

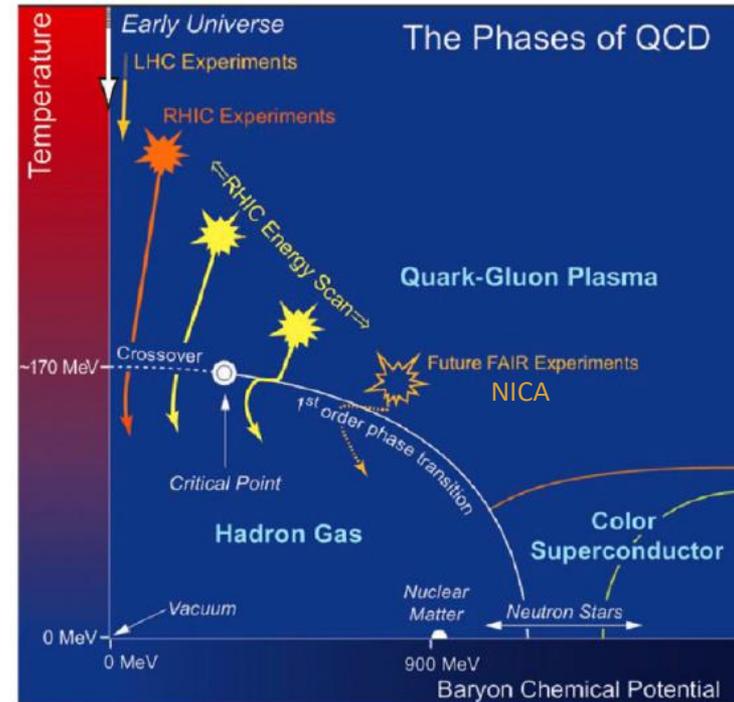
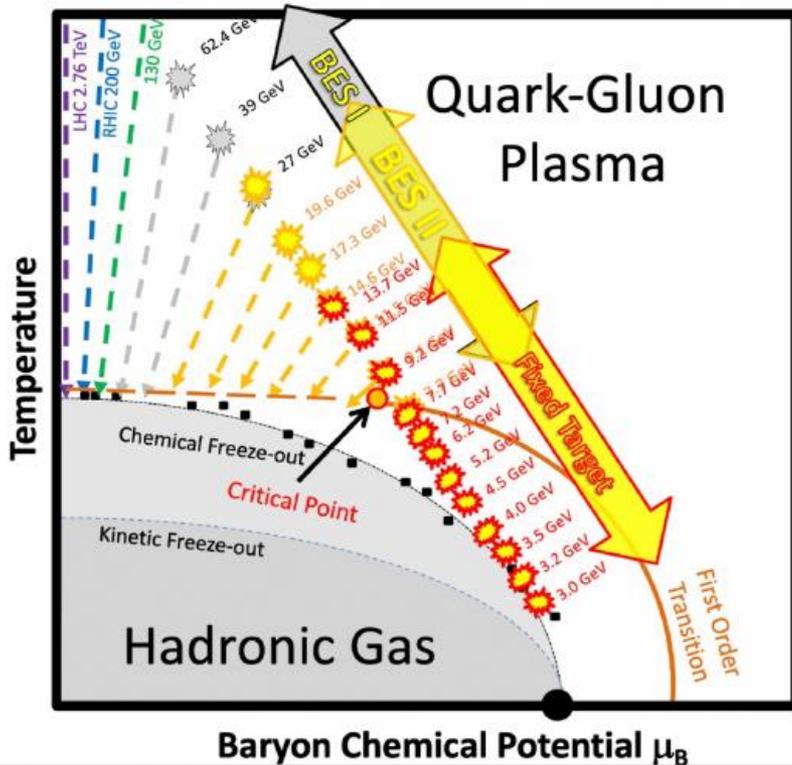
Изучение спектров и фемтоскопических корреляций в Au+Au взаимодействиях на установке STAR

**Кечечян А.О.
ЛФВЭ ОИЯИ**

Содержание

- Введение
- Эксперимент **STAR**
- Спектры отрицательно заряженных частиц (BES I)
- Самоподобие спектров
- Спектры K_S^0 -мезонов (Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ ГэВ)
- Фемтоскопические корреляции пар K_S^0 -мезонов
- Выводы

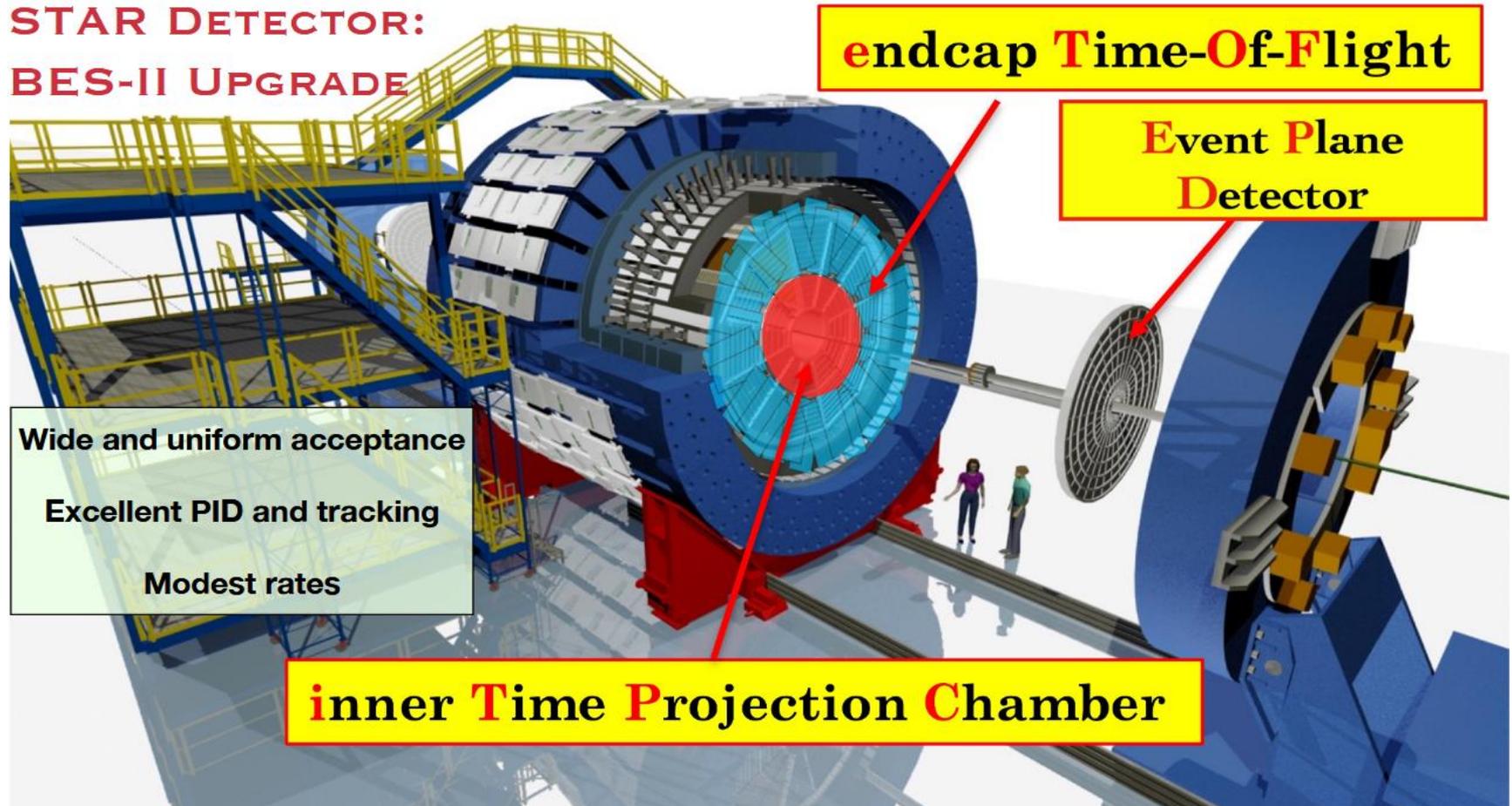
Взаимодействия тяжелых ионов



- Начало деконфайнмента
- Структура фазовой диаграммы ядерной материи
- Материя с высокой плотностью барионов
- Свойства КГП...

