



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.

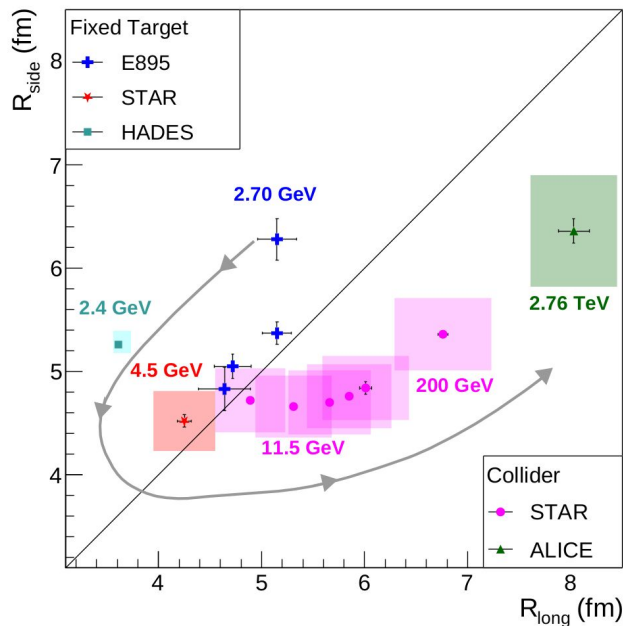
Научный руководитель:
д.ф.-м.н. Гуров Ю.Б.

Москва, 2026 г.

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](#)



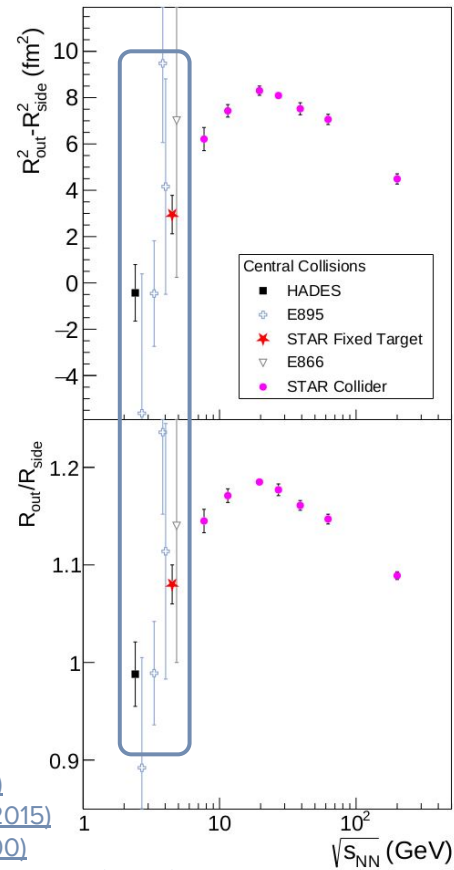
Эксперименты:

[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:

1. Первая оценка фемтоскопических параметров (R_{out} , R_{side} , R_{long} , R_{ol}^2 , λ) области испускания положительных пионов для $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ.
2. Первая оценка зависимости фемтоскопических параметров от быстроты пар частиц при энергиях столкновений тяжелых ионов $\sqrt{s_{NN}} < 7$ 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.

