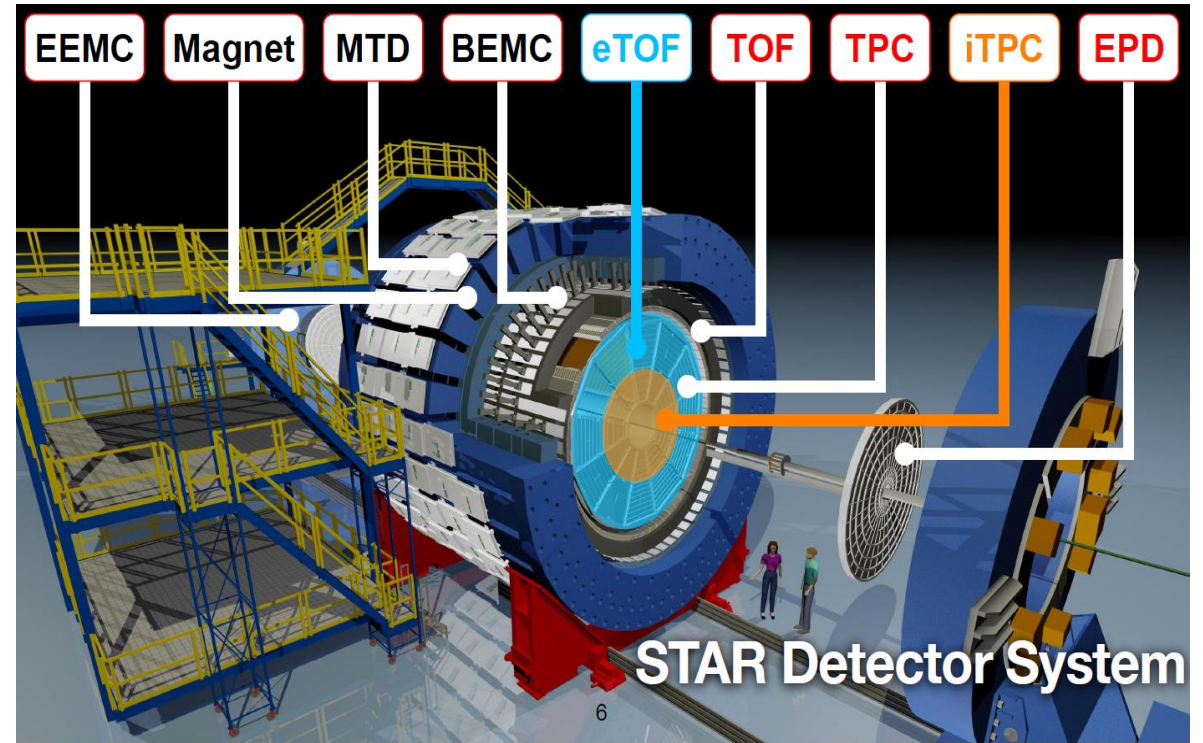
Эксперимент STAR



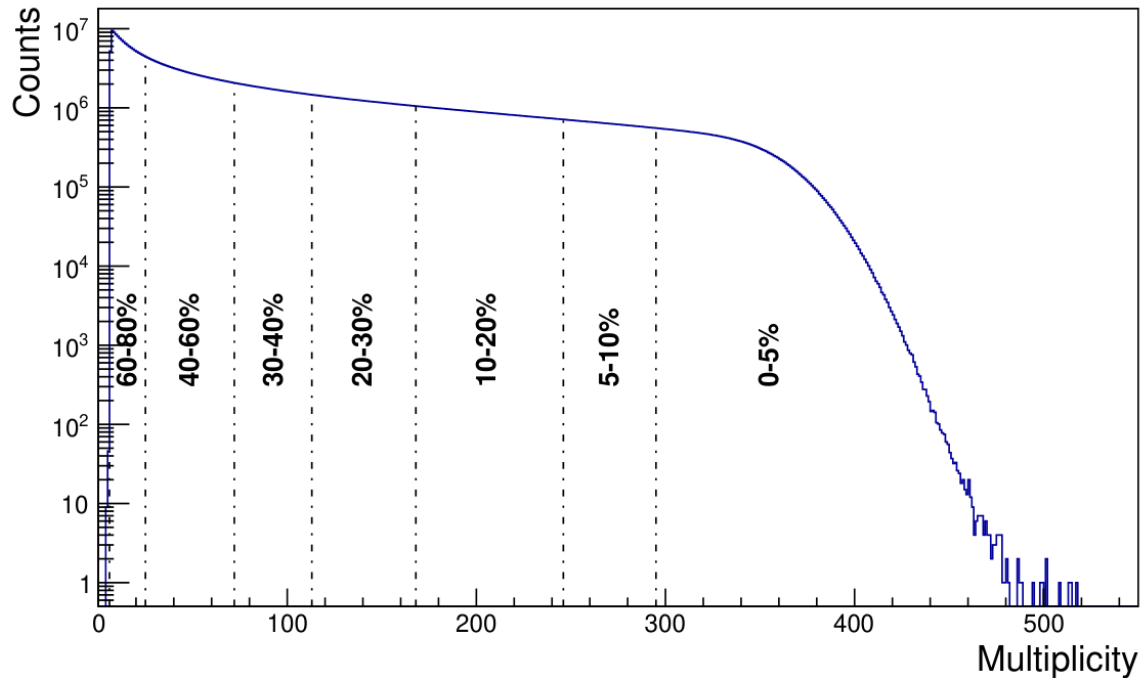
Эксперимент STAR (BES II)

TPC (Time Projection Chamber):

- Длина 4.2 м, диаметр 4 м
- Трекинг и идентификация частиц по dE/dx
- Магнитное поле 0.5 Т
- 2π аксептанс по азимутальному углу
- $p_T > 0.10$ ГэВ/с
> 0.06 ГэВ/с (iTPC, 2019+)
- $|\eta| < 1$
< 1.5 (iTPC, 2019+)



Отбор событий



STAR, Au+Au, 27 ГэВ, BES II

Критерии отбора:

- $|V_z| < 70$ см, $|V_R| < 2$ см
- Отброшены события pile-up

→ ~ **550 миллионов событий**

Центральность - отбор по множественности:

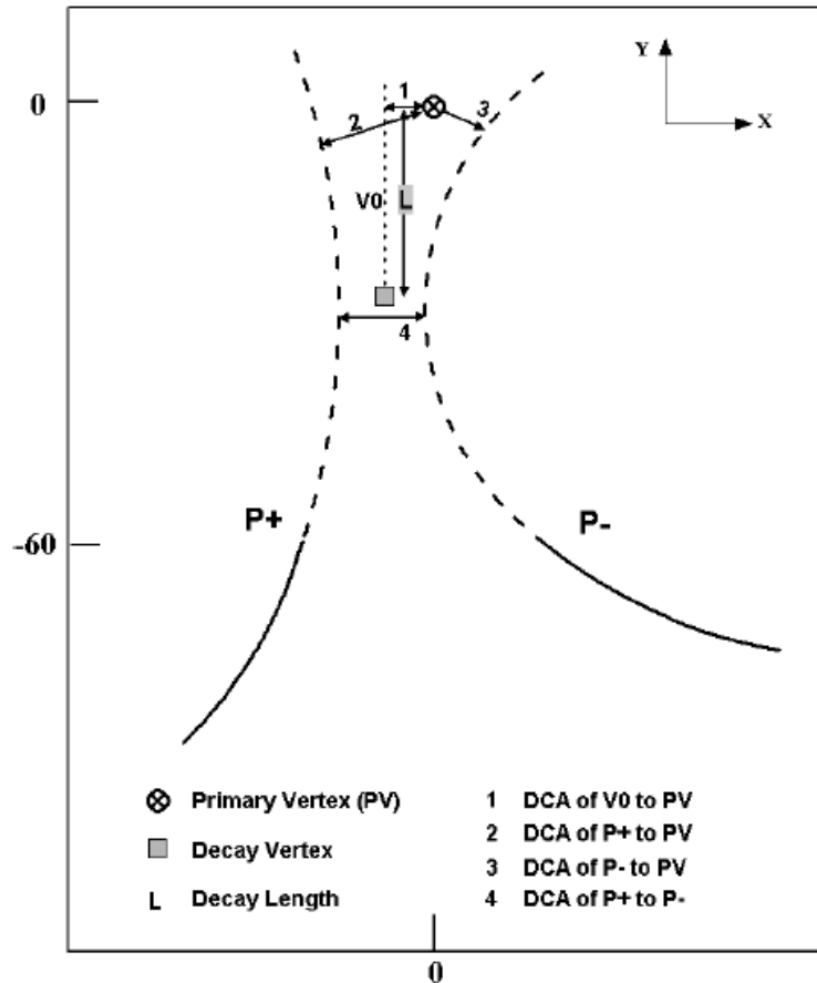
- $|\eta| < 0.5$, $n_{\text{HitsFit}} \geq 11$, $DCA < 3$ см



Реконструкция странных частиц



Топология распада V^0



$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad (69.2\%)$$

$$\Lambda \rightarrow p + \pi^- \quad (63.9\%)$$

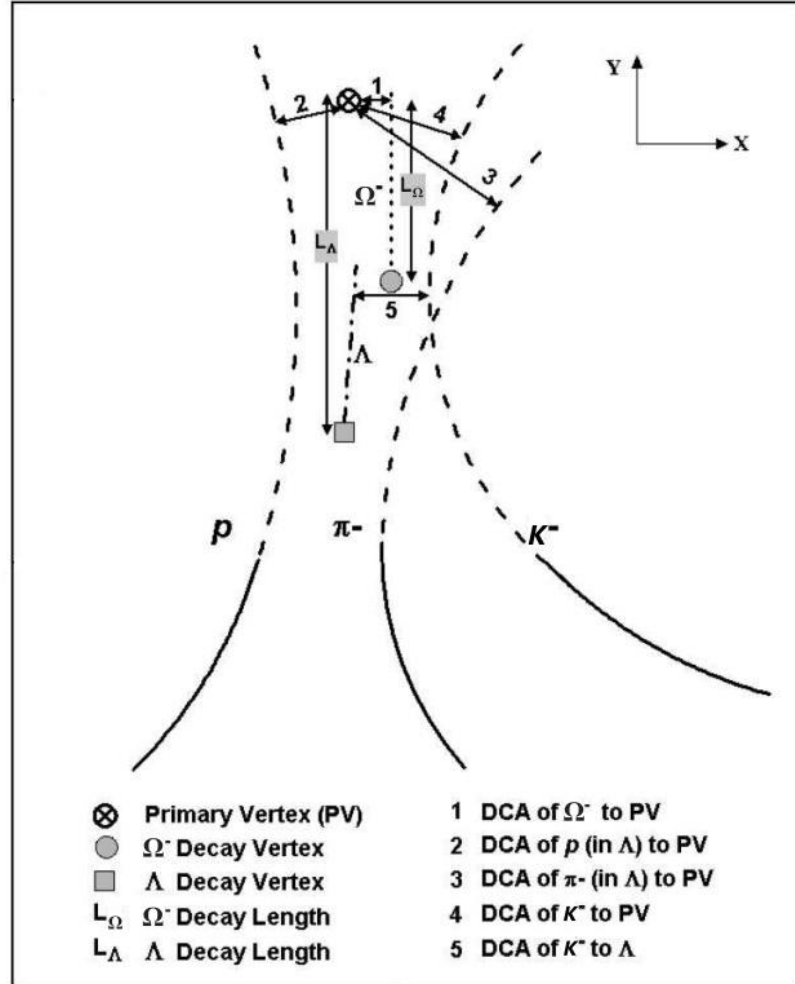
Критерий отбора	K_S^0	Λ
DCA V^0 к вершине события	< 0.8 см	< 0.8 см
DCA π к вершине события	> 0.7 см	> 1.0 см
DCA p к вершине события	—	> 0.3 см
DCA между дочерними частицами	< 0.8 см	< 0.8 см
Длина распада V^0	> 2.5 см	> 3 см
$(\vec{r}_{V^0} - \vec{r}_{PV}) \cdot \vec{p}_{V^0}$	> 0	> 0



Топология распада Ξ и Ω

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda + \pi^- \quad (99.9\%)$$

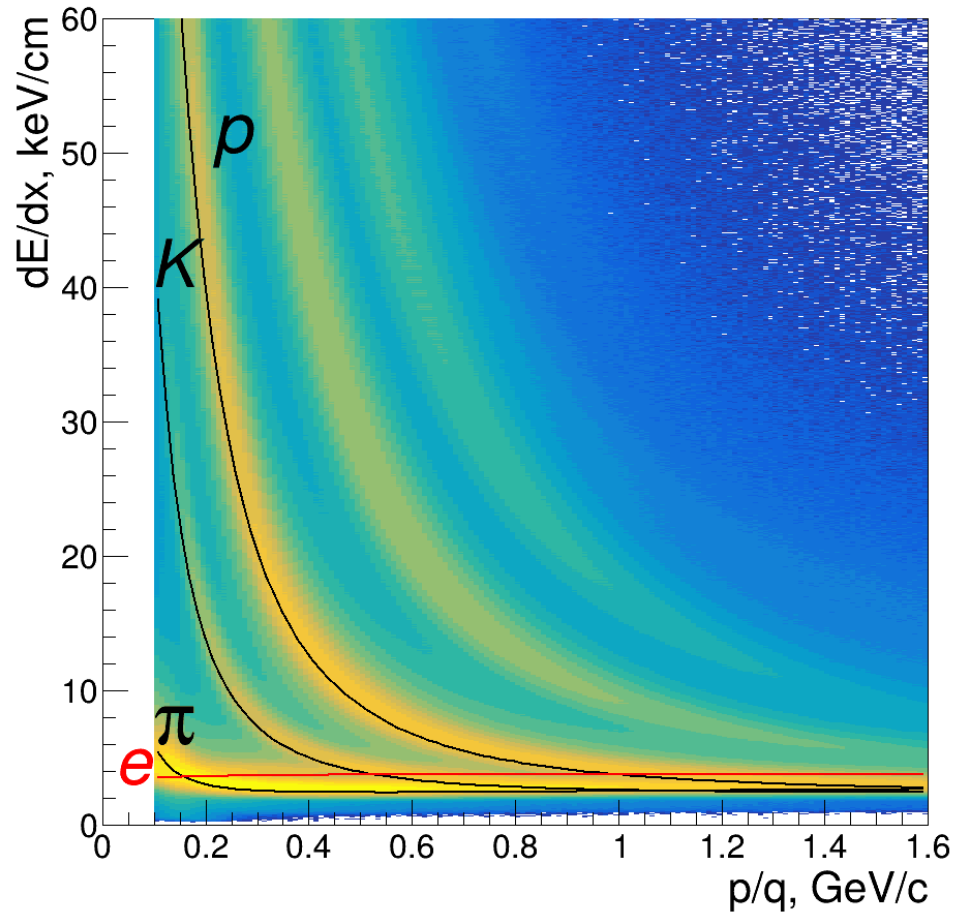
$$\Omega^- \rightarrow \Lambda + K^- \quad (67.8\%)$$



