

На конкурс научных работ ОИЯИ за 2021 год
Представляется работа

“Экспериментальное исследование на установке ALICE
фемтоскопических корреляций пар заряженных каонов,
образующихся в pp, p-Pb и Pb-Pb взаимодействиях при энергиях
ЛНС”

Раздел: Научно-исследовательские экспериментальные работы.

Коллектив соавторов:

1. Батюня Б.В.
2. Малинина Л.В.
3. Михайлов К.Р.
4. Рогочая Е.П.
5. Романенко Г.Э.

Лист публикаций

1. B. Abelev et al. (ALICE Collaboration), “Charged kaon femtoscopic correlations in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV”, Phys. Rev. D **87**, 052016 (2013).
2. J. Adam et al. (ALICE Collaboration), “One-dimensional pion, kaon, and proton femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. C **92**, 054908 (2015).
3. L. Malinna (for ALICE Collaboration), “Femtoscopy of identified particles in Pb-Pb collisions with ALICE at the LHC”, Nucl. Phys. A **00** (2015) 1-4.
4. K. Mikhaylov, “Bose-Einstein correlations of charged and neutral kaons in pp and Pb-Pb collisions at the LHC with the ALICE experiment”, Journal of Physics: Conference Series **668** (2016) 012071.
5. S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), “Kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV”, Phys. Rev. C **96**, 064613 (2017)
6. S. Acharya et al. (ALICE Collaboration), “One-dimensional charged kaon femtoscopy in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, Phys.Rev. C **100**, 024002 (2019)
7. K. Mikhaylov, “Non-identical charged kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV by ALICE”, Journal of Physics: Conference Series. **1690**, 012099 (2020).
8. B. Batyunya, L. Malinina, K. Mikhaylov, E. Rogochaya, G. Romanenko, K. Werner, “Identical pion and kaon femtoscopy in EPOS 3 with and without the hadronic afterburner UrQMD”, Journal of Physics.: Conference. Series. **1690**, 012102 (2020).

Основные доклады на конференциях

- L. Malinina, "Charged KK femtoscopy correlations from 7 TeV pp collisions", poster. International Conference of Quark Matter 2011 (Annecy, France), 23.05-28.05.
- E. Rogochaya, "Kaon femtoscopy correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV from the ALICE experiment at LHC", XXI International Baldin Seminar on High Energy Physics Problem, September 10-15, 2012.
- K. Mikhaylov, "Charged kaon femtoscopy in interactions at $\sqrt{s} = 7$ TeV", XIII GDRE Workshop on Relativistic Heavy Ion Physics, Nantes 2012.
- L. Malinina, "Kaon femtoscopy of Pb-Pb and pp collisions at the LHC with the ALICE", International Conference on New Frontiers in Physics, Crete, 2013.
- L. Malinina, "Correlation femtoscopy with ALICE", International Conference-Section of Nuclear Physics of the Physical Sciences Division of the Russian Academy of Sciences, Moscow, November 2014.
- L. Malinina, "Femtoscopy of identified particles in Pb-Pb collisions with ALICE at the LHC", XXV International Conference of Quark Matter (QM-2015), Kobe, Japan.
- K. Mikhailov (JINR), "Bose-Einstein correlations of charged and neutral kaons in pp and Pb-Pb collisions at LHC with ALICE experiment", The 15h International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM-2015), Dubna.

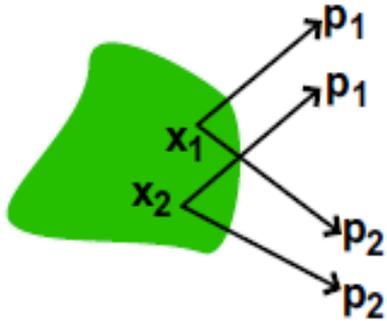
Основные доклады на конференциях

- K. Mikhaylov, “Identical and non-identical kaon correlations in pp and Pb-Pb at LHC”, GDRE Workshop, Subatech, Nantes, July 2016.
- E. Rogochaya (JINR), “Charged kaon femtoscopy correlations in p-Pb collisions at 5.02 TeV with ALICE at the LHC”, XII WPCF, June 2017, Amsterdam.
- K. Mikhaylov, “Non-identical kaon femtoscopy with ALICE experiment”, XX GDRE Workshop, Subatech, Nantes, July 2018.
- K. Mikhaylov, “ K^+K^- correlations in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV by ALICE at the LHC” XIV WPCF, Dubna, Russia, 2019.
- L. Malinina (JINR, SINP MSU, on behalf of the ALICE Collaboration), “Femtoscopic correlations of identical charged particles in pp collisions at LHC energies with event-shape selection”, 5th International Conference on Particle physics and Astrophysics (ICPPA-2020),

