

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



# Корреляционная фемтоскопия в столкновениях Au+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ в эксперименте STAR

---

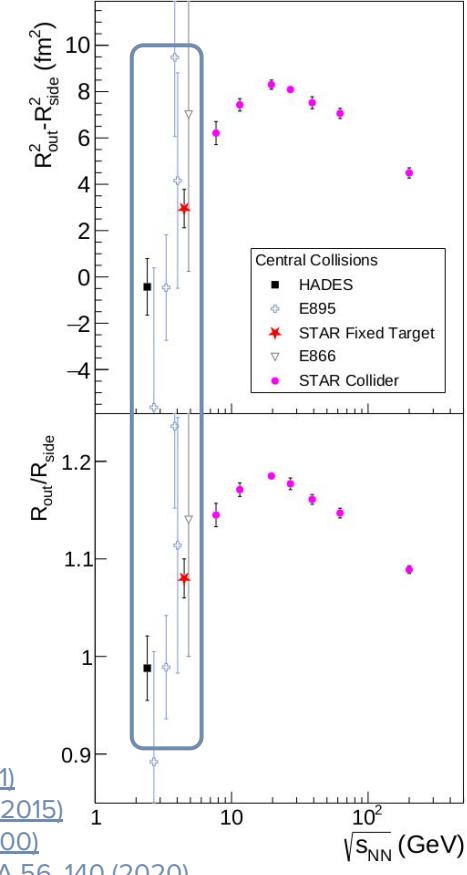
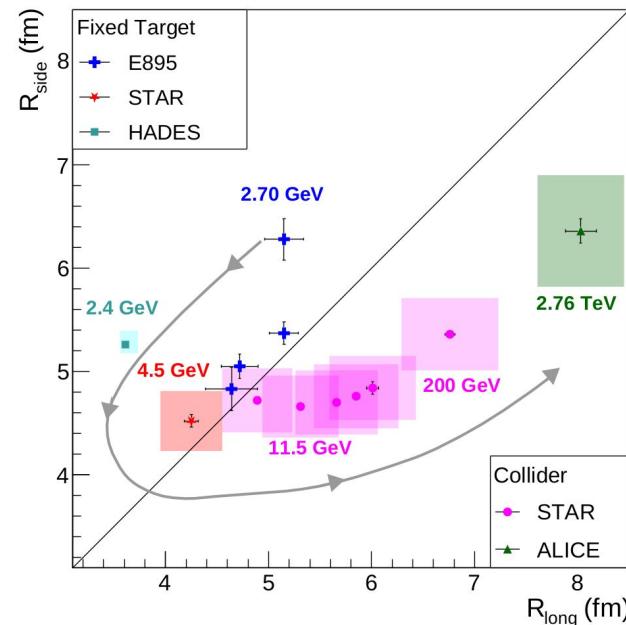
Аспирант гр. А23-121:  
Краева А.Ю.

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н. Гуров Ю.Б.

# Введение

- Метод корреляционной фемтоскопии позволяет определить структуру области испускания частиц
- Радиусы области испускания при  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  ГэВ измерены для  $\pi^+\pi^-$
- Измерения характеристик области испускания представлены в средних быстротах
- Измерения в передних (задних) быстротах дают новую информацию об источнике и позволяют определить ограничения на модели столкновений тяжелых ионов
- Оценка влияния остаточного заряда на корреляционные функции при низких энергиях вызывает разницу в фемтоскопических радиусах между положительными и отрицательными пионами

M. S. Abdallah et al. (STAR Collaboration)  
Phys. Rev. C 103, 2021



Эксперименты:

ALICE: A. Aamodt et al., Phys. Lett. B 696, 328 (2011)

STAR: L. Adamczyk et al., Phys. Rev. C 92, 014904 (2015)

E895: M. A. Lisa et al., Phys. Rev. Lett. 84, 2798 (2000)

HADES: J. Adamczewski-Musch et al., Eur. Phys. J. A 56, 140 (2020)

# Цели и задачи научной работы

---

## Цель работы:

Определение пространственных и временных параметров области испускания заряженных пионов в столкновениях ядер золота при  $\sqrt{s}_{NN} = 3$  ГэВ.

## Задачи:

1. Разработка метода коррекции двухчастичного эффекта “слияния” треков в эксперименте STAR на фиксированной мишени.
2. Модельный расчет фемтоскопических параметров заряженных пионов и их зависимости от центральности, поперечного импульса и быстроты пар частиц при энергии  $\sqrt{s}_{NN} = 3$  ГэВ.
3. Определение фемтоскопических параметров заряженных пионов в зависимости от центральности столкновения, поперечного импульса и быстроты пар частиц при энергии  $\sqrt{s}_{NN} = 3$  ГэВ в эксперименте STAR.