Критерий отбора	Ξ	Ω
DCA Ξ/Ω к вершине события	< 0.8 см	< 0.4 см
DCA π/K к вершине события	> 0.8 см	> 1.0 см
DCA Λ к вершине события	> 0.2 см	> 0.4 см
DCA p от Λ к вершине события	> 0.5 см	> 0.6 см
DCA π от Λ к вершине события	> 1.0 см	> 2.0 см
DCA π и p из Λ	< 0.8 см	< 0.7 см
DCA между Λ и π/K	< 0.8 см	< 0.7 см
Длина распада Ξ/Ω	> 3.4 см	> 3.4 см
Длина распада V^0	> 5 см	> 3 см
$(\vec{r}_{V^0} - \vec{r}_{PV}) \cdot \vec{p}_{V^0}$	> 0	> 0
$(\vec{r}_{casc} - \vec{r}_{PV}) \cdot \vec{p}_{casc}$	> 0	> 0
$(\vec{r}_{V^0} - \vec{r}_{casc}) \cdot \vec{p}_{casc}$	> 0	> 0
$(\vec{r}_{casc} - \vec{r}_{PV}) \times \vec{p}_{casc} / \vec{r}_{casc} - \vec{r}_{PV} / \vec{p}_{casc} $	< 0.2	< 0.12



Отбор дочерних частиц



$$n\sigma_{\text{part}} = \frac{1}{\sigma_{\text{part}}} \log \frac{\langle dE/dx \rangle_{\text{meas}}}{\langle dE/dx \rangle_{\text{theor}}},$$

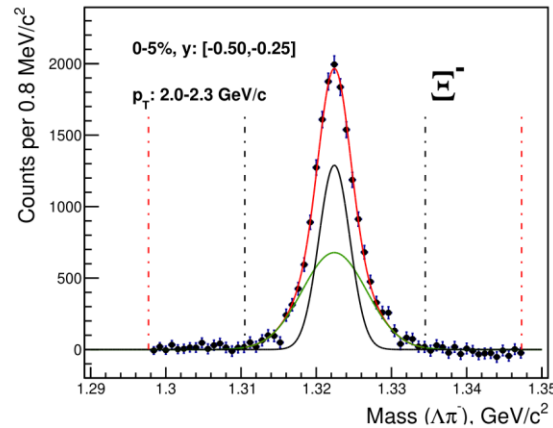
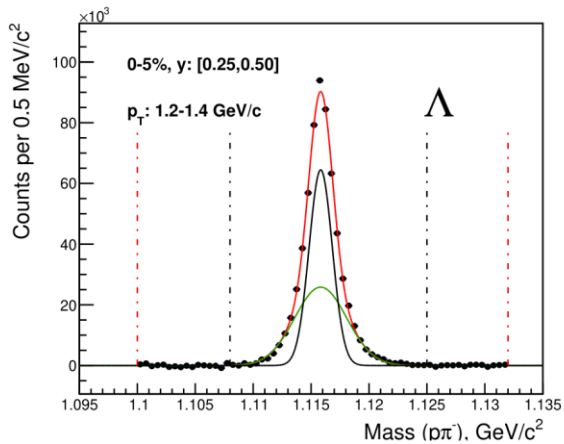
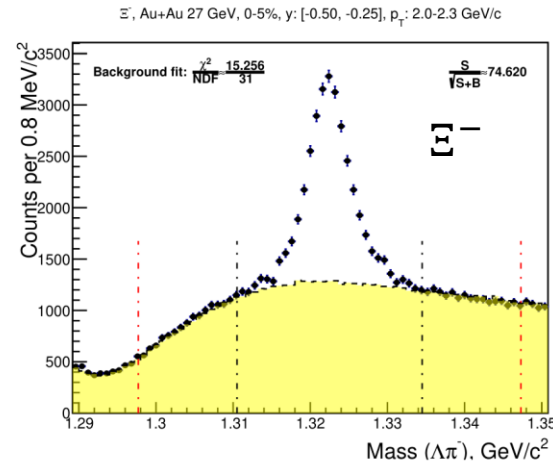
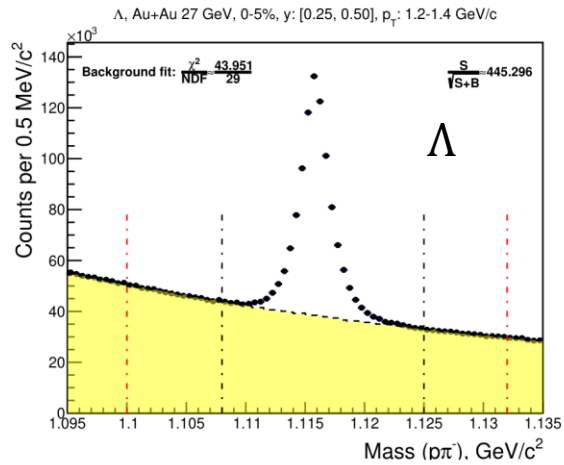
где σ_{part} – разрешение dE/dx ,
 dE/dx – ионизационные потери

Критерии отбора частиц:

- $|n\sigma_{\pi,p}| < 4, |n\sigma_K| < 3$
- $n\text{HitsFit} \geq 16$
- $n\text{HitsdEdx} \geq 12$
- $p_T > 0.1 \text{ ГэВ/с}$
- $|\eta| < 1$