- Мотивация
- Эксперимент ALICE на LHC
- Результаты
 - Pb-Pb 2.76 TeV : 1D анализ $\pi^+\pi^+$, K^+K^+ , $K_s^0K_s^0$, pp и \overline{pp}
 - Pb-Pb 2.76 TeV: 3D анализ $\pi^+\pi^+$, K^+K^+
 - Pb-Pb 2.76 TeV: 1D анализ K+K-
 - pp 7 TeV : 1D K^+K^+
 - p-Pb 5.02 TeV : 1D K^+K^+
- Заключение

Введение

Корреляционная фемтоскопия: измерение пространственно-временных характеристик $R, c\tau \sim \text{fm}$ области рождения частиц, используя эффекты квантовой статистики (**QS**) и взаимодействия в конечном состоянии (final-state interactions (**FSI**)).



- **Двухчастичная корреляционная функция (CF):**

Теория:
$$C(q) = \frac{N_2(p_1, p_2)}{N_1(p_1) \cdot N_2(p_1)}, C(\infty) = 1$$

Эксперимент:
$$C(q) = \frac{S(q)}{B(q)}, q = p_1 - p_2$$

$S(q)$ – пары из одного события

$B(q)$ – пары из разных событий

- **Параметризации:**

1D: $C(q_{inv}) = 1 + \lambda \exp(-R^2 q_{inv}^2)$, R Гауссовский радиус в системе покоя пары частиц (Pair Rest Frame (**PRF**)), λ параметр силы корреляций

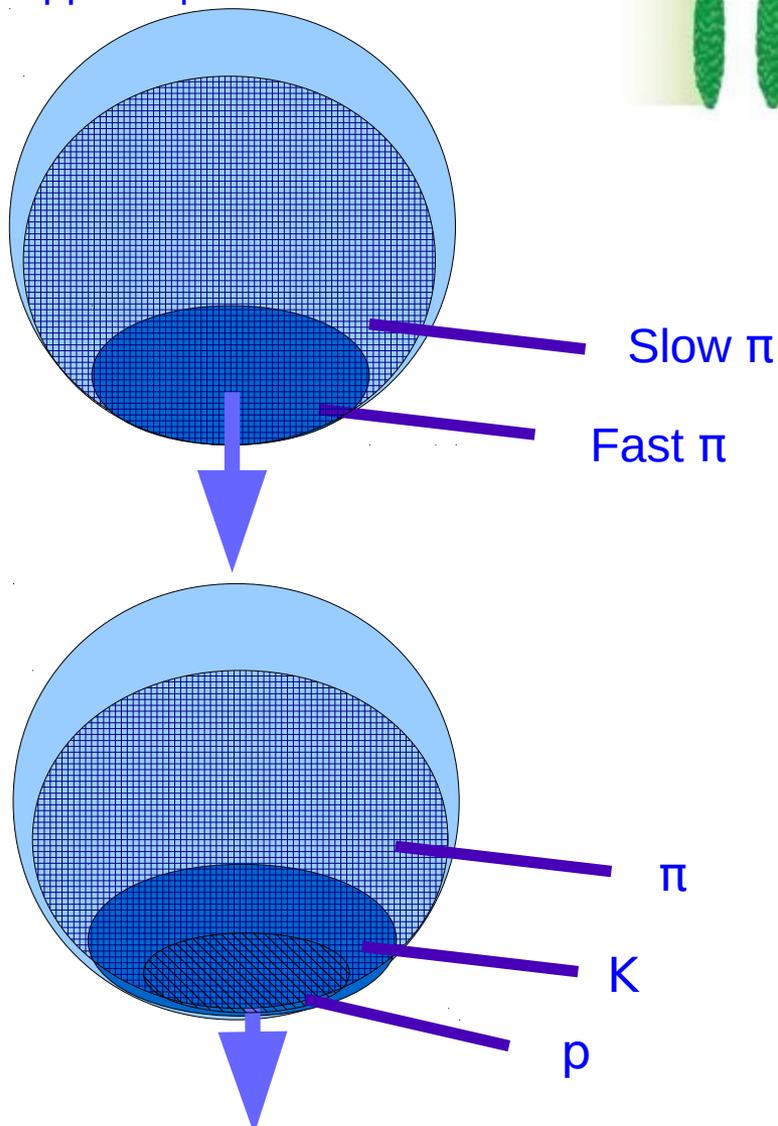
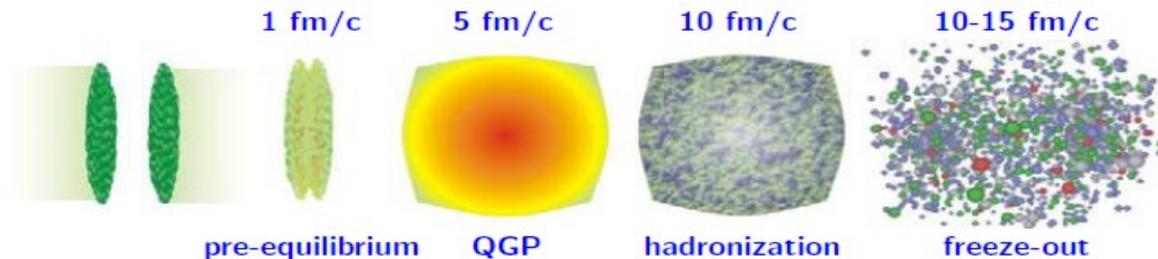
3D:
$$C(q_{out}, q_{side}, q_{long}) = 1 + \lambda \exp(-R_{out}^2 q_{out}^2 - R_{side}^2 q_{side}^2 - R_{long}^2 q_{long}^2)$$