# Научная новизна, теоретическая и практическая значимости

---

## Научная новизна:

1. Первая оценка фемтоскопических параметров ( $R_{\text{out}}$ ,  $R_{\text{side}}$ ,  $R_{\text{long}}$ ,  $R_{\text{ol}}^2$ ,  $\lambda$ ) области испускания положительных пионов для  $\sqrt{s}_{\text{NN}} = 3$  ГэВ.
2. Первая оценка зависимости фемтоскопических параметров от быстроты пар частиц при энергиях столкновений тяжелых ионов  $\sqrt{s}_{\text{NN}} < 7$  ГэВ.
3. Разработан метод подавления “слившихся” треков, впервые применённый для низких энергий на фиксированной мишени.
4. Первое наблюдение разницы корреляционных функций и радиусов области испускания для положительных и отрицательных пар пионов.

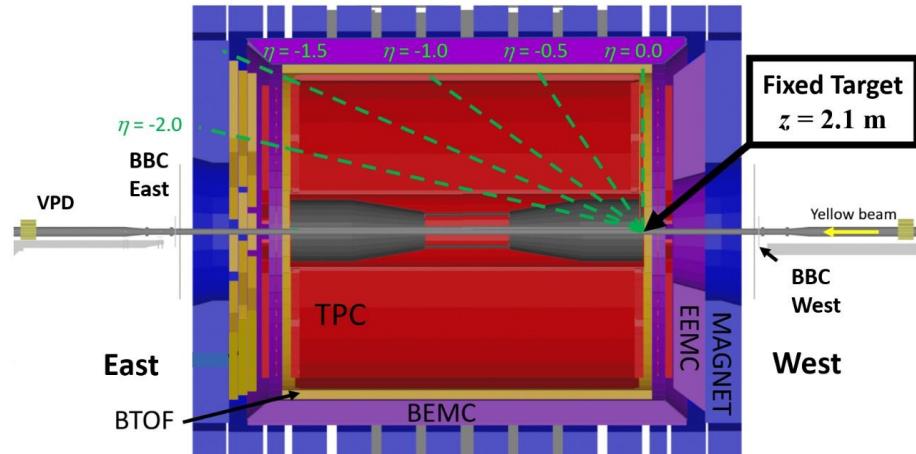
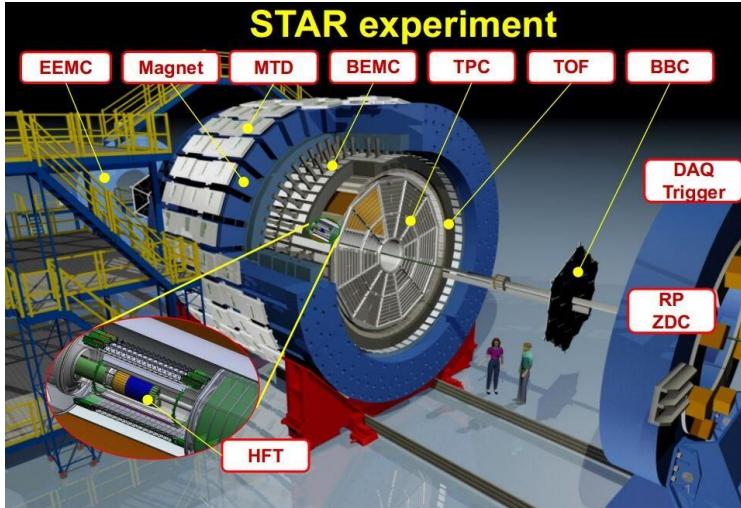
## Теоретическая значимость:

Полученные зависимости фемтоскопических параметров будут использованы для усовершенствования существующих теоретических моделей столкновений релятивистских тяжелых ионов.

## Практическая значимость:

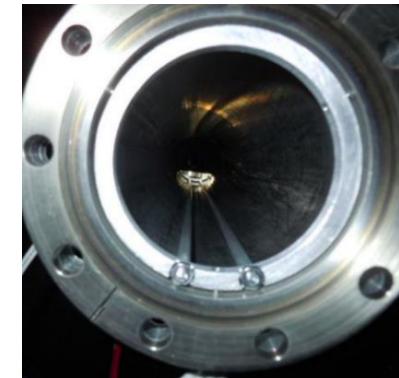
Разработанный метод подавления “слившихся” треков может быть использован в экспериментах на NICA (BM@N, MPD, SPD) и FAIR (CBM).

# Программа на фиксированной мишени эксперимента STAR



## Эксперимент на фиксированной мишени:

- пучок ядер золота сталкивается с золотой мишенью толщиной 1 мм
- плотность фольги составляет  $1.93 \text{ г/см}^2$
- мишень установлена в вакуумной трубе на 200 см западнее центра STAR и на 2 см ниже оси пучка.