Извлечение сигнала



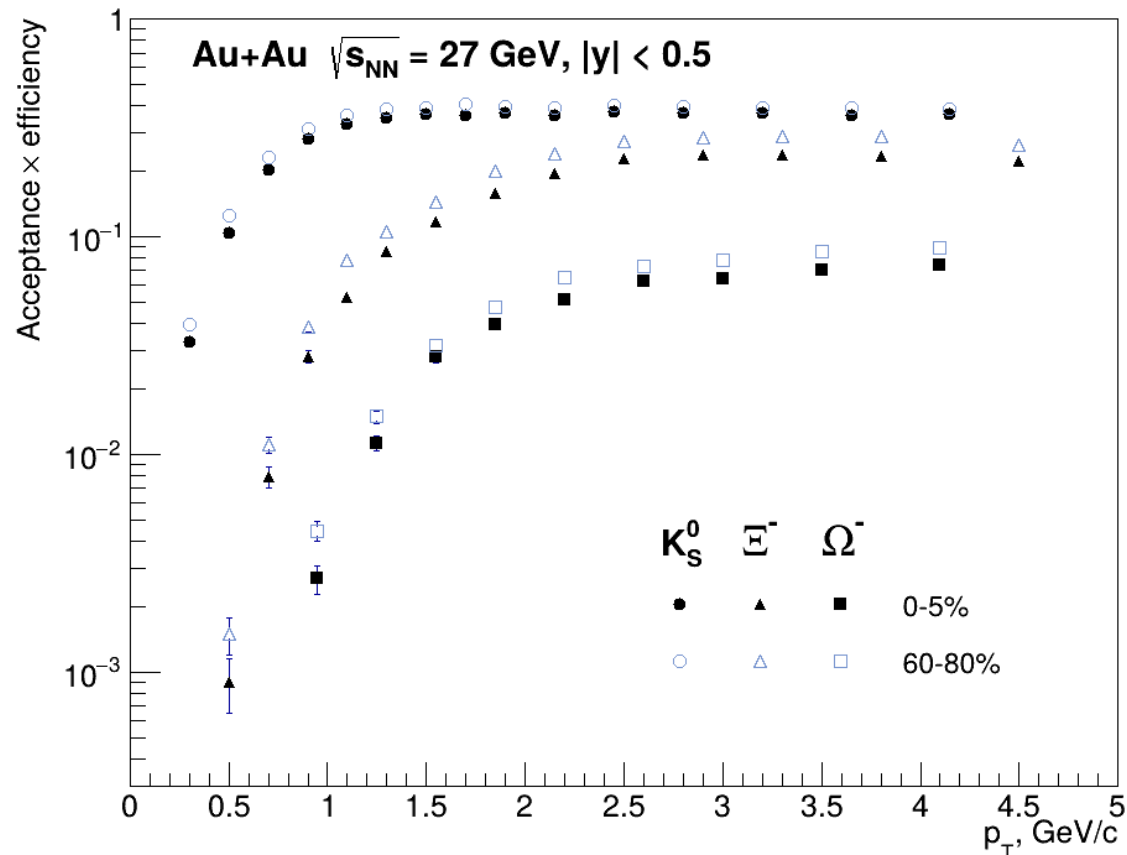
$$M = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Оценка фона — вращательный метод, заключающийся в повороте частицы и ее импульса на некоторый угол, что ломает все корреляции частиц в событии.

Сигнал фитируется суммой двух Гауссовых распределений



Эффективность реконструкции



- Акцептанс – область фазового пространства, в которой детектор может зарегистрировать частицу
- Эффективность – вероятность правильно зарегистрировать дочерние треки и реконструировать их в материнскую частицу

$$\text{Acceptance} \times \text{efficiency}(p_T, y) = \frac{N_{\text{rec}}^{\text{MC}}(p_T, y)}{N_{\text{embed}}^{\text{MC}}(p_T, y)}$$



Систематические ошибки

Стандартное измерение: $R^{\text{def}} \pm \sigma[R^{\text{def}}]$. Вариации: $R^{\text{var}} \pm \sigma[R^{\text{var}}]$

Систематические ошибки оцениваются с использованием теста Барлоу [1] – *ИСТОЧНИК СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ* учитывается, если:

$$|R^{\text{def}} - R^{\text{var}}| > \sqrt{|\sigma^2[R^{\text{def}}] - \sigma^2[R^{\text{var}}]|}$$

Систематическая ошибка от i -го источника j -й вариации:

$$\sigma_{\text{sys},i}^j[R] = \sqrt{|R^{\text{def}} - R^{\text{var}}|^2 - |\sigma^2[R^{\text{def}}] - \sigma^2[R^{\text{var}}]|}$$

Систематическая ошибка от i -го источника для m вариаций:

$$\sigma_{\text{sys},i}[R] = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m (\sigma_{\text{sys},i}^j[R])^2}$$

Полная систематическая ошибка для n источников сист. ошибки:

$$\sigma_{\text{sys}}^{\text{tot}}[R] = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{\text{sys},i}^2[R]}$$

- Варьируются топологические критерии отбора, параметры извлечения сигнала и критерии отбора дочерних частиц

[1] R. Barlow, arXiv:hep-ex/0207026 (2002)



Результаты



Экстраполяция в область малых p_T

1. Модель взрывной волны – частицы испускаются из источника, который радиально расширяется со скоростью $\beta(r) = \beta_s(r/R)^n$.

$$\frac{d^2N}{2\pi p_T dp_T dy} \propto \int_0^R r dr m_T I_0\left(\frac{p_T \sinh \rho(r)}{T}\right) K_1\left(\frac{m_T \cosh \rho(r)}{T}\right)$$

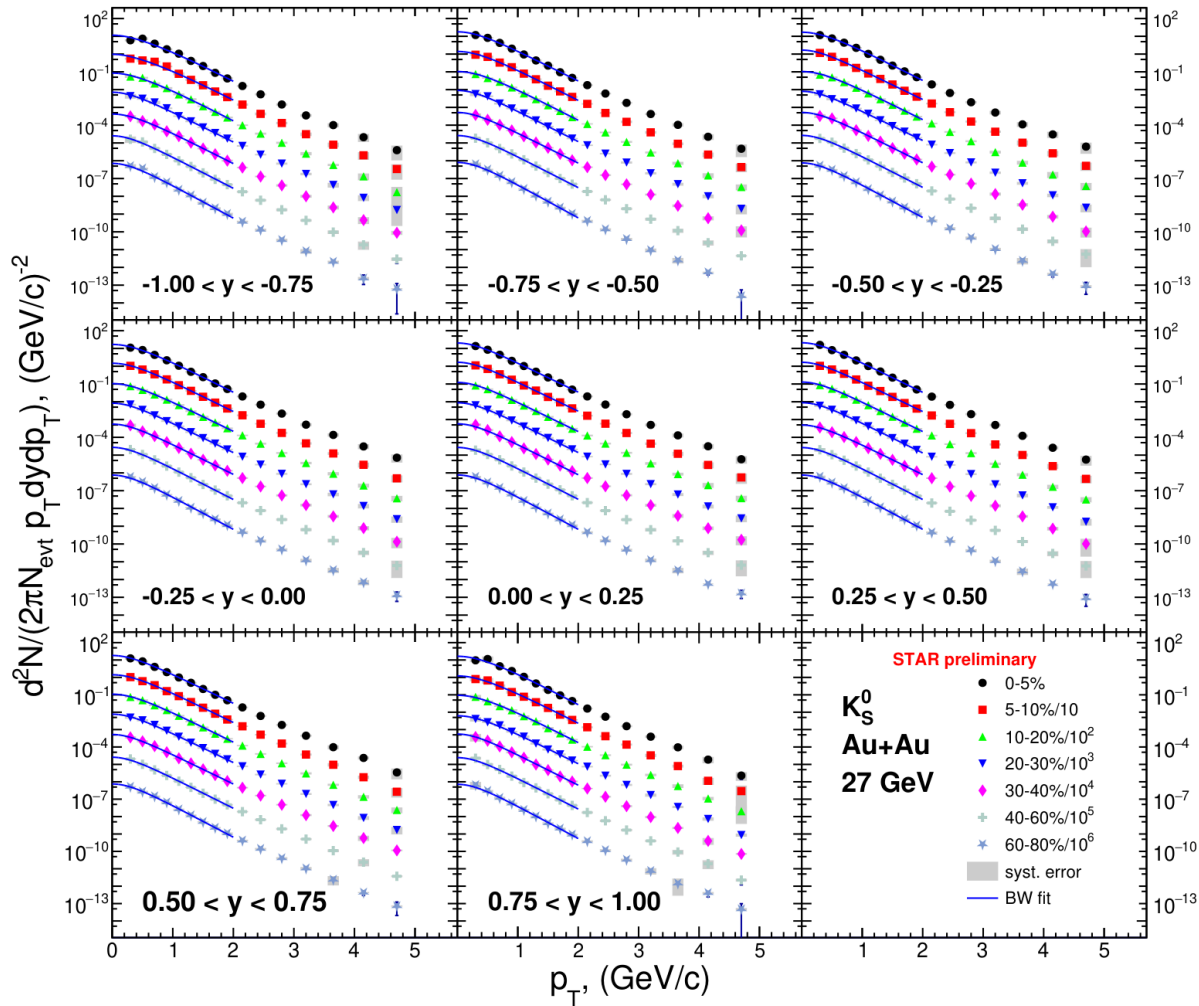
2. Статистика Больцмана – модель идеального газа в состоянии термодинамического равновесия, тепловое распределение частиц в отсутствие коллективного потока.