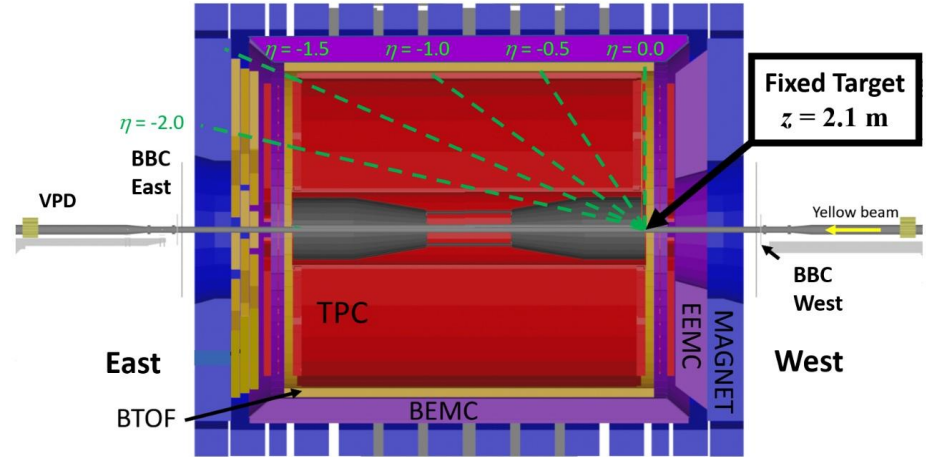
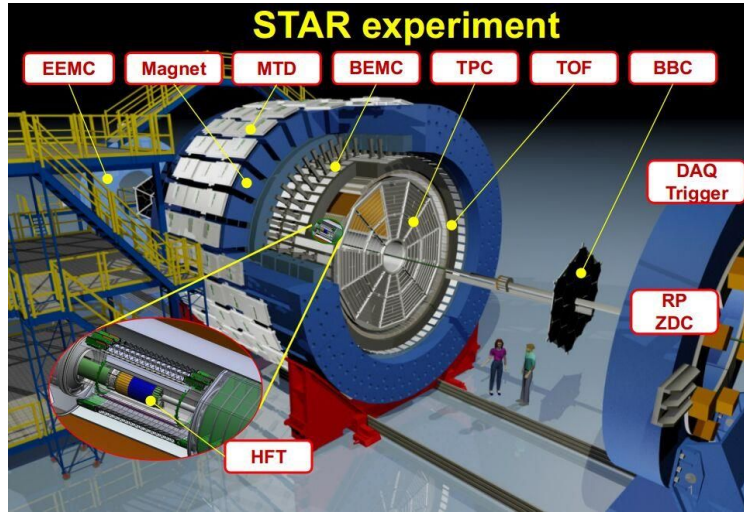
Теоретическая значимость:

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

Практическая значимость:

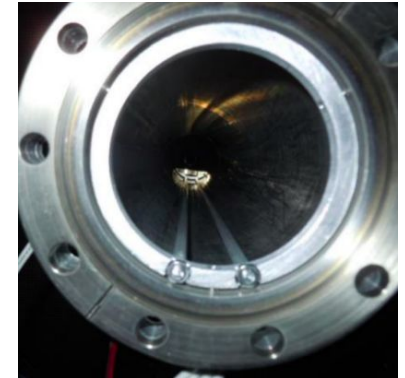
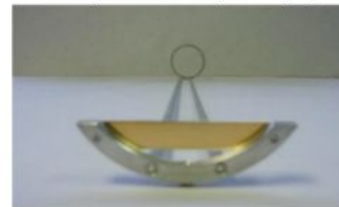
Разработанный метод подавления “слившихся” треков может быть использован в экспериментах на NICA (BM@N, MPD, SPD) и FAIR (CBM).

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 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)

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

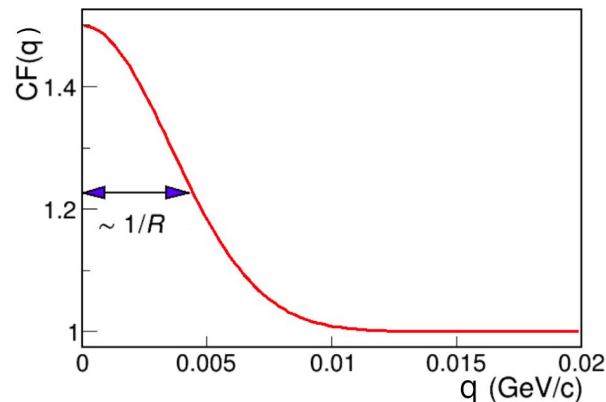
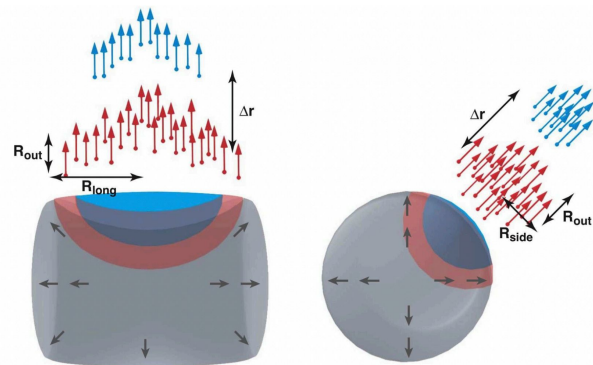
$A(q)$ — строится с использованием пар, где оба трека относятся к одному и тому же событию. Числитель содержит корреляции, обусловленные квантовой статистикой и взаимодействиями в конечном состоянии.