STAR

STAR DETECTOR: BES-II UPGRADE



- Модернизация внутренних секторов время-проекционной камеры (iTPC) обеспечивает изучение рождения частиц в более широкой области псевдобыстрот ($-1.5, 1.5$), лучшую эффективность реконструкции маленьких импульсов ($>70\text{MeV}/c$) и хорошее разрешение по dE/dx
- Большая статистика данных, полученных по программе BES-II позволяет получать спектры K_S^0 -мезонов с высокой точностью, особенно в области малых импульсов

BES-I, BES-II, FXT

2018 - Isobars (Ru/Zr), Au+Au 27 GeV, FXT: 3.0, 7.2

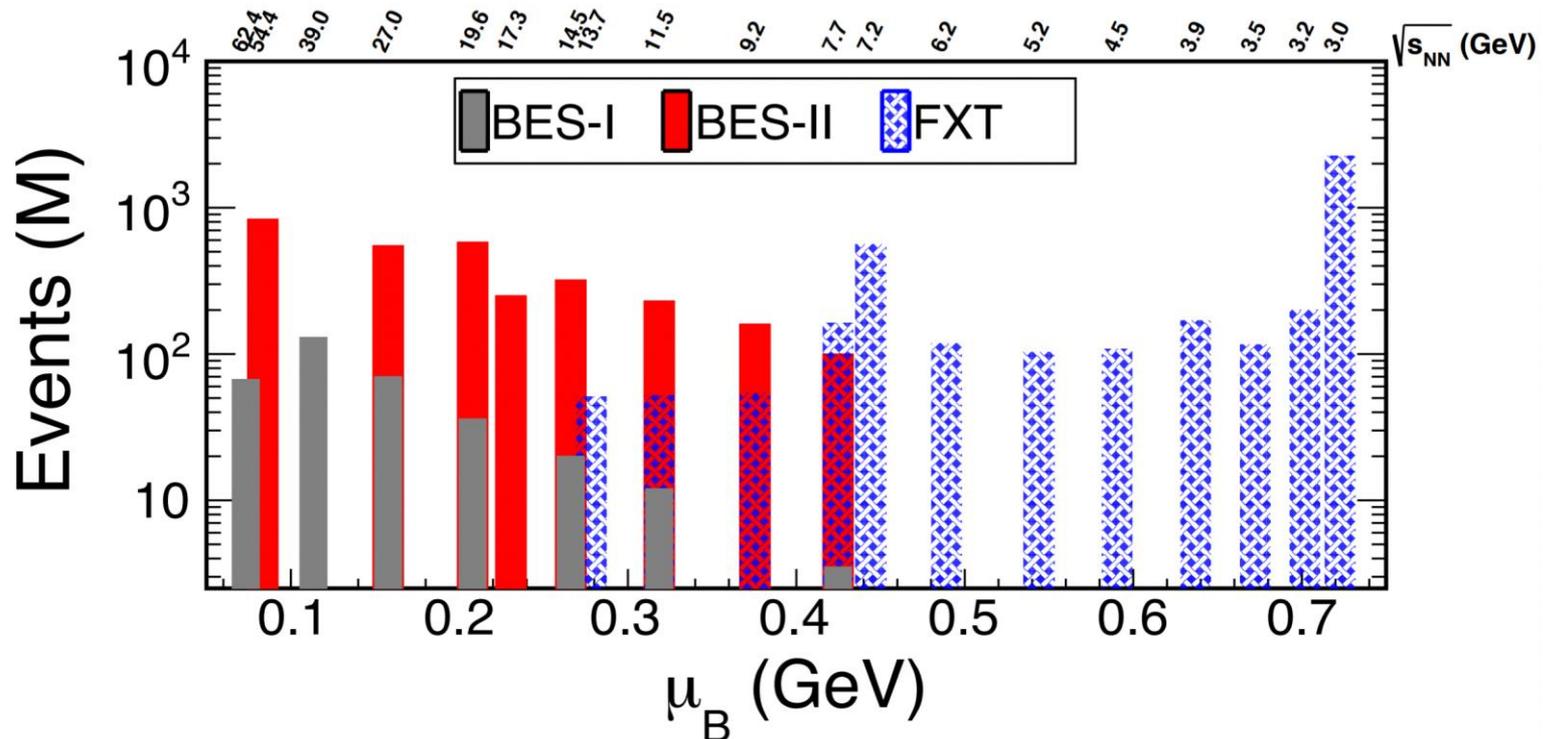
2019 - **19.6**, 14.6, 200 GeV, FXT 3.2

2020 - 11.5, 9.2, FXT: 3.5, 3.9, 4.5, 5.2, 6.2, 7.7

2021 - 7.7, 17.3, O+O, d+Au, FXT: 3.0, 9.2, 11.5, 13.7

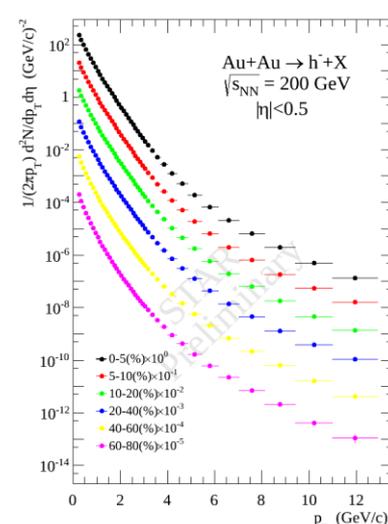
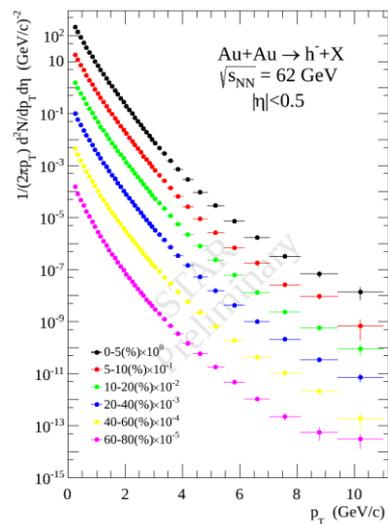
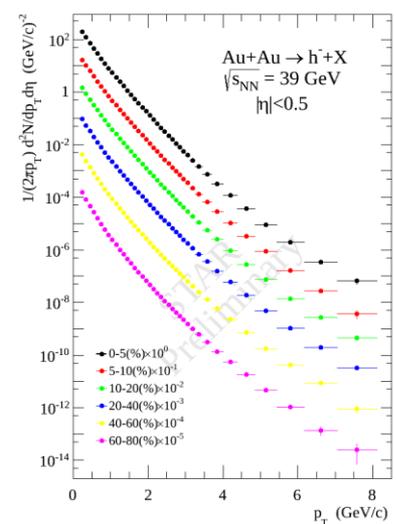
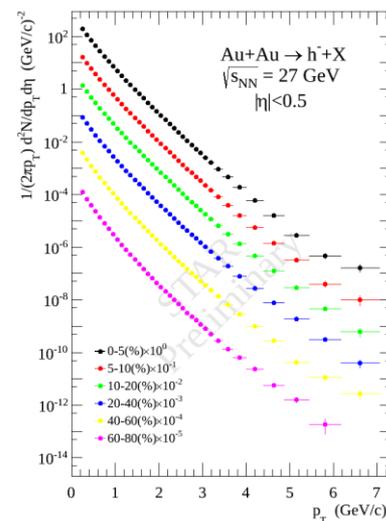
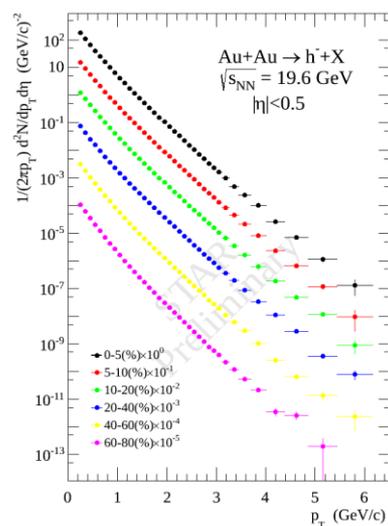
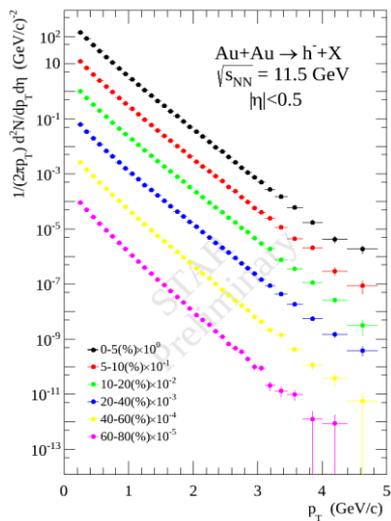
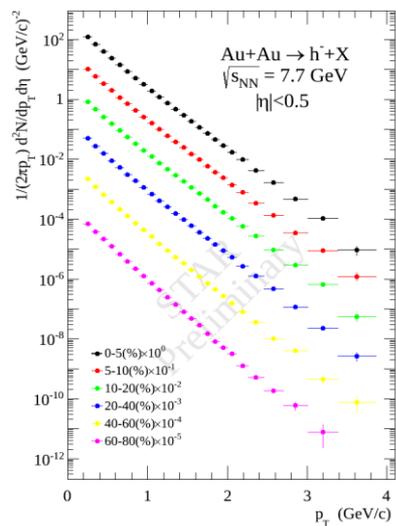
2022 - p+p 510 2023 - Au+Au 200