$$\frac{d^2N}{2\pi p_T dp_T dy} \propto m_T \exp\left(-\frac{m_T}{T}\right)$$

Цель – экстраполяция до $p_T = 0$ для получения dN/dy , а также термодинамических параметров.



p_T спектры K_S^0



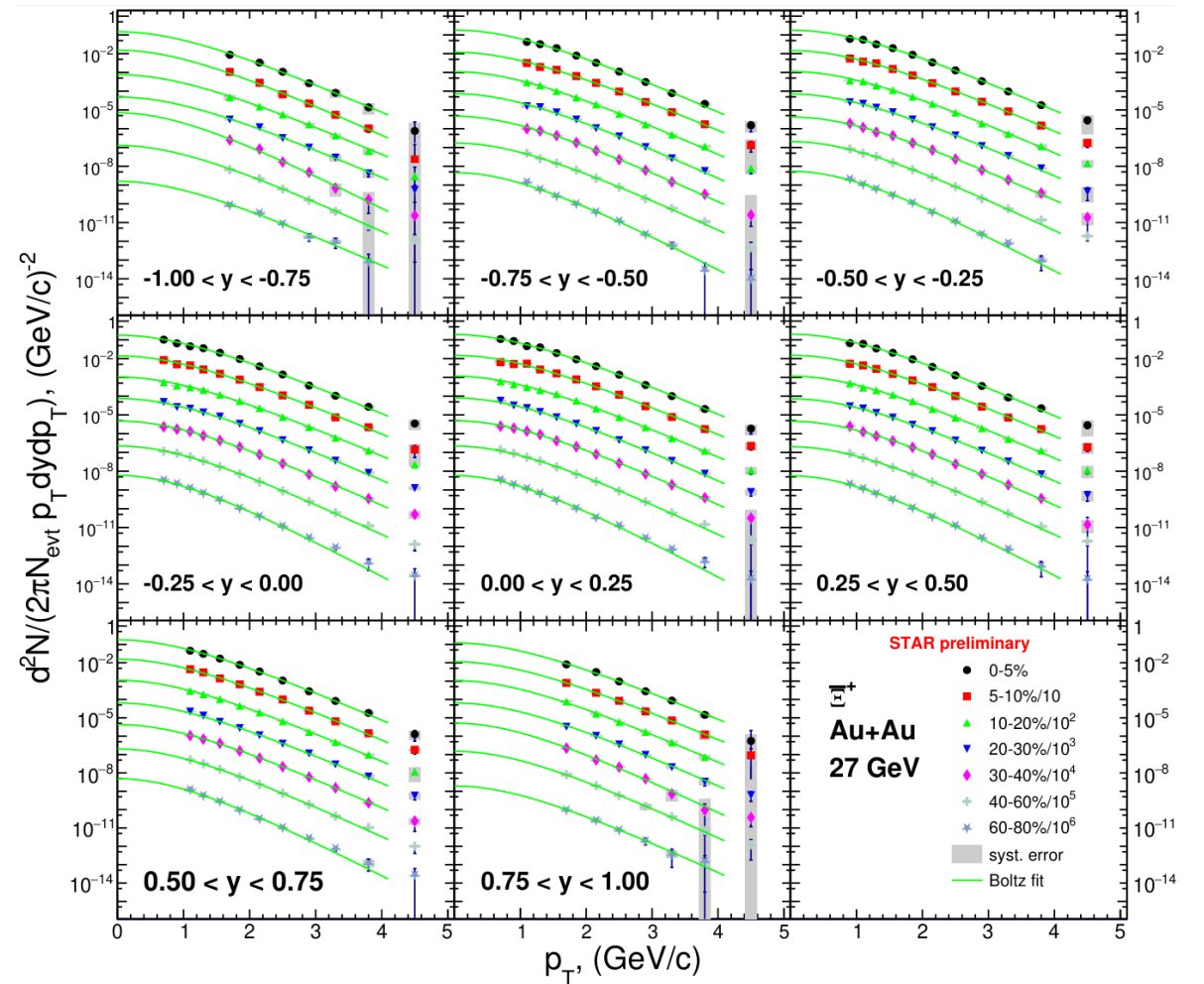
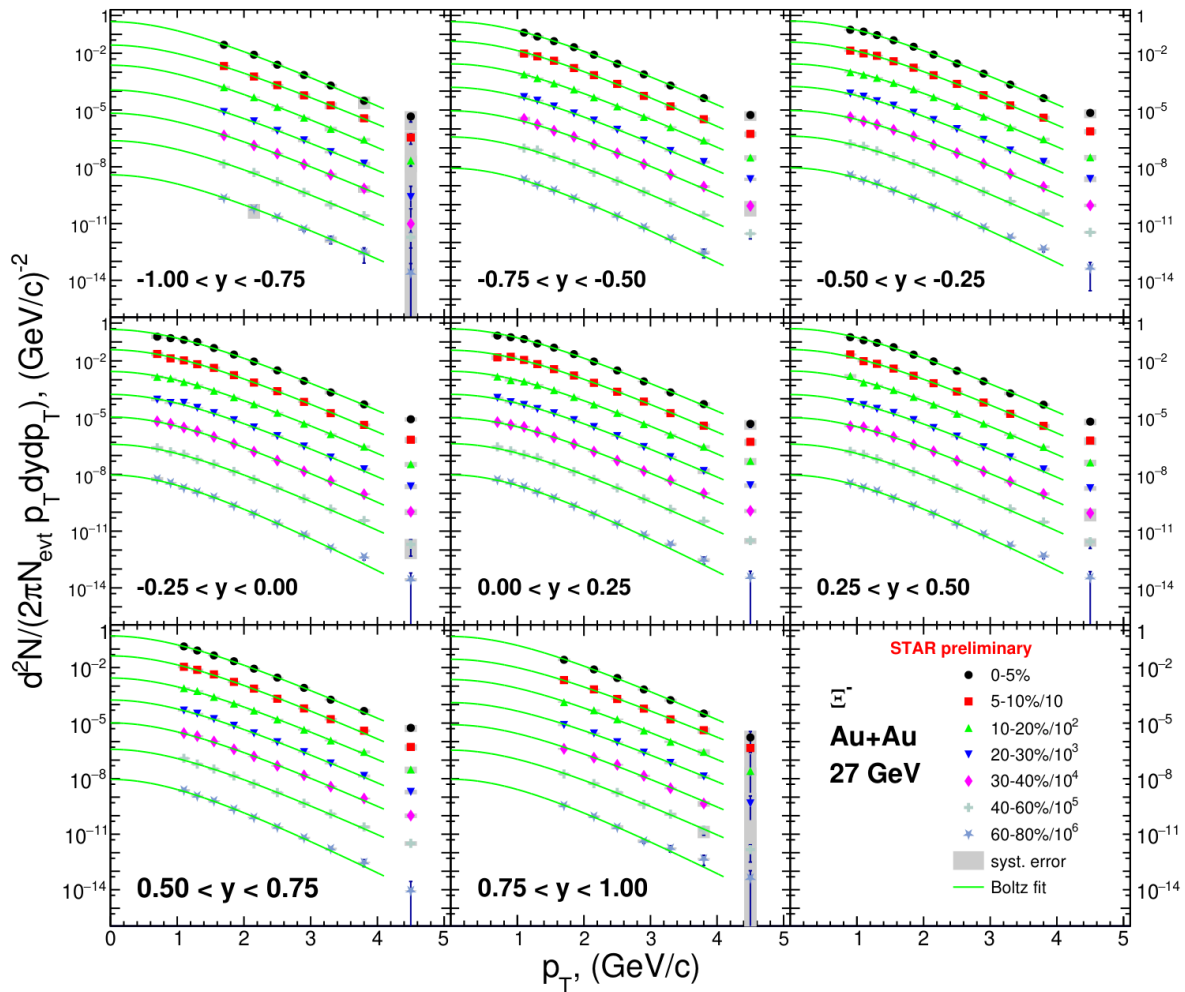
Фит: модель взрывной волны