где R и q измерены в Longitudinally Co-Moving System (**LCMS**)

long || пучку; out || поперечной скорости пары v_T ; side перпендикулярно out, long

Мотивация

Расширяющийся источник: x ; r
корреляции



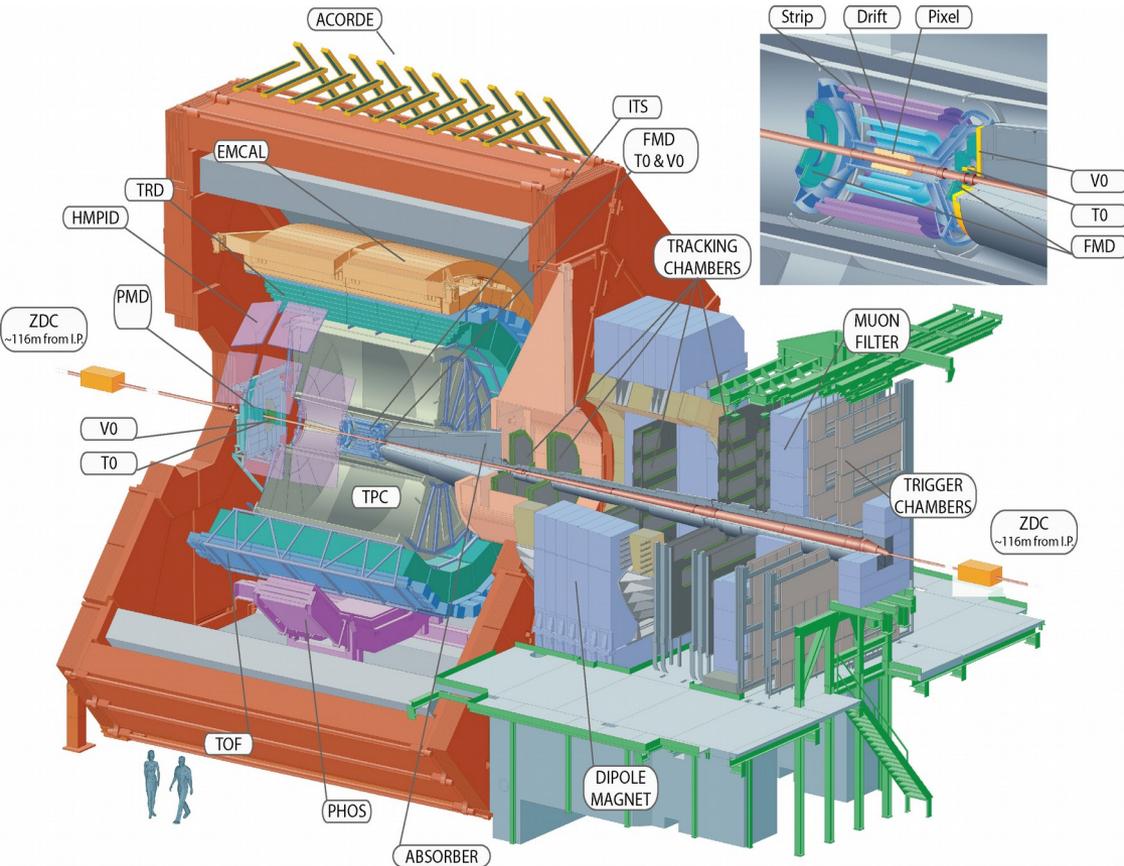
● ФЕМТОСКОПИЯ

- Изучение пространственных & временных характеристик области рождения частиц, коллективной динамики, радиального потока – Наложение ограничений на модели