2024/25 - Au+Au 200, p+p 200 and p+Au 200



Импульсные спектры отрицательно заряженных частиц

RHIC BES-I энергии + 62 GeV, 200 GeV



M.Tokarev, I.Zborovsky,
 A.Kechechyan, Nucl. Phys.
 A993 (2020) 121646

- Спектры зависят от энергии столкновения
- Экспоненциальная зависимость при маленьких импульсах
- Зависимость спектров от центральности
- Степенная зависимость при больших импульсах

Self-similarity parameter

$$z = z_0 \Omega^{-1}$$

$$z_0 = \frac{S_{\perp}^{1/2}}{(dN_{ch}/d\eta|_0)^c m_N}$$

$$\Omega = (1-x_1)^{\delta_{A1}} (1-x_2)^{\delta_{A2}} (1-y_a)^{\varepsilon} (1-y_b)^{\varepsilon}$$

- $dN_{ch}/d\eta|_0$ - multiplicity density
- c_{AA} - “specific heat” of bulk matter
- δ_A - nucleus fractal dimension
- ε_{AA} - fragmentation dimension

AA collisions:

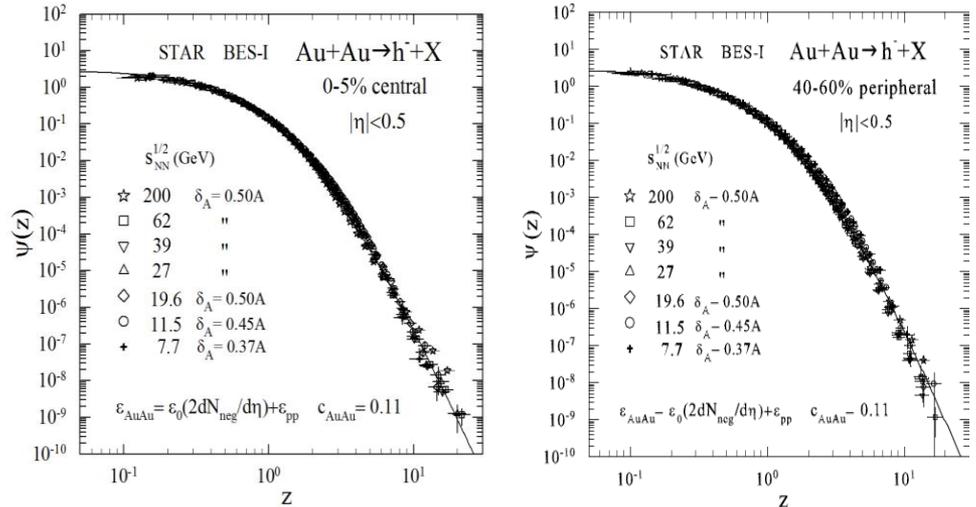
$$\delta_A = A\delta$$

$$\varepsilon_{AA} = \varepsilon_0 (dN_{AA}/d\eta) + \varepsilon_{pp}$$

Scaling function

$$\Psi(z) = \frac{\pi}{(dN/d\eta) \sigma_{inel}} J^{-1} E \frac{d^3\sigma}{dp^3}$$

“Collapse” of data points onto a single curve



- Energy independence of $\Psi(z)$
- Centrality independence of $\Psi(z)$
- Dependence of ε_{AA} on multiplicity
- Power law at low- and high- z regions

Indication of a decrease of δ for $\sqrt{s_{NN}} < 19.6$ GeV

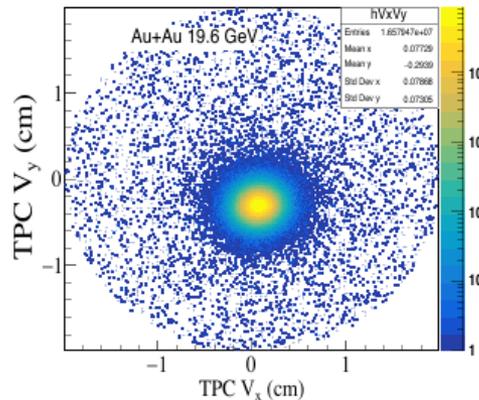
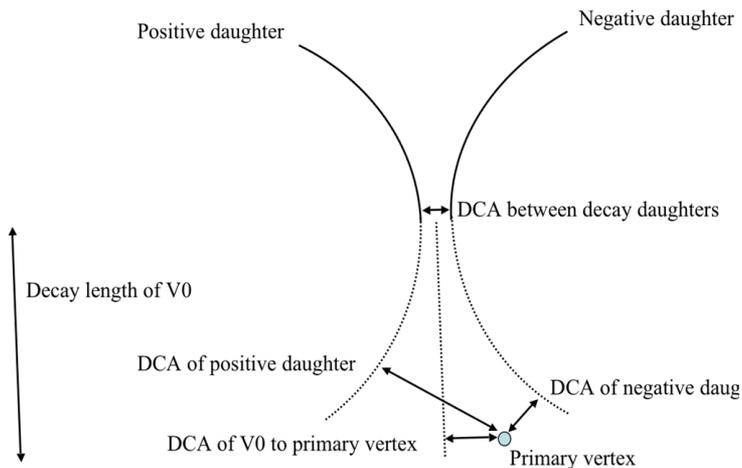
Отбор событий и треков

Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ ГэВ ~ 600 млн событий

$K_S^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ $p_{\pi}^* = 206$ МэВ/с $\tau = 2.6844$ см