$$\frac{d^2N}{2\pi p_T dp_T dy} \propto \int_0^R r dr m_T I_0\left(\frac{p_T \sinh \rho(r)}{T}\right) K_1\left(\frac{m_T \cosh \rho(r)}{T}\right)$$

Диапазон фита: $p_T \in [0.2, 2.0]$ ГэВ/с



p_T спектры Ξ

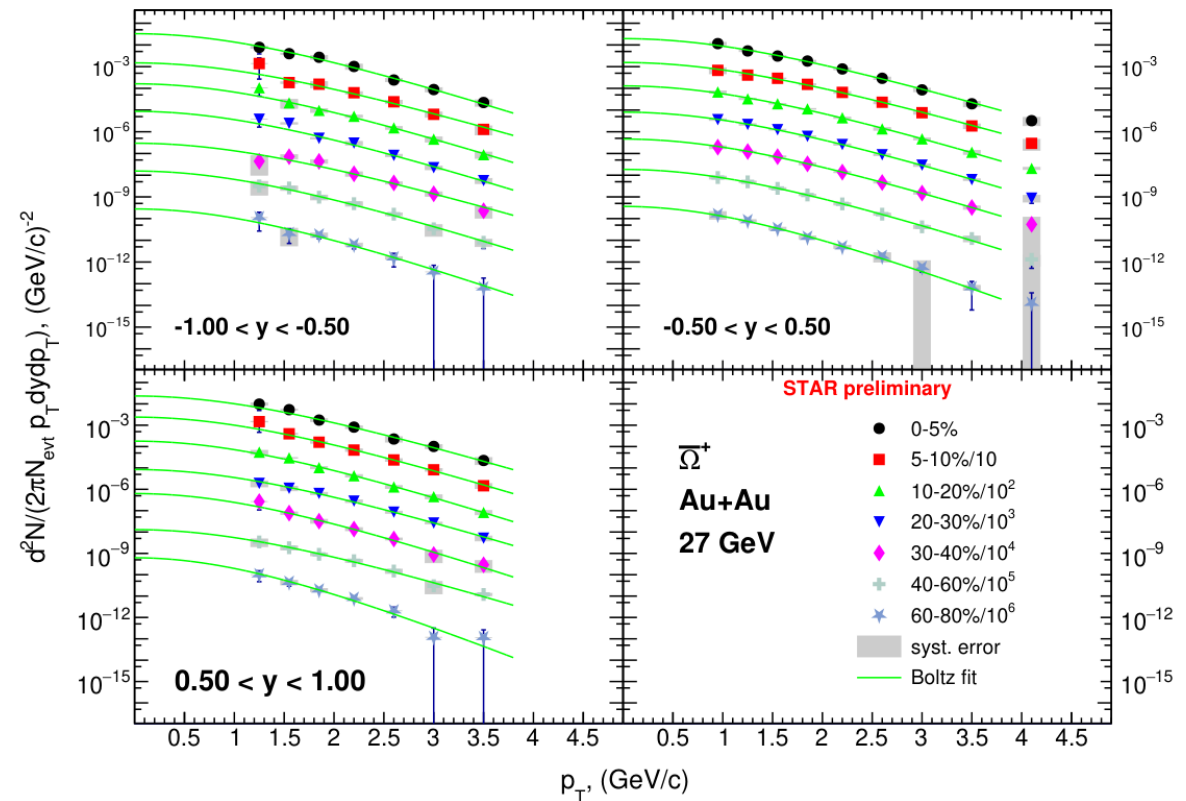
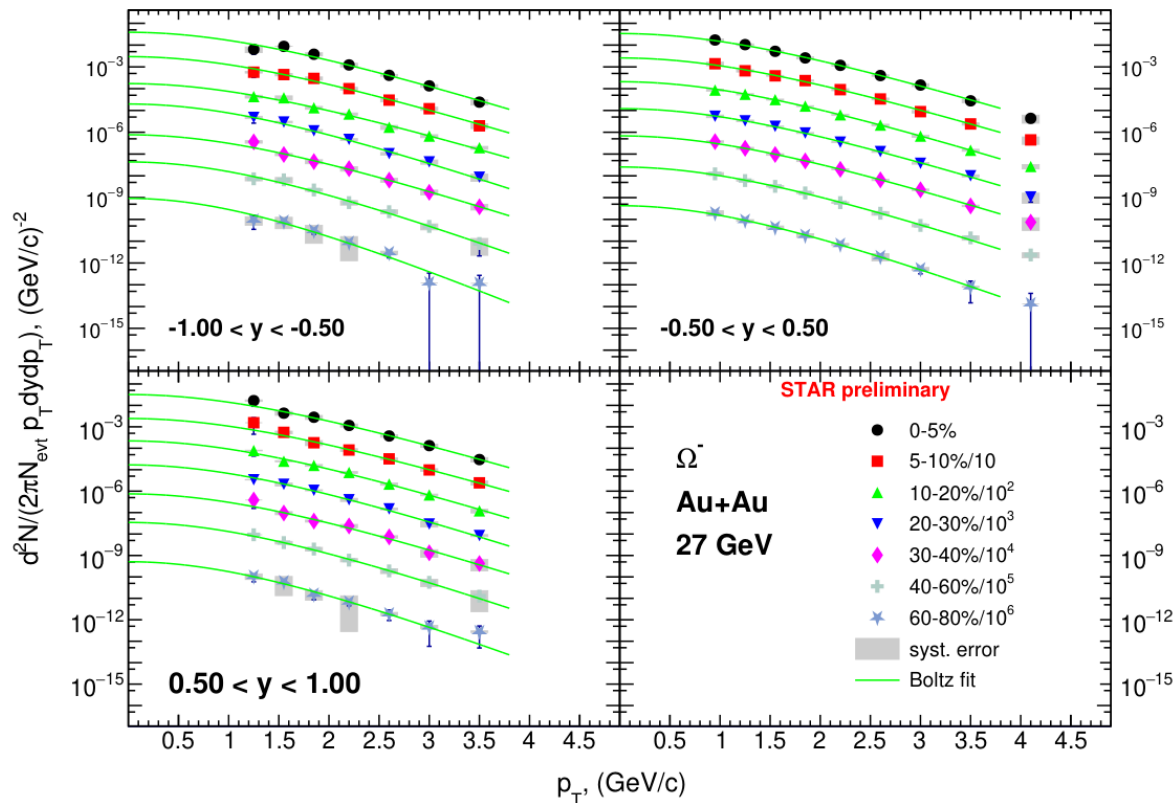