где $q = p_1 - p_2$ (относительный импульс пары частиц) $B(q)$ — 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 Берта-Пратта, “out-side-long” система представляет собой:

- q_{long} - по направлению пучка,
- q_{out} - вдоль поперечного импульса пары частиц,
- q_{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,

λ - сила корреляции,

$R_{side} \sim$ геометрический размер области испускания,

$R_{out} \sim$ геометрический размер + продолжительность испускания частиц

$R_{long} \sim$ среднее время жизни,

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

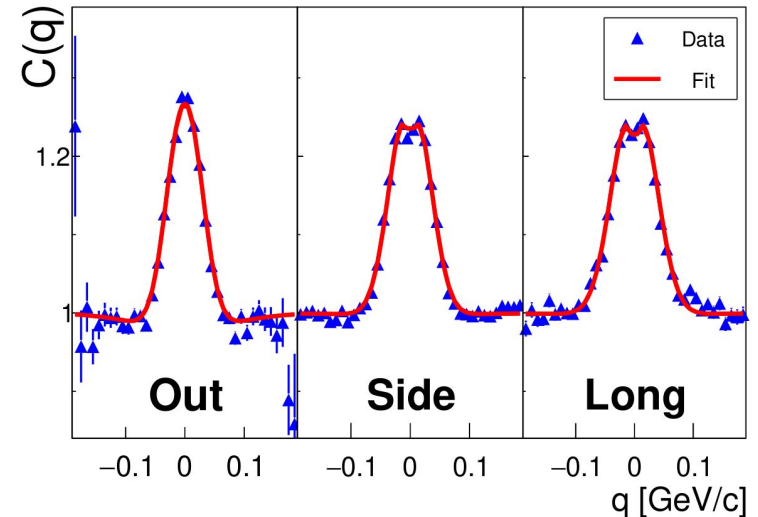
Фит использовался с помощью метода максимального правдоподобия: [Phys. Rev. C 66 \(2002\) 054906](#)

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

[Yu. Sinyukov et al. Phys. Lett. B 432 \(1998\) 248](#)

[M. Bowler Phys. Lett. B 270 \(1991\) 69](#)

Пример фитирования:



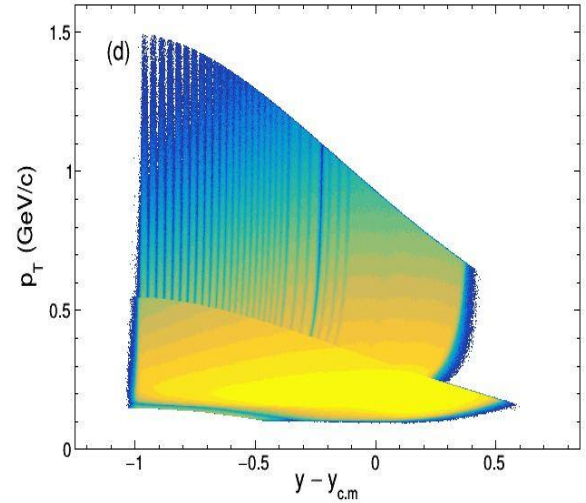
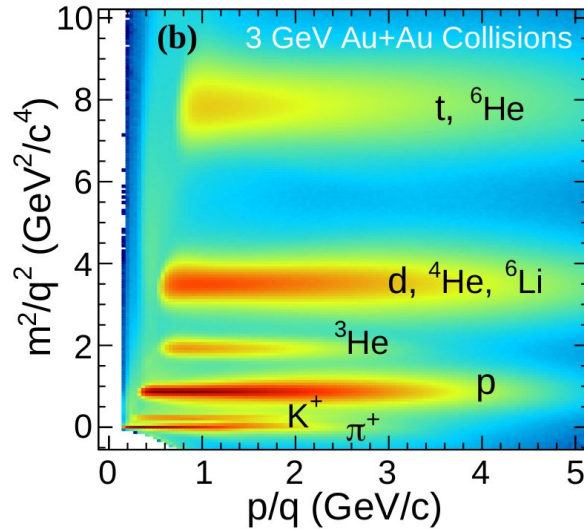
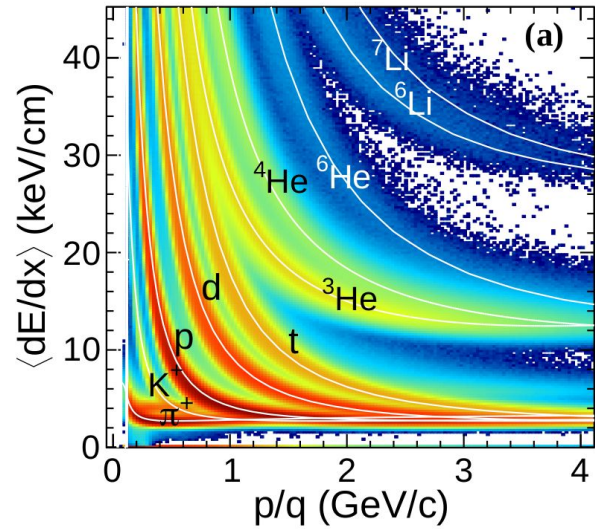
Критерии отбора и идентификации пионов

0.15 < p < 0.55 GeV/c: TPC; 0.55 < p < 1.5 GeV/c: TPC+TOF

TPC PID

TOF PID

Акцептанс:



Отбор по TPC:

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

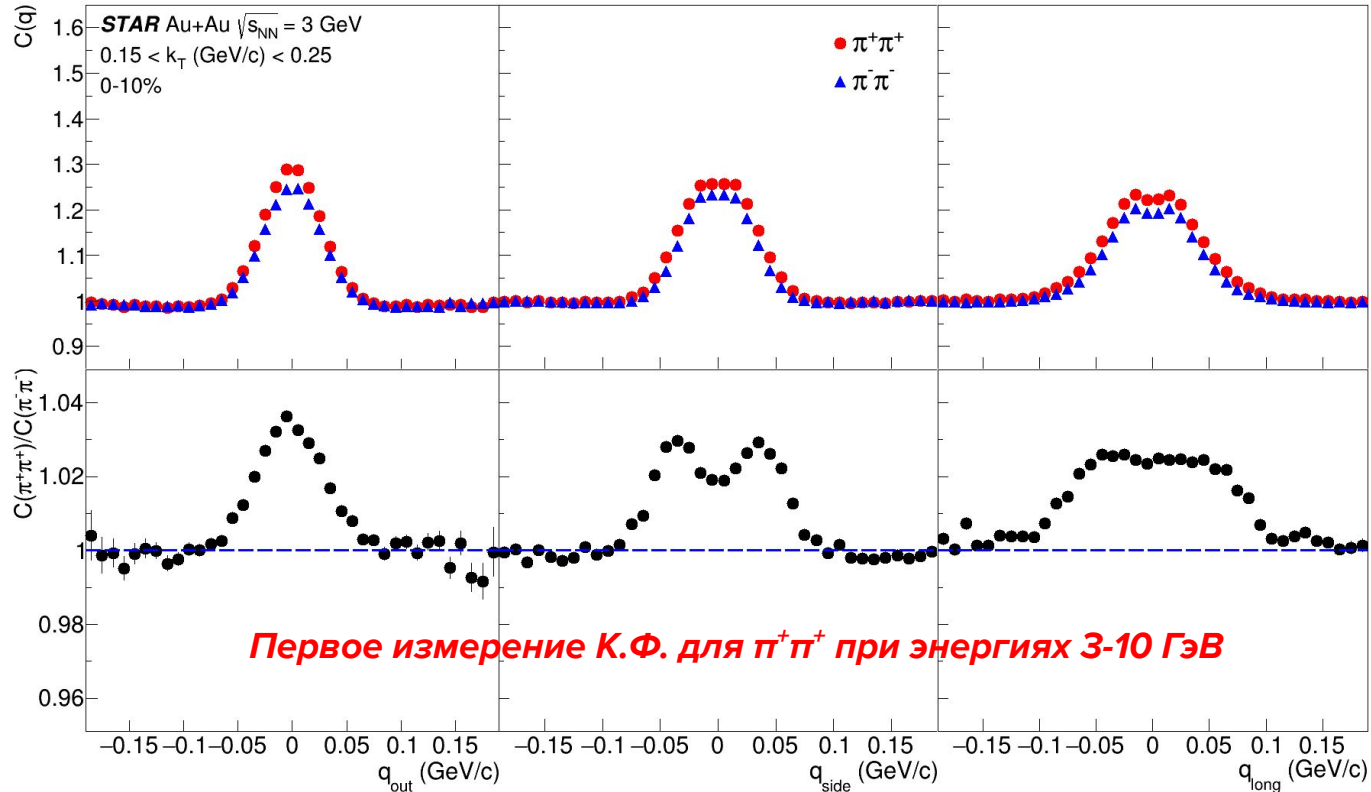
Отбор по комбинации TPC+TOF:

- $-0.05 < m^2 < 0.08$ ГэВ²/c⁴
- $-0.015 < 1/\beta - 1/\beta(\pi) < 0.015$
- $0.55 < p < 1.5$ ГэВ/c
- $|\ln\sigma(\pi)| < 3$

Критерии отбора пар частиц:

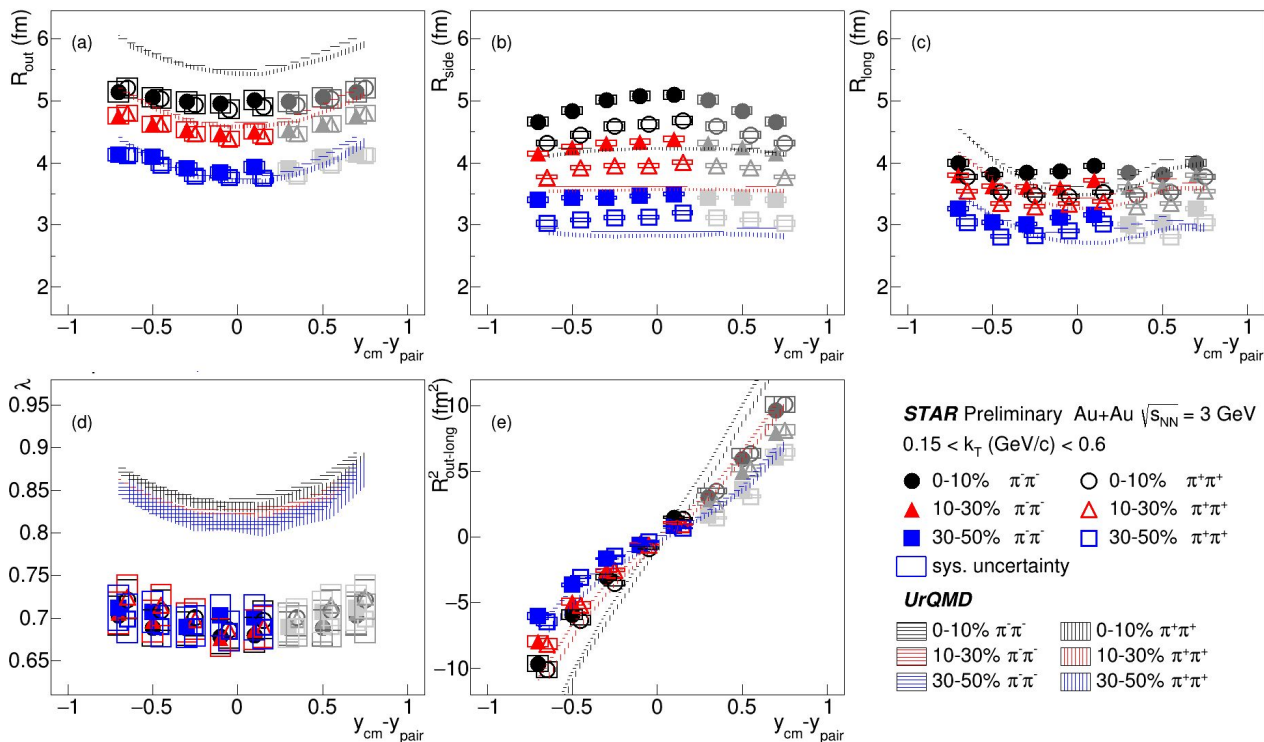
- $-0.5 < SL < 0.6$
- $-1.1 < FMH < 0.1$
- Удаление октантов