⊕ Magnetic field

Топологический метод

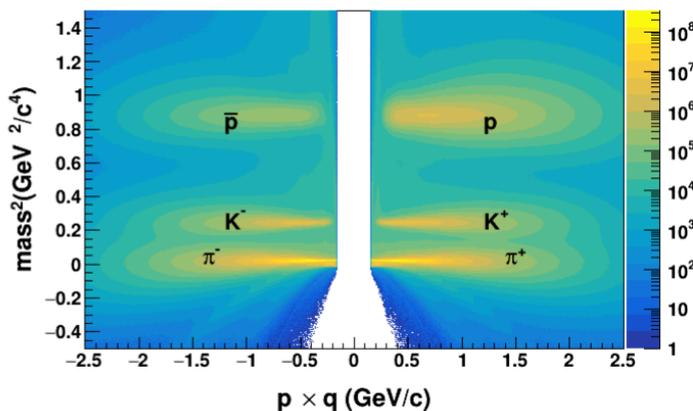
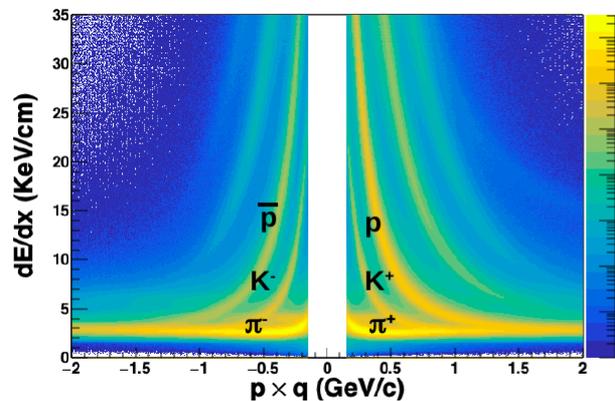


Отбор событий	
Vz	< 145 cm
Vr	< 2.0 cm
Vz-Vpdvz	< 5 cm

Отбор треков	
N hits	>10
N hits / N hits max	>0.51
DCA of track(+) to PV	>1.0 cm
DCA of track(-) to PV	>1.0 cm
DCA of track(+) to track(-)	<0.6 cm
Decay length of V0	>1.0 cm
DE/dx nsigma	<3.0
m_{tof}^2	<0.2

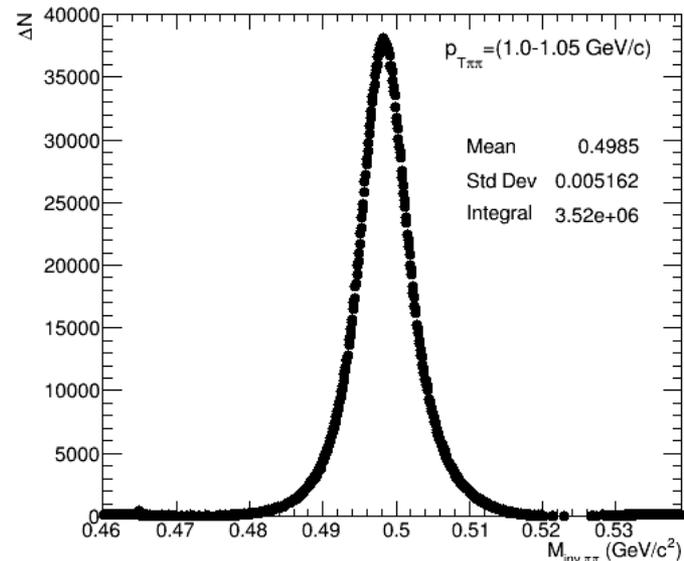
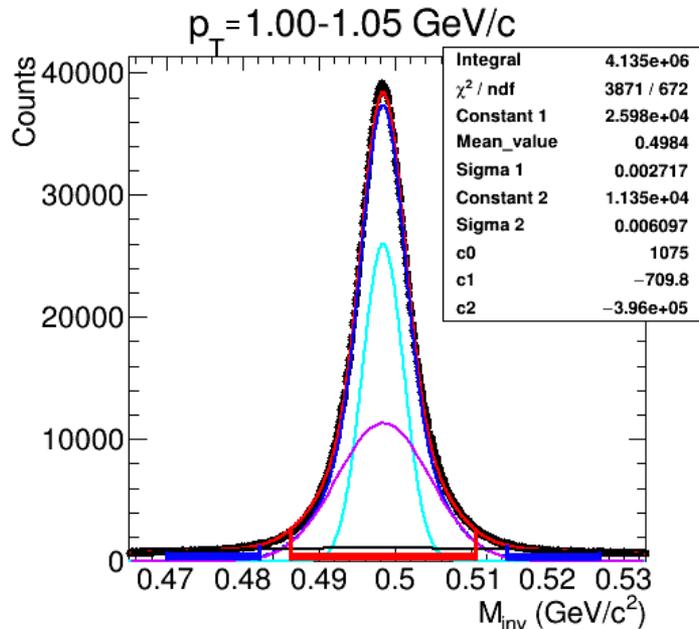
TPC

ToF

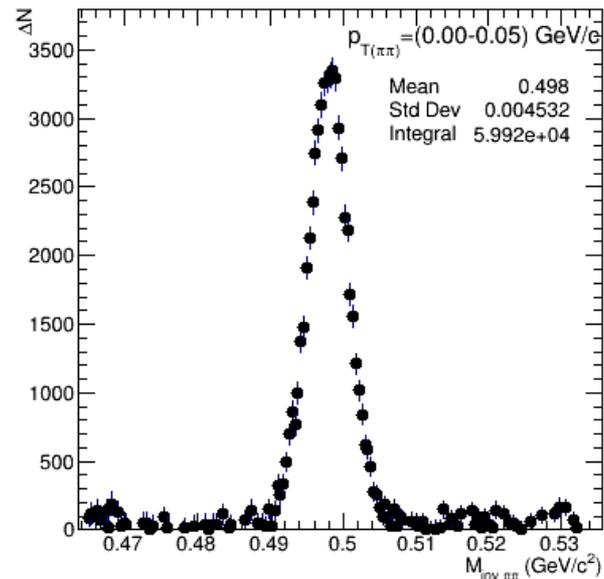


Идентификация частиц

Реконструкция K_S^0 -мезонов



$p_T = (0.0 - 0.05) \text{ GeV}/c$



Центральность: (0-5)% ; быстрота: (-1.5,1.5)

$$f(x) = \text{Pol}_2(x) + c_1 \text{Gaus}_1(x) + c_2 \text{Gaus}_2(x)$$

Сигнал:

$$M_{inv \text{ mean}} - 3\sigma_{12} < M_{inv} < M_{inv \text{ mean}} + 3\sigma_{12}$$

Фон:

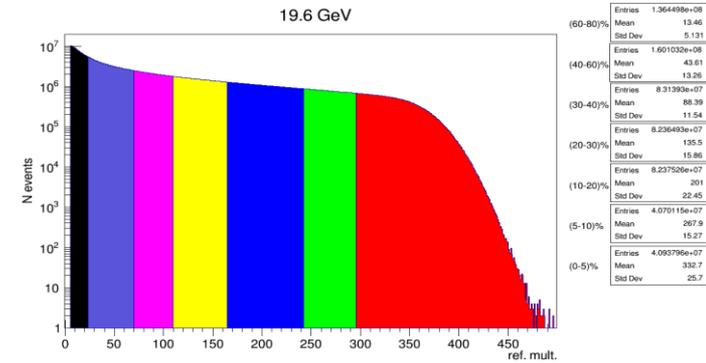
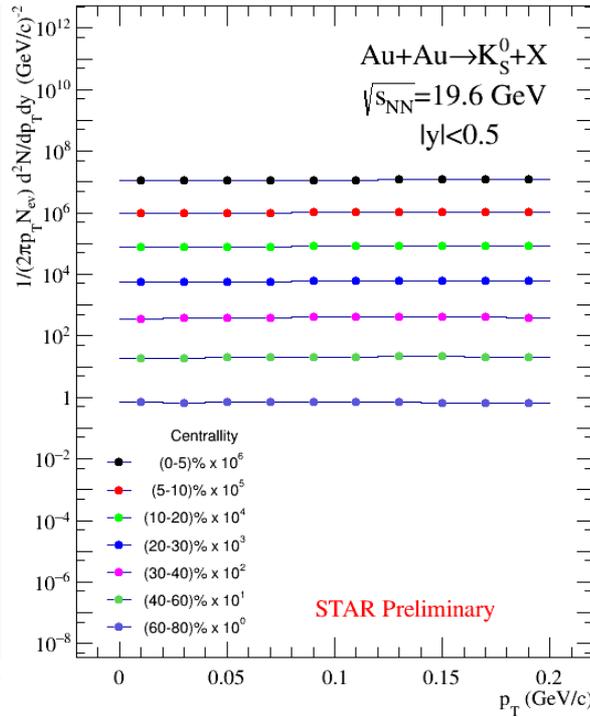
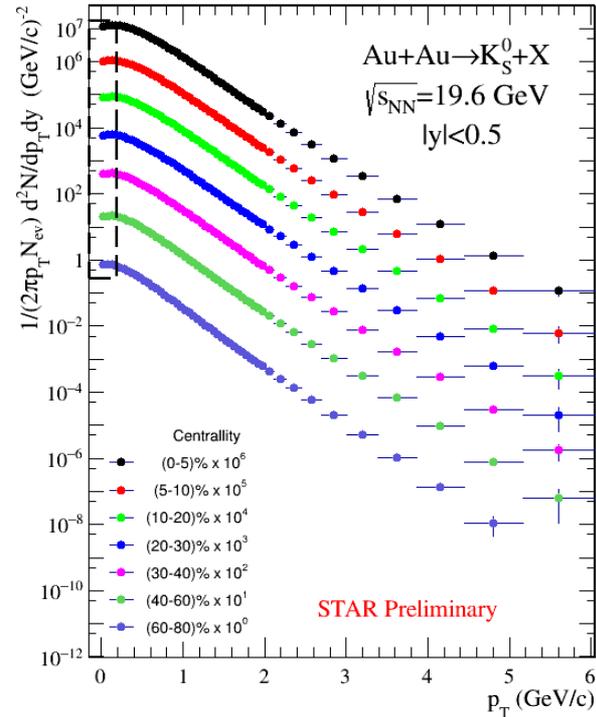
$$M_{inv \text{ mean}} - 7\sigma_{12} < M_{inv} < M_{inv \text{ mean}} - 4\sigma_{12}$$

$$M_{inv \text{ mean}} + 4\sigma_{12} < M_{inv} < M_{inv \text{ mean}} + 7\sigma_{12}$$

Спектры K_S^0 -мезонов

$p_T = 0-6$ ГэВ/с

$p_T = 0-0.2$ ГэВ/с



- основная масса частиц, образующихся в ядерных столкновениях имеют $p_T < 1$ ГэВ
- более крупные системы испускают частицы при низких поперечных импульсах:

$$p_T < 1000 \text{ МэВ/с} \quad - \quad r_T > 0.2 \text{ фм}$$

$$p_T < 100 \text{ МэВ/с} \quad - \quad r_T > 2 \text{ фм}$$

$$p_T < 20 \text{ МэВ/с} \quad - \quad r_T > 10 \text{ фм}$$

(Соотношение Гейзенберга)

Фемтоскопия

- Для термодинамического подхода к изучению взаимодействий тяжелых ионов необходимо знать эффективный размер источника и время существования системы.
- Поэтому одной из важных целей в экспериментах с высокими энергиями за последние несколько десятилетий было измерение пространственно-временной картины области испускания частиц.
- Эти измерения основаны на чувствительности корреляций импульсов тождественных частиц к геометрическим размерам области множественной генерации и длительности процесса генерации из-за эффектов квантовой статистики (КС) и взаимодействия в конечном состоянии (ВКС).
- Для нейтральных каонов можно получить чистый сигнал (из-за малого вклада резонансов и потерь при прохождении через вещество).
- Нейтральные каоны могут быть восстановлены в широком диапазоне энергий, используя их топологию распада. Это позволяет исследовать большой диапазон времени взаимодействия.
- Отсутствие кулоновского ВКС вместе с небольшими вкладами от резонансных распадов делают корреляции пар $K_S^0 K_S^0$ мощным инструментом для исследования пространственно-временной структуры источника испускания частиц.

Свойства нейтральных каонов

- В сильных взаимодействиях образуются нейтральные каоны, K^0 и \bar{K}^0 , с сохранением странности.
- Интересным свойством нейтральных каонов является то, что K^0 может превратиться в \bar{K}^0 посредством слабого взаимодействия второго порядка.
- Однако частицы, которые мы обычно наблюдаем через слабые каналы распада, не являются не K^0 и не \bar{K}^0 . Пренебрегая эффектами нарушения CP, наблюдаемые собственные состояния слабого взаимодействия определяются как

$$|K_s^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_l^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

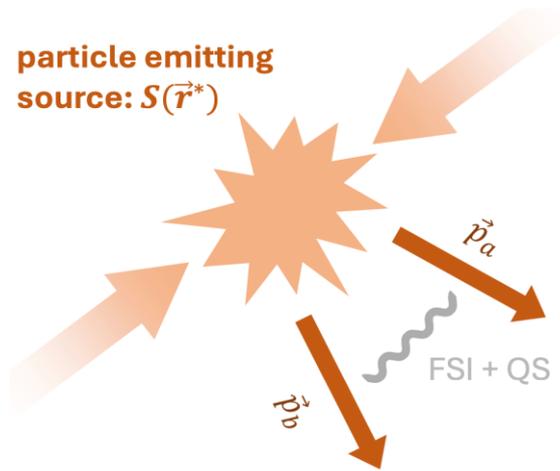
где $|K_s^0\rangle$ и $|K_l^0\rangle$ — векторы состояния короткоживущих и долгоживущих нейтральных каонов, которые регистрируются в экспериментах

$$|K_s^0 K_s^0\rangle = \frac{1}{2} (|K^0 K^0\rangle + |K^0 \bar{K}^0\rangle + |\bar{K}^0 K^0\rangle + |\bar{K}^0 \bar{K}^0\rangle)$$

Таким образом, если пара $K_s^0 K_s^0$ состоит из пары $K^0 K^0$ или $\bar{K}^0 \bar{K}^0$ то является системой **тождественных** бозонов и должно наблюдаться усиление выходов при малых относительных импульсах согласно статистике Бозе-Эйнштейна .

Фемтоскопия K_S^0 -мезонов

particle emitting source: $S(\vec{r}^*)$



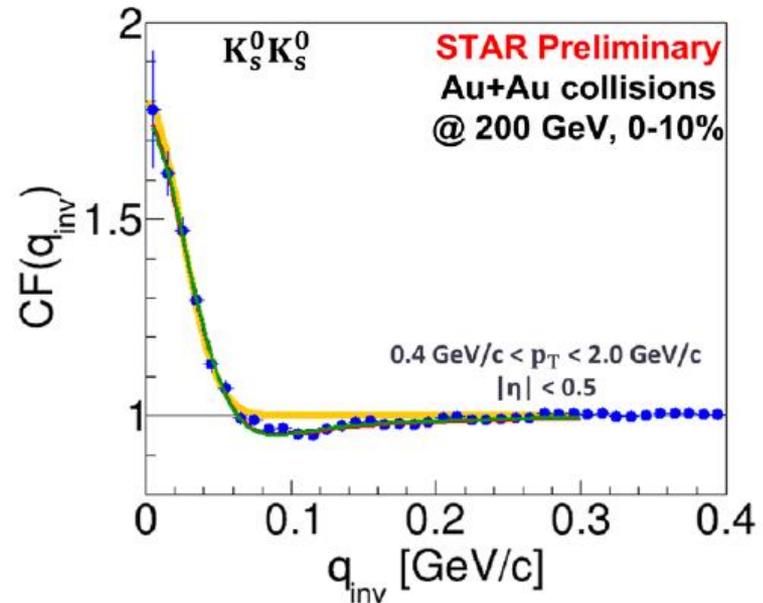
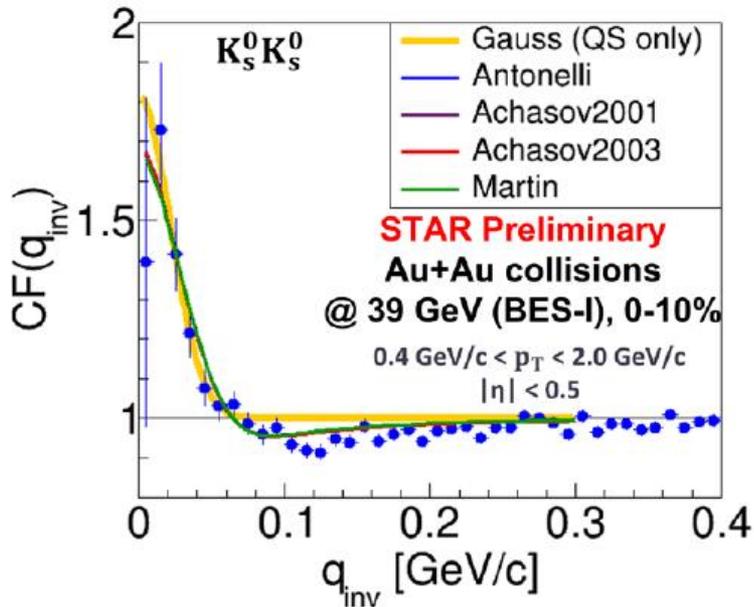
Приближение Ледницкого-Любошица включая взаимодействие в конечном состоянии (сильное взаимодействие)

QS effect

Strong interaction through $f_0(980)$ / $a_0(980)$ resonances

$$CF(q_{inv}) = 1 + \lambda \left(e^{-[R_G^2 q_{inv}^2]} + \frac{1 - \epsilon^2}{2} \left[\left| \frac{f(k^*)}{R_G} \right|^2 + \frac{4\text{Re}[f(k^*)]}{\sqrt{\pi}R_G} F_1(q_{inv}R_G) - \frac{2\text{Im}[f(k^*)]}{R_G} F_2(q_{inv}R_G) \right] \right)$$

R_G – радиус источника; $q_{inv} = \sqrt{-(P_1 - P_2)^2}$



Корреляционная функция $K_S^0 K_S^0$ пар мезонов

Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}}=19.6$ GeV
MinBias

$$C(Q) = \frac{A(Q)}{B(Q)}$$

$A(Q)$ – распределение для K_S^0 -й из одного и того же события
 $B(Q)$ – распределение для K_S^0 -й из разных событий

Фит. функция:

$$C(Q) = N \cdot (1 + \lambda \cdot \exp(-R^2 \cdot Q^2))$$

где $Q^2 = -(P_1 - P_2)^2$,

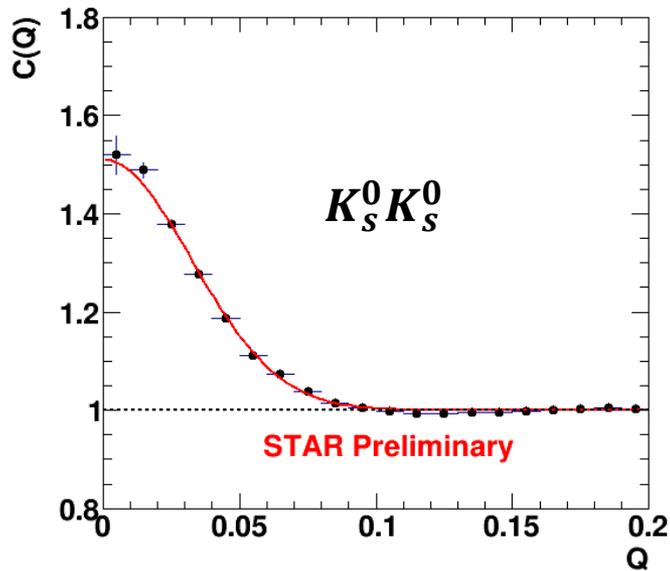
R – радиус источника

λ – сила корреляции

N – нормировка

$$\lambda = 0.512 \pm 0.009$$

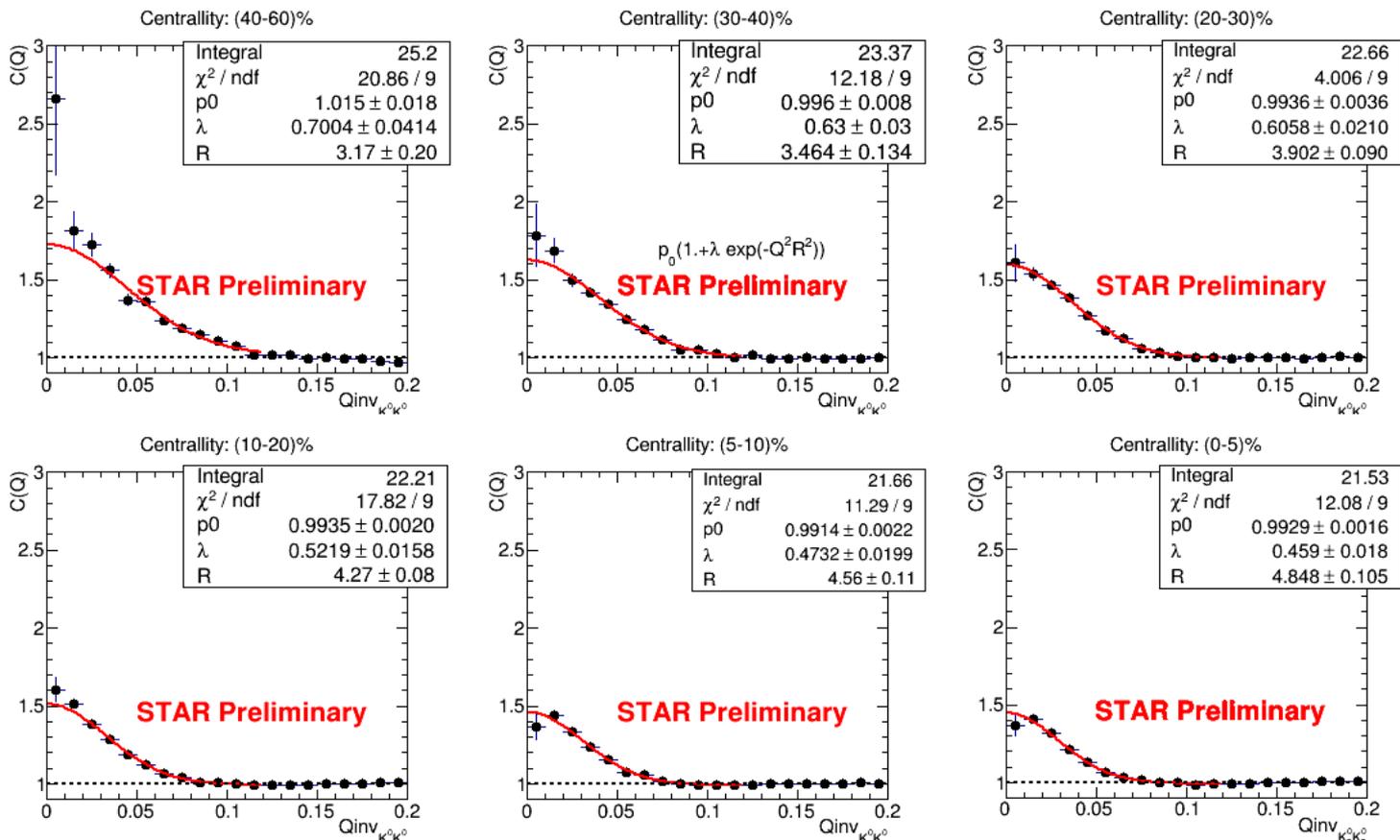
$$R = 4.466 \pm 0.053 \text{ фм}$$



Корреляционная функция $K_S^0 K_S^0$ пар мезонов

Au+Au @ $\sqrt{s_{NN}}=19.6$ ГэВ/с

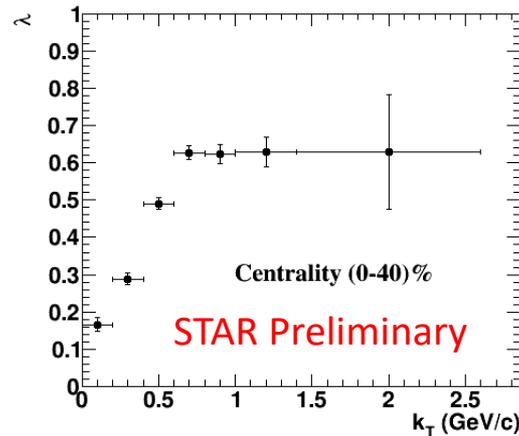
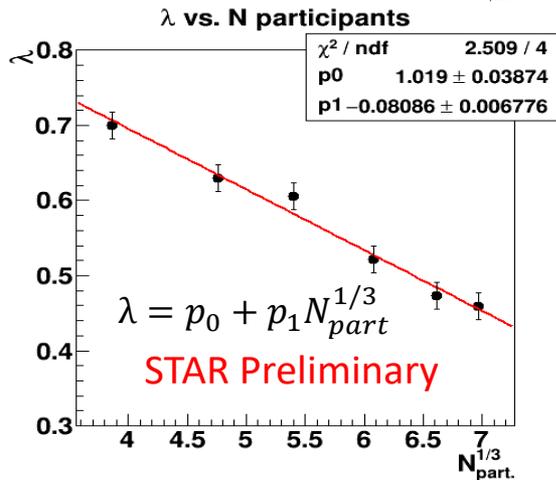
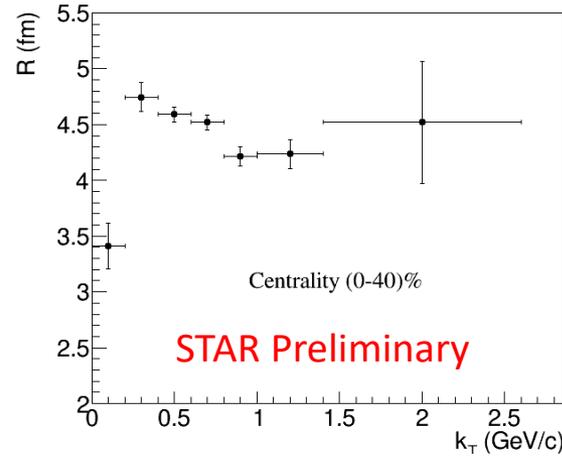
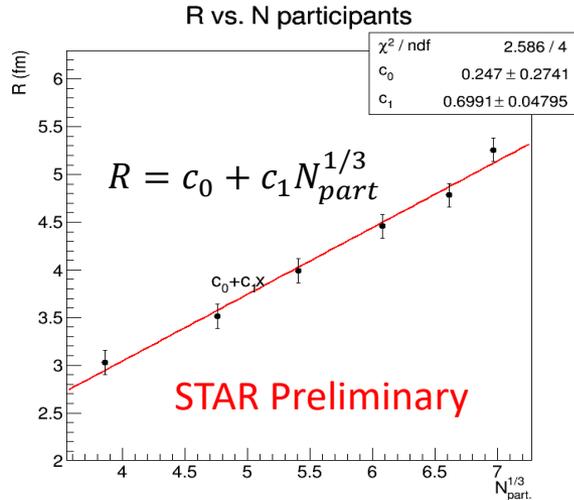
центральности (0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60)%



$$C(Q_{inv}) = N \cdot (1 + \lambda \cdot \exp(-R^2 \cdot Q_{inv}^2))$$

- Хорошая аппроксимация одной функцией Гаусса
- Значимого вклада взаимодействия в конечном состоянии не наблюдается

Зависимость параметров от N_{part} и k_T



$$k_T = (|\mathbf{p}_{1T} + \mathbf{p}_{2T}|)/2$$

N_{part} - из модели Глаубера

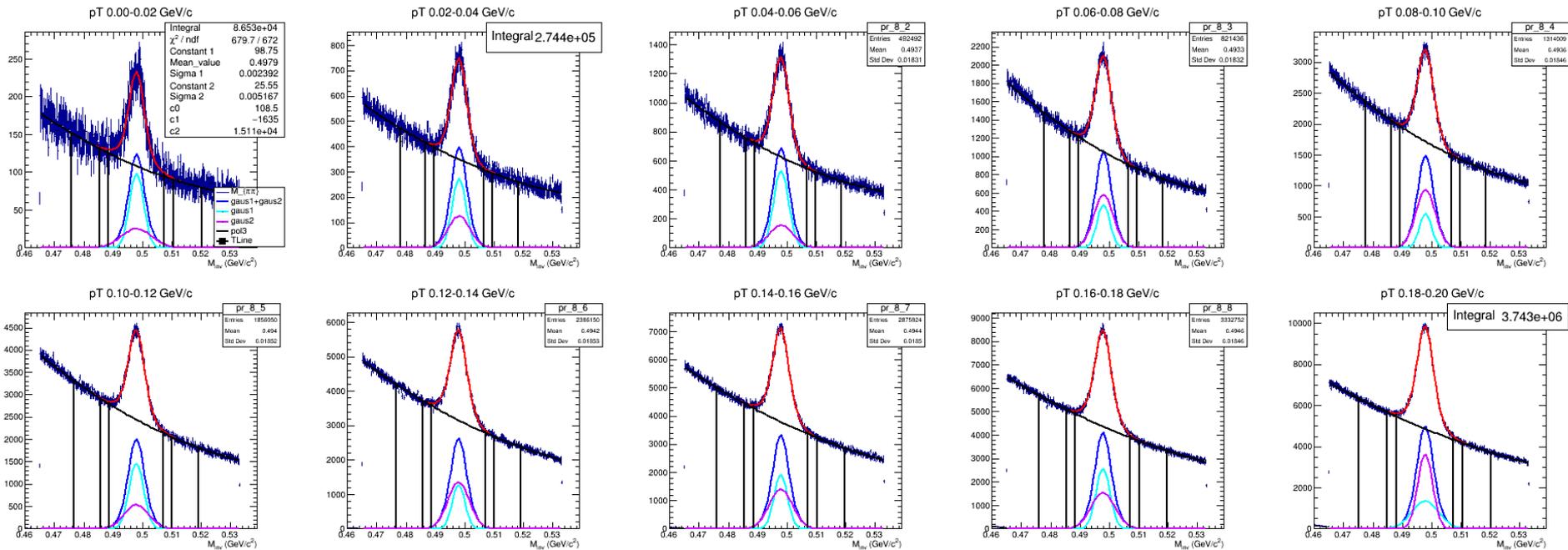
- Линейная зависимость R от числа участников ($N_{part}^{1/3}$)
- Слабая зависимость от среднего поперечного импульса пары (k_T)
- λ линейно убывает от числа участников ($N_{part}^{1/3}$)
- λ растет с ростом k_T до 0.7 ГэВ/с и выходит на плато