Фит - статистика Больцмана: $\frac{d^2N}{2\pi p_T dp_T dy} \propto m_T \exp\left(-\frac{m_T}{T}\right)$

Диапазон фита: $p_T \leq 4.1$ ГэВ/с



p_T спектры Ω

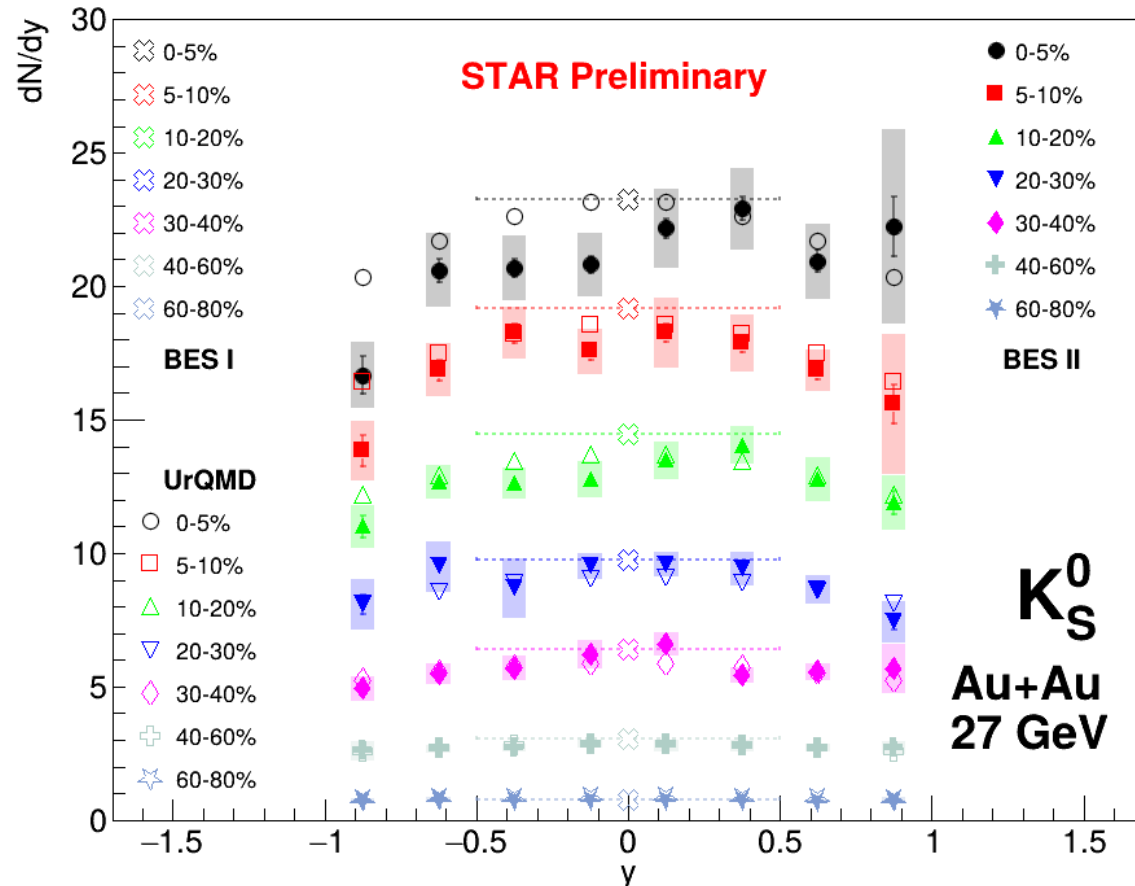


Фит - статистика Больцмана: $\frac{d^2N}{2\pi p_T dp_T dy} \propto m_T \exp\left(-\frac{m_T}{T}\right)$

Диапазон фита: $p_T \leq 3.8$ ГэВ/с



Интегральный выход K_S^0



В области $|y| < 0.75$ наблюдается близкое к плато распределение, что указывает на буст-инвариантность продольного расширения системы.