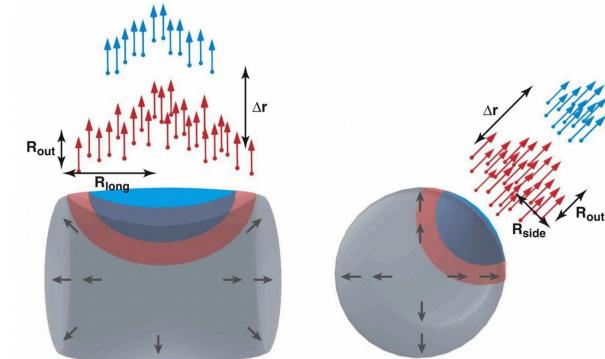
# Двухчастичная корреляционная функция (КФ)

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

где  $q = p_1 - p_2$   
(относительный импульс пары частиц)

$A(q)$  — строится с использованием пар, где оба трека относятся к одному и тому же событию. Числитель содержит корреляции, обусловленные квантовой статистикой и взаимодействиями в конечном состоянии.

$B(q)$  — знаменатель получен с помощью техники перемешивания событий, где два трека относятся к разным событиям. Фемтоскопические корреляции отсутствуют.

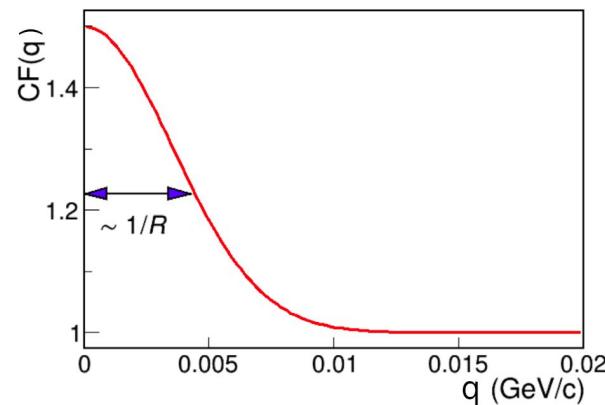


Относительный импульс пары можно разложить в системе координат Бертча-Пратта, “out-side-long” система представляет собой:

$q_{\text{long}}$  - по направлению пучка,

$q_{\text{out}}$  - вдоль поперечного импульса пары частиц,

$q_{\text{side}}$  - перпендикулярно продольному и поперечному направлениям



[S. Pratt. Phys. Rev. D 33 \(1986\) 1314](#)

[G. Bertsch. Phys. Rev. C 37 \(1988\) 1896](#)

КФ построены в системе, где  $p_{1,z} + p_{2,z} = 0$

# Фитирование корреляционной функции

$$C(q) = N[(1 - \lambda) + \lambda K(q)(1 + G(q))] \text{ , где}$$
$$G(q) = \exp(-q_{out}^2 R_{out}^2 - q_{side}^2 R_{side}^2 - q_{long}^2 R_{long}^2 - 2q_o q_l R_{ol}^2)$$

N - нормировочный множитель,

K(q) - Кулоновская поправка,

$\lambda$  - сила корреляции,

$R_{side}$  ~ геометрический размер области испускания,

$R_{out}$  ~ геометрический размер + продолжительность испускания частиц

$R_{long}$  ~ среднее время жизни,

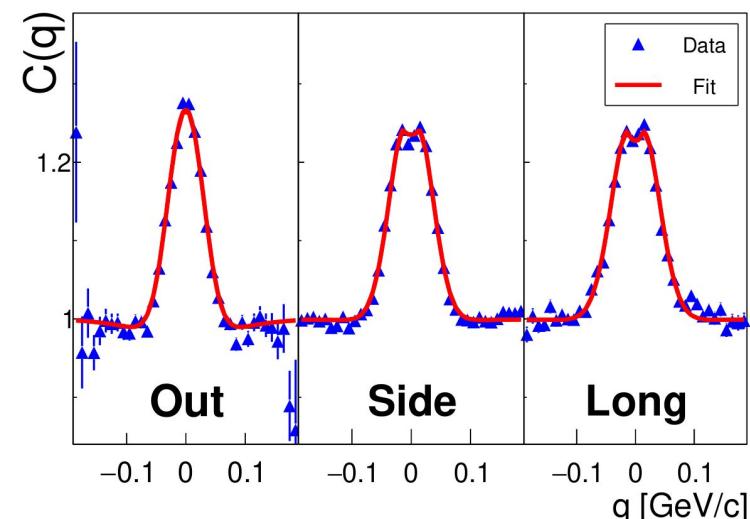
$R_{out-long}^2$  – поворот КФ в плоскости  $q_{out} - q_{long}$ , зависящий от степени асимметрии акцептанса относительно средних быстрот.