Выводы

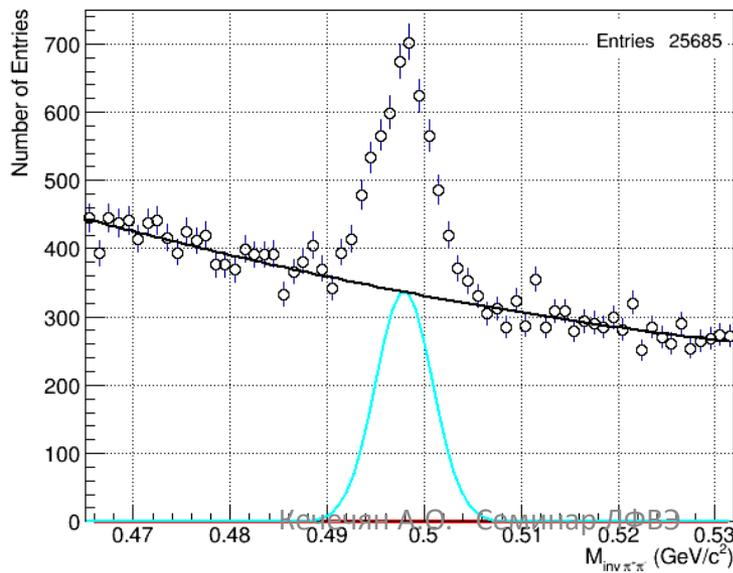
- Полученные на установке STAR спектры отрицательно заряженных частиц при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 39, 62, 200$ ГэВ, в представлении Ψ от z , обладают свойством универсальности (z-scaling)
- Получены спектры K_S^0 - мезонов из Au+Au взаимодействий при $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ ГэВ в широком диапазоне импульсов (0-6 ГэВ/с) для 7-и центральностей
- Показана возможность экспериментального измерения выходов K_S^0 - мезонов начиная с 10 МэВ/с
- Впервые получены зависимости корреляций $K_S^0 K_S^0$ пар из Au+Au взаимодействий при $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ ГэВ от центральностей
- Установлено, что взаимодействия в конечном состоянии для $K_S^0 K_S^0$ пар в Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ ГэВ и в рассматриваемом диапазоне поперечных импульсов K_S^0 - мезонов не оказывает значительного влияния на корреляции
- Получены зависимости параметров (R, λ) корреляционной функции от числа участников взаимодействия и среднего поперечного импульса пары $K_S^0 K_S^0$

Спасибо за внимание

Addons



$\sqrt{s_{NN}} = 19.6$ GeV MB $p_{T\pi^+\pi^-} < 0.005$ GeV/c



K_S^0 -МЕЗОН



$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

K_S^0 DECAY MODES

Fraction (Γ_i/Γ)

Confidence level (MeV/c)

Hadronic modes

$\pi^0 \pi^0$	$(30.69 \pm 0.05) \%$	209
$\pi^+ \pi^-$	$(69.20 \pm 0.05) \%$	206
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	$(3.5^{+1.1}_{-0.9}) \times 10^{-7}$	133

$$c\tau = 2.6844 \text{ cm}$$

Массы

$$2K_S^0 = 995.22 \text{ МэВ}$$

$$f^0(980) = 990 \pm 20 \text{ МэВ}$$

$$a^0(980) = 990 \pm 20 \text{ МэВ}$$

Introduction - Parametrization

- ❖ CF including only Quantum Statistical(QS) effect:

$$CF(q_{inv}) = 1 + \lambda e^{-[R_G^2 q_{inv}^2]}$$

- ❖ For K^+-K^+ and $\pi^+-\pi^+$, Bowler-Sinyukov^[1] method to include FSI(Coulomb effect):

Coulomb effect QS effect

$$CF(q_{inv}) = N[(1 - \lambda) + K_{coul}(q_{inv}, R_G)\lambda(e^{-[R_G^2 q_{inv}^2]} + 1)]$$

R_G : source radii parameter;
 λ : correlation strength;
 N : normalization factor;

$$F_1(z) = \int_0^z dx \frac{e^{x^2-z^2}}{z}; F_2(z) = \frac{1 - e^{-z^2}}{z}.$$

scattering amplitude: $f(k^*) = \frac{f_0(k^*) + f_1(k^*)}{2}$

$$f_l(k^*) = \frac{\gamma_l}{m_l - s - i\gamma_l k^* - i\gamma_l' k_l'}, s = 4(m_K^2 + k^{*2})$$

$l = 0$ or 1 for the f_0 or a_0 ;

m_l : mass of the resonance;

γ_l and γ_l' : couplings of the resonances to their decay channels;

k_l' : momentum in the second decay channel.

- ❖ For $K_S^0 - K_S^0$, Lednický-Lyuboshitz (L-L)^[2] approach to include FSI(Strong interaction):

QS effect

Strong interaction through $f_0(980)$ / $a_0(980)$ resonances

$$CF(q_{inv}) = 1 + \lambda \left(e^{-[R_G^2 q_{inv}^2]} + \frac{1 - \epsilon^2}{2} \left[\left| \frac{f(k^*)}{R_G} \right|^2 + \frac{4\text{Re}[f(k^*)]}{\sqrt{\pi}R_G} F_1(q_{inv}R_G) - \frac{2\text{Im}[f(k^*)]}{R_G} F_2(q_{inv}R_G) \right] \right)$$

abundance asymmetry ϵ

$$\epsilon = \frac{K - \bar{K}}{K + \bar{K}}$$

Resonance parameters:

	m_{f_0}	$\gamma_{f_0 KK}$	$\gamma_{f_0 \pi\pi}$	m_{a_0}	$\gamma_{a_0 KK}$	$\gamma_{a_0 \pi\eta}$
Antonelli ^[3]	0.973	2.763	0.5283	0.985	0.4038	0.3711

- $K_S^0 - \bar{K}_S^0$ consist of $K^0 - K^0$ ($\bar{K}^0 - \bar{K}^0$) and $K^0 - \bar{K}^0$ states
- Kaon abundance asymmetry can be extracted by $K_S^0 - \bar{K}_S^0$ CF

[1] Phys. Lett. B, 432(3-4), 248-257 (1998)

[2] J.Nucl.Phys. 35, 770 (1982)

[3] eConfC020620, THAT06 (2002)

Участие в научных мероприятиях, конференциях, совещаниях и т.д.

- Семинар отдела физики высоких энергий, Петербургский институт ядерной физики, 11 июня 2024 (Токарев, Зборовский, **Кечечян**, Дедович)

Доклад: «z-Scaling: Status and Perspectives»

- Семинар лаборатории ALICE/NA61/MPD, Санкт-Петербургский государственный университет, 1 ноября 2024 (Токарев, Зборовский, **Кечечян**)

Доклад: “On possibility of cumulative production in Au+Au collisions at STAR and MPD»

- Семинар лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, 22 ноября, 2024
(Токарев, Зборовский, **Кечечян**, Апарин)

Доклад: «Self-similarity and Cumulative Hadron Production in Heavy Ion Collisions at High Energies»

- STAR Collaboration Meeting 14-25 September, 2020 Indian Institute of Science Education and Research (IISER) Tirupati, India (M.Tokarev and **A.Kechechyan**)

Доклад: “High- p_T spectra of h^- hadrons in Au+Au collision at $\sqrt{s_{NN}} = 9.2 \text{ GeV}$ “