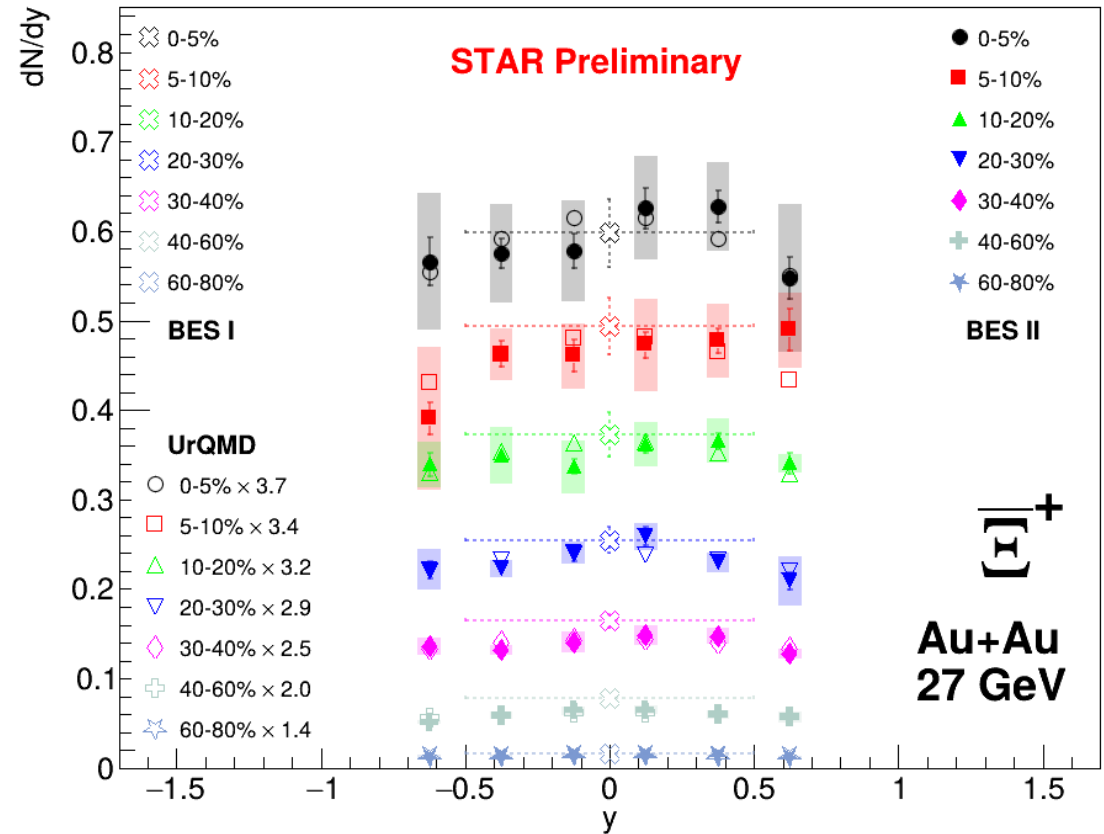
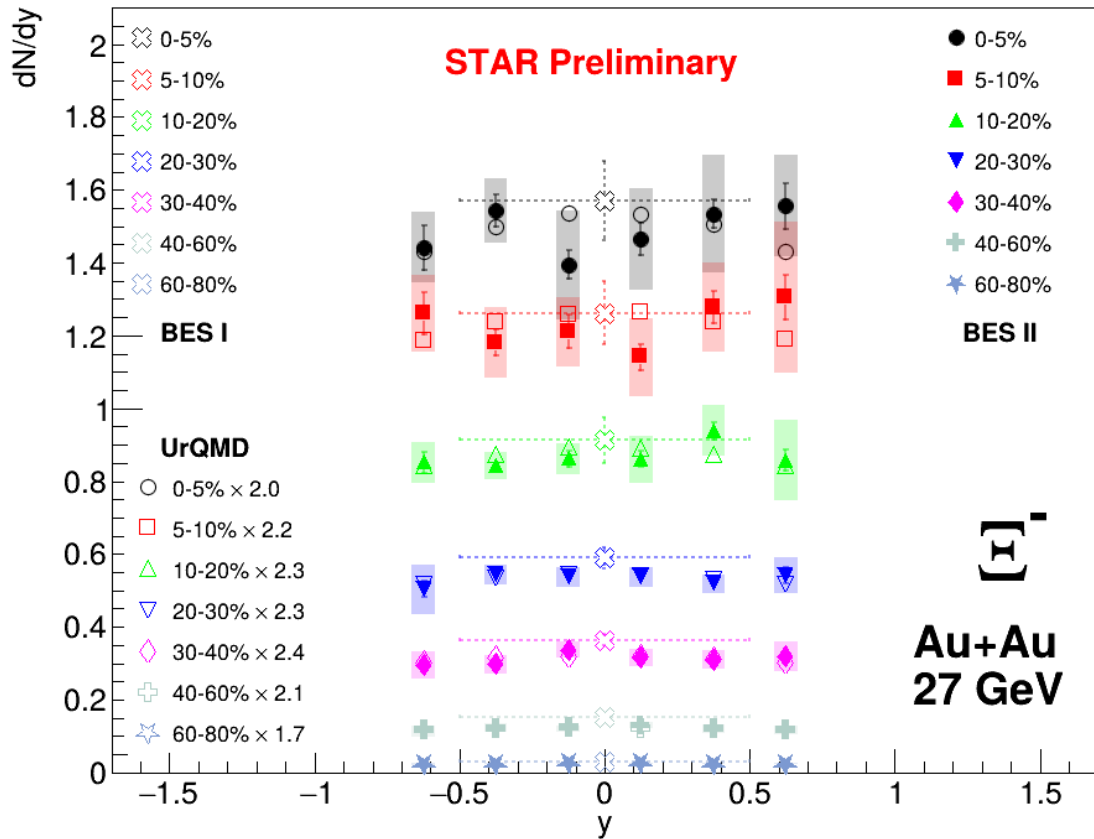
Низкая статистика в моделировании детектора TPC → значительные ошибки

A. Timofeev, A. Korobitsin, *Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 27$ GeV with UrQMD*, PEPAN, 2026 (в печати)

B. J. Adam et al. (STAR Collaboration), *Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27,$ and 39 GeV*, Phys. Rev. C 102, 034909, 2020.



Интегральный выход Ξ



В области $|y| < 0.75$ наблюдается близкое к плато распределение, что указывает на буст-инвариантность продольного расширения системы.

A. Timofeev, A. Korobitsin, *Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 27$ GeV with UrQMD*, PEPAN, 2026 (в печати)

B. J. Adam et al. (STAR Collaboration), *Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27,$ and 39 GeV*, Phys. Rev. C 102, 034909, 2020.



Выводы:

- Изучено рождение странных адронов в Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 27$ ГэВ:
 - Выполнена реконструкция странных адронов K_S^0, Ξ, Ω
 - Получены скорректированные спектры для K_S^0, Ξ, Ω для различных быстрых и центральных
 - Был применен термодинамический подход для экстраполяции спектров в область малых p_T и получения распределений dN/dy для K_S^0, Ξ^- и $\bar{\Xi}^+$
 - Подсчитаны систематические ошибки
- Наблюдается повышенный выход странных частиц по сравнению с адронной моделью UrQMD, что согласуется с ожиданиями



Выступления и публикации

Материалы работы докладывались на следующих школах и конференциях:

- 10th edition of the Workshop for Young Scientists on the Physics of Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Hot Quarks 2025), Хэфэй, Китай
- XXVIth International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics", Дубна, Россия
- 25th Zimányi school winter workshop on heavy ion physics, Будапешт, Венгрия
- 68-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия

Были приняты к публикации следующие статья и тезис конференции:

- A. Timofeev, A. Korobitsin, *Strange hadron production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3 - 27$ GeV with UrQMD*, PEPAN, 2026 (принято к публикации)
- А. Тимофеев, *Рождение странных адронов в столкновениях Au+Au при энергиях 3 - 27 ГэВ в эксперименте STAR*, (принято к публикации в издательстве МФТИ)



Благодарности

Выражаю благодарности:

- Научному руководителю *Теряеву Олегу Валериановичу* и научному консультанту *Апарину Алексею Андреевичу* за помощь в написании данной работы
- Коллегам *Недорезову Егору Вячеславовичу* и *Льонгу Ба Виню* за ценные советы и обсуждения в ходе работы
- Коллективу кафедры *ФЭЧ МГУ*