Фит использовался с помощью метода максимального правдоподобия: [Phys. Rev. C 66 \(2002\) 054906](#)

$$\chi^2 = -2 \left[ A \ln \left( \frac{C(A + B)}{A(C + 1)} \right) + B \ln \left( \frac{A + B}{B(C + 1)} \right) \right], C = \frac{A}{B}$$

[Yu. Sinyukov et al. Phys. Lett. B 432 \(1998\) 248](#)  
[M. Bowler Phys. Lett. B 270 \(1991\) 69](#)

Пример фитирования:

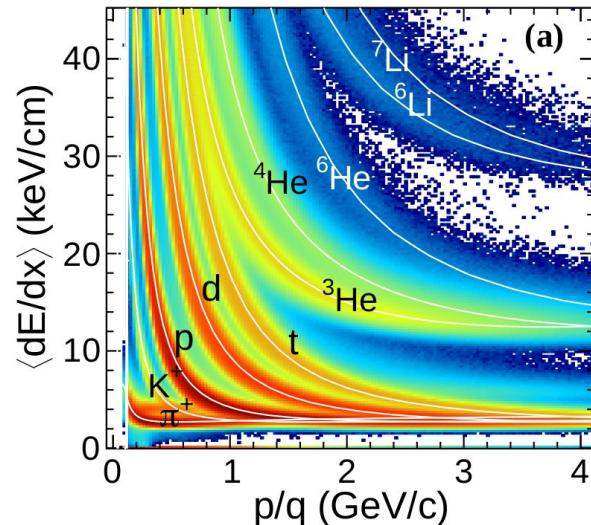


# Критерии отбора и идентификации пионов

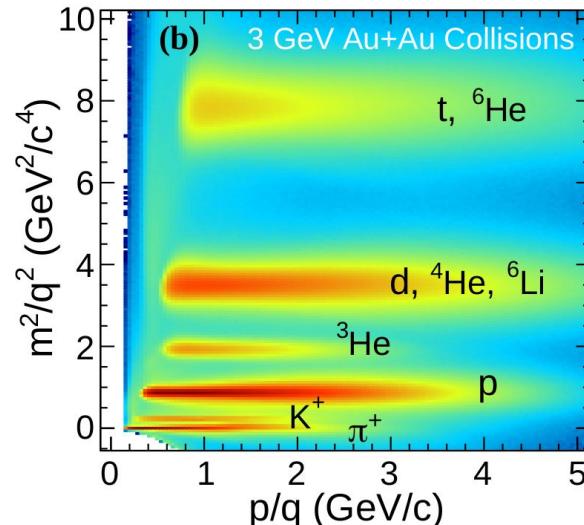
$0.15 < p < 0.55 \text{ GeV}/c$ : TPC;

$0.55 < p < 1.5 \text{ GeV}/c$ : TPC+TOF

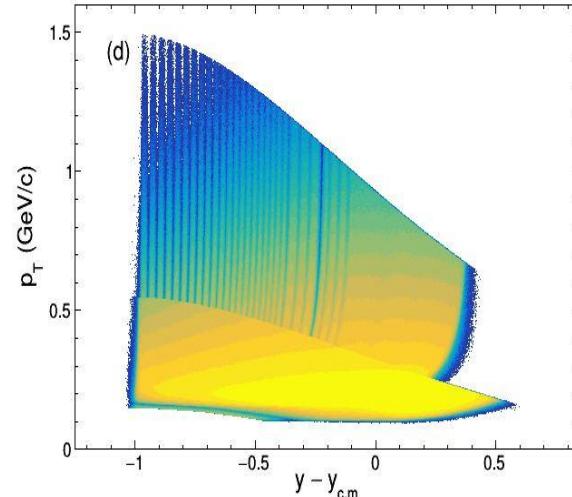
TPC PID



TOF PID



Аксептанс:



## Отбор по TPC:

- $|\ln\sigma(\pi)| - 0.51 < 2$
- $|\ln\sigma(e, K, p)| > 2$
- $0.15 < p < 0.55 \text{ ГэВ}/c$