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

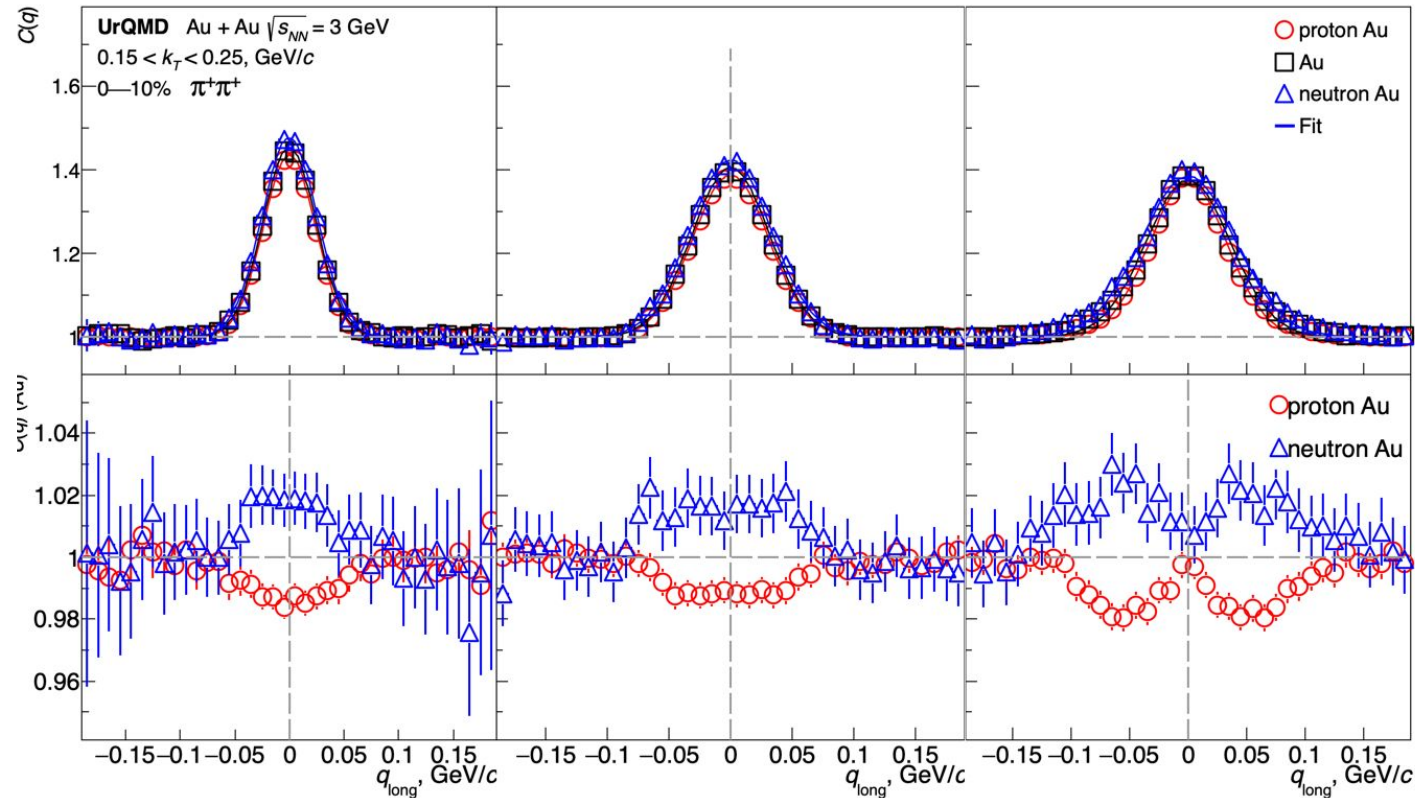
UrQMD:

- UrQMD переоценивает R_{out} , $R_{out-long}^2$ и λ :
 - 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

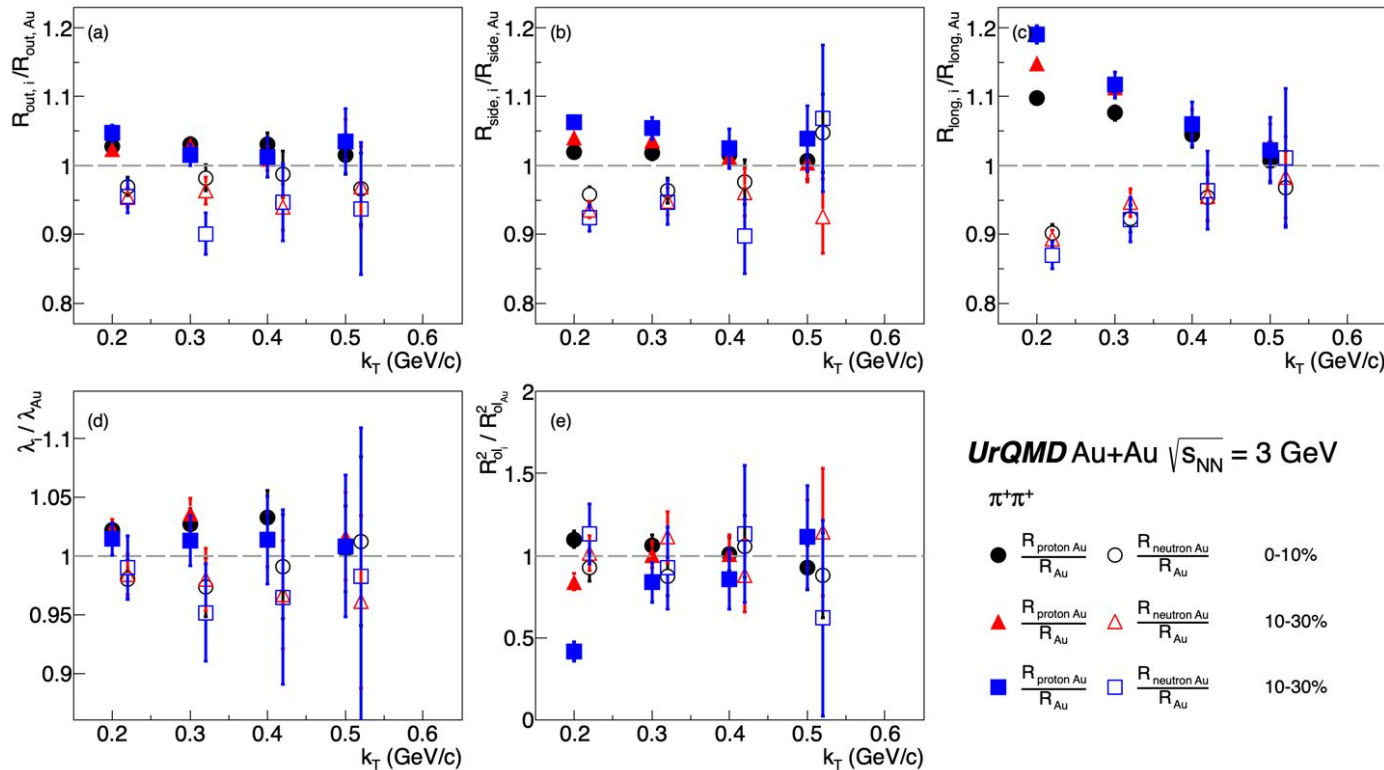
Для оценки влияния начального заряда были использованы «протонное» ($Z = 197$), «нейтронное» ($Z = 0$) и «обычное» ($Z = 79$) золото.