● Фемтоскопия частиц, более тяжелых чем пионы - дополнение к пт фемтоскопии

- Сильные ограничения на гидродинамические модели: они должны работать для более тяжелых мезонов и барионов
- Проверка m_T зависимости -> определение условий вымораживания
- Возможность разделения разных физических сценариев эволюции, описываемых моделями, работающими для пионов

Детектор ALICE



- **Основной трековый детектор:**
Время-проекционная камера
(Time Projection Chamber (TPC))
- **Определение положения вершины и трекинг:**
Внутренняя трековая система
(Inner Tracking System (ITS))
- **Определение центральности:**
V0
- **Идентификация частиц (PID):**
TPC (потери энергии)
TOF (Time-of-Flight)
(время пролета)

R_{inv} vs m_T для $\pi^\pm\pi^\pm$, $K^\pm K^\pm$, $K^0_s K^0_s$, pp (\overline{pp}) в Pb-Pb

Результаты из *Phys. Rev. D 87, 052016 (2013)*.

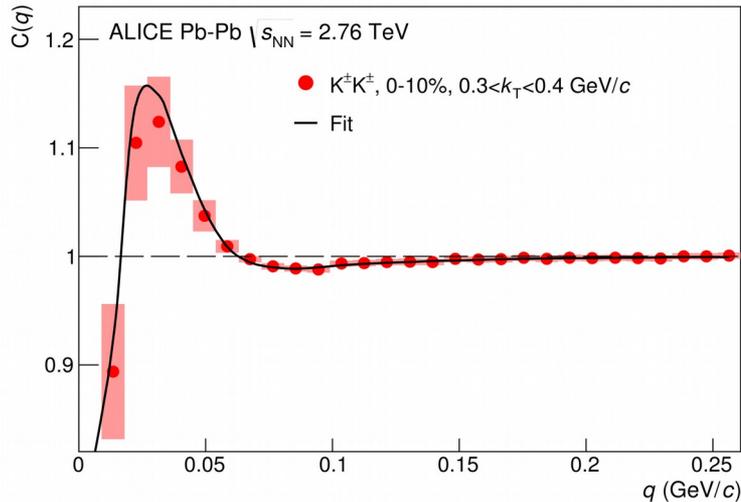
- Пример $K^\pm K^\pm$ корреляционной функции (CF)
- CF скорректированы на импульсное разрешение и чистоту каонов
- Максимум от Бозе-Эйнштейновских корреляций & Кулоновское отталкивание – провал при малых q
- Кривые – фит с использованием формулы Боулера-Синюкова:

$$C(q) = N [1 - \lambda + \lambda K(q) (1 + \exp(-R_{inv}^2 q^2))],$$

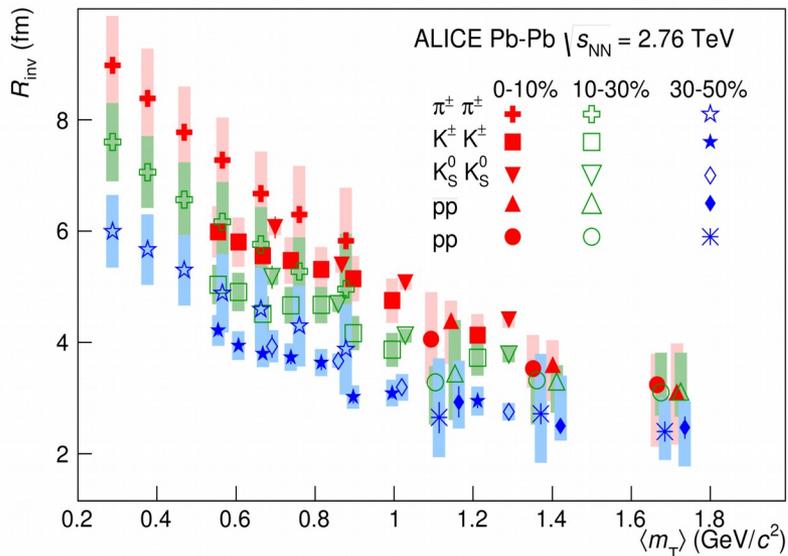
- R_{inv} для $\pi^\pm\pi^\pm$, $K^\pm K^\pm$, $K^0_s K^0_s$, pp и \overline{pp} в зависимости от m_T для разных центральностей

- Радиусы убывают с $m_T \rightarrow$ радиальный поток
Размеры возрастают для более центральных соударений \rightarrow геометрия соударений

- Приближенный m_T скейлинг выполняется для K и p , и не выполняется для пионов (нарушение из-за перехода в PRF).
Но точный скейлинг предсказан для 3D радиусов



ALI-PUB-94255



ALI-PUB-94271

3D Каонная фемтоскопия в Pb-Pb