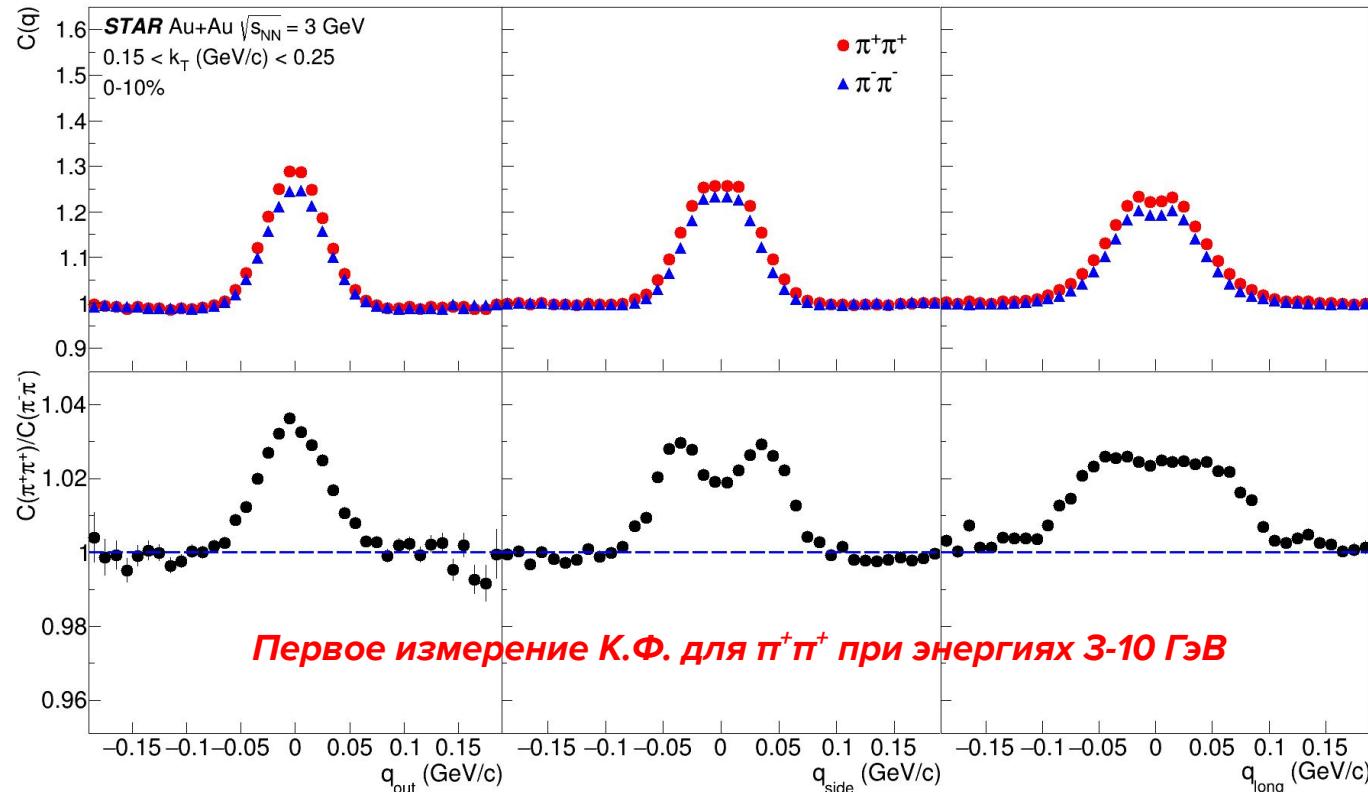
## Отбор по комбинации TPC+TOF:

- $-0.05 < m^2 < 0.08 \text{ ГэВ}^2/\text{c}^4$
- $-0.015 < 1/\beta - 1/\beta(\pi) < 0.015$
- $0.55 < p < 1.5 \text{ ГэВ}/c$
- $|\ln\sigma(\pi)| < 3$

## Критерии отбора пар частиц:

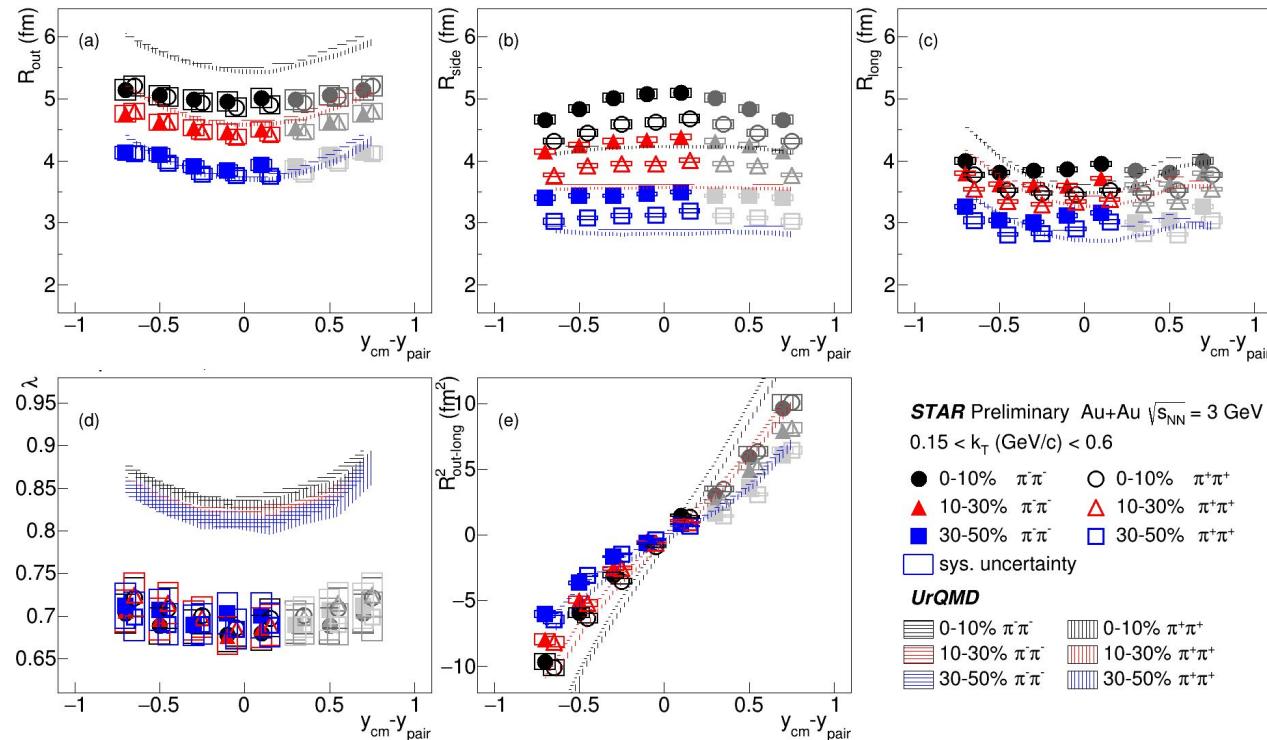
- $-0.5 < SL < 0.6$
- $-1.1 < FMH < 0.1$
- Удаление октантов