- Наблюдается влияние на КФ начального числа протонов в ядре.
- С увеличением Z_{Au} ширина КФ уменьшается, а радиусы увеличиваются для $\pi^+\pi^+$.
- Отношение КФ до и после изменения Z_{Au} не превышает 4%

Фемтоскопические параметры для $\pi^+\pi^+$ в модели UrQMD. Влияние изоспина

Для оценки влияния начального заряда были использованы «протонное» ($Z = 197$), «нейтронное» ($Z = 0$) и «обычное» ($Z = 79$) золото.



- Изоспиновый эффект влияет на геометрию испускания пионов → на фемтоскопические радиусы
- Для R_{long} наблюдается явная линейная зависимость

Заключение

- Выполнена обработка данных столкновений ядер золота при энергии 3 ГэВ на пару нуклонов в эксперименте STAR
- Проведена оценка влияния эффекта изоспина на корреляционные функции (КФ) и фемтоскопические параметры в модели UrQMD:
 - Варьируя исходный изоспиновый параметр до теоретических пределов, мы наблюдаем предсказуемое и сильное изменение амплитуды и формы корреляционных функций для $\pi^+\pi^+$ и $\pi^-\pi^-$ в пределах 5%, для фемтоскопических радиусов — в пределах 10%.

Планы:

- Публикация результатов (2 статьи в Phys. Rev. C и PRL)

Педагогическая практика

Научная специальность: 1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

Период прохождения практики: с «07» февраля 2026 г. по «05» июня 2026 г.

Место прохождения практики: НИЯУ МИФИ

№ п/п	Планируемые формы организационной, методической учебной работы, руководство НИРС	Количество часов	Результат работы	Институт/Факультет, курс, группа, ФИО студента
1	Лекции по предмету «Введение в обработку данных с помощью пакета ROOT»	20	Проведены лекции	ИЯФиТ, Б20-105
2	Семинары по предмету «Введение в обработку данных с помощью пакета ROOT»	30	Проведены семинарские занятия	ИЯФиТ, Б20-105
3	Приём БДЗ по предмету «Введение в обработку данных с помощью пакета ROOT»	16	Выполнена проверка большого домашнего задания	ИЯФиТ, Б20-105
4	Руководство бакалавров по Проектной Практике	36	Подготовлен НИРС	Епифанов (Б22-104), Рыбаков (Б22-105)
5	Руководство НИРС бакалавра	42	Подготовлен диплом	Карпова Юлия (Б21-105)
	Общее количество часов	144		

Результаты данной работы представлялись:

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

Результаты данной работы опубликованы:

- A. Kraeva (for the STAR Collaboration), “*Pion Femtoscopy in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3$ 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 $\sqrt{s_{NN}} = 3$ 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 $\sqrt{s_{NN}} = 3$ 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>