# Построение КФ для $\pi^+\pi^+$ и $\pi^-\pi^-$ в эксперименте STAR



Показано различие корреляционных функций для  $\pi^+\pi^+$  и  $\pi^-\pi^-$ ,  
что связано с эффектом влияния остаточного заряда

# Радиусы области испускания $\pi^+\pi^+$ и $\pi^-\pi^-$ в эксперименте STAR и UrQMD



UrQMD качественно описывает экспериментальные результаты в STAR

## STAR:

- Явная зависимость  $R^2_{out-long}$  от быстроты обусловлена симметрией в продольном направлении
  - $R_{side}$  уменьшается при отдалении от средних быстрот:
- Нарушение буст-инвариантности

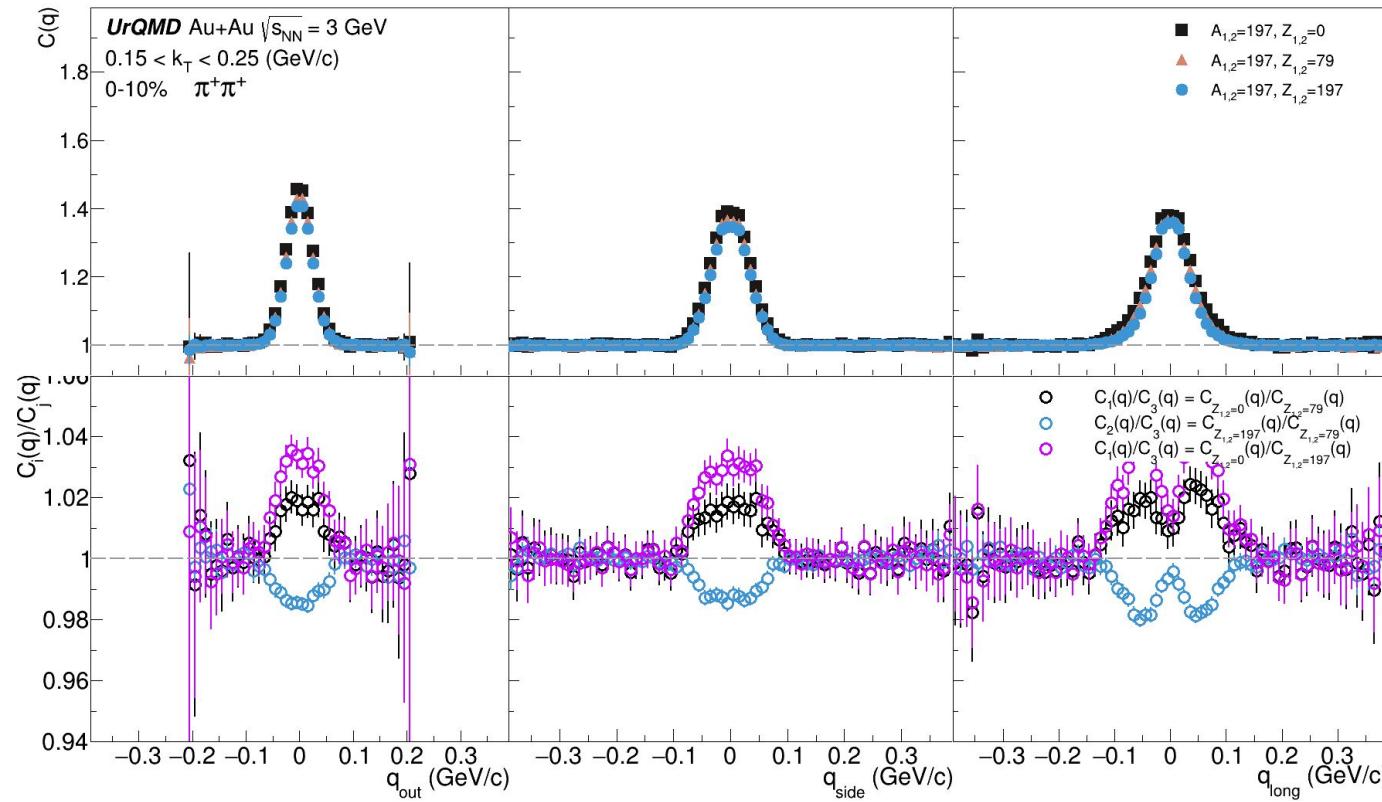
## UrQMD:

- UrQMD переоценивает  $R_{out}$ ,  $R^2_{out-long}$  и  $\lambda$ :
  - переоцененное время испускания
  - вклады от распадов резонансов
- $R_{side}$ , полученный из UrQMD, меньше, чем в STAR, и слабо зависит от быстроты:
  - геометрический размер испускания частиц недооценен

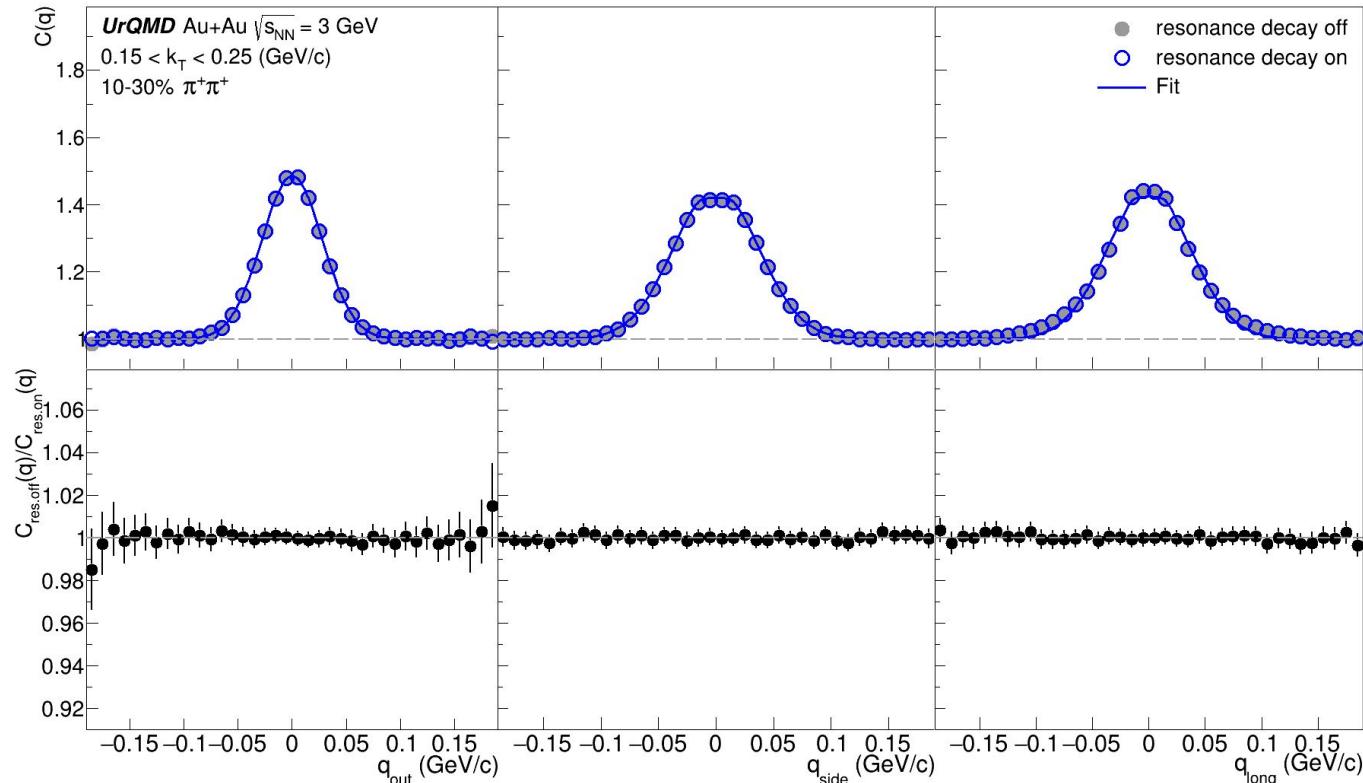
$R_{out}$ ,  $R_{side}$  и  $R_{long}$  увеличиваются от периферийных к центральным столкновениям, отражая геометрию области перекрытия.

# КФ для $\pi^+\pi^+$ в модели UrQMD. Влияние изоспина

Для оценки влияния начального заряда были использованы «протонное» (с уменьшенным N/Z, где Z = 197), «нейтронное» (с увеличенным N/Z, где Z = 0) и «обычное» золото.



# КФ для $\pi^+\pi^+$ в модели UrQMD. Влияние распадов резонансов



Отключение распадов резонансов не влияет на КФ,  
следовательно, не является причиной разницы между КФ для  $\pi^+\pi^+$  и  $\pi^-\pi^-$

# Заключение

---

- Выполнена обработка данных столкновений ядер золота при энергии 3 ГэВ на пару нуклонов в эксперименте STAR
- Проведена оценка влияния остаточного заряда на корреляционные функции (КФ) в модели UrQMD:
  - увеличение значения остаточного заряда способствует
    - для  $\pi^+\pi^+$ : увеличению ширине КФ и уменьшению размеров области испускания
    - для  $\pi^-\pi^-$ : уменьшению ширине КФ и увеличению размеров области испускания
- Варьируя исходный изоспиновый параметр до теоретических пределов, мы наблюдаем предсказуемое и сильное изменение амплитуды и формы корреляционных функций для  $\pi^+\pi^+$  и  $\pi^-\pi^-$ .
- Проведена оценка влияния распадов резонансов на КФ в модели UrQMD:
  - отключение распадов резонансов не влияет на КФ

Планы:

- Оценка влияния остаточного заряда в эксперименте
- Публикация результатов (2 статьи в Phys. Rev. C и PRL)

# Апробация работы

---

Результаты данной работы представлялись:

- На рабочих совещаниях коллаборации STAR
- На международных конференциях:
  1. NUCLEUS-2022 (Москва), “*Pion Femtoscopy in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  in the STAR Experiment*”;
  2. ICPPA-2022 (Москва), “*Bose–Einstein Correlations of Charged Pions in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  from UrQMD*”;
  3. 58th meeting of the PAC for Particle Physics (Дубна, 2023), “*Femtoscopy Results in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  from STAR*”;
  4. ISMD-2023 (Венгрия), “*Two-pion Bose-Einstein correlations in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  in the STAR experiment*”;
  5. Балдинский международный семинар (Дубна, 2023), “*Two-Pion Femtoscopic Correlations in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  from STAR*”;
  6. Балдинский международный семинар (Дубна, 2023), “*Femtoscopic correlations of charged kaons in Au-Au collisions at BES-I STAR energy region with the UrQMD model*”;
  7. NUCLEUS-2023 (Саров), “*Estimation of pion emission source characteristics in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  in the STAR experiment*”;
  8. 59th meeting of the PAC for Particle Physics (Дубна, 2024), “*Two-pion Femtoscopy in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  in the STAR Experiment*”;
  9. ICPPA-2024 (Москва), “*Estimation of the isotopic spin influence on femtoscopic correlations of identical pions in Au+Au collisions in the UrQMD model*”

# Публикации

---

Результаты данной работы опубликованы:

- A. Kraeva (for the STAR Collaboration), “*Pion Femtoscopy in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  in the STAR Experiment*”, Physics of Atomic Nuclei: v. 85, 988-991 (2022)  
<https://doi.org/10.1134/S1063778823010313>
- A. Kraeva and G. Nigmatkulov, “*Bose–Einstein Correlations of Charged Pions in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  from UrQMD*” Phys. Atom. Nucl. 86, no.5, 854-858 (2023)  
<https://doi.org/10.1134/S106377882305023X>
- A. Kraeva (for the STAR Collaboration), “*Two-Pion Bose–Einstein Correlations in Au+Au Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$  in the STAR Experiment*”, MDPI Universe 10(4), 188 (2024)  
<https://doi.org/10.3390/universe10040188>
- A. Korobitsyn, A. Kraeva, K. Mikhailov, G. Nigmatkulov, A. Pishchaeva, “*Femtoscopic Correlations of Charged Pions and Kaons in Au+Au Collisions at BES-I STAR Energy Region with the UrQMD Model*” Physics of Particles and Nuclei, 55(4), 879–883 (2024)  
<https://doi.org/10.1134/S1063779624700448>
- A. Kraeva, “*Estimation of the Isotopic Spin Influence on Femtoscopic Correlations of Identical Pions in Au+Au Collisions in the UrQMD Model*”, Physics of Atomic Nuclei, 88 (5), 1051–1055 (2025)  
<https://doi.org/10.1134/S106377882560143X>

# Back up

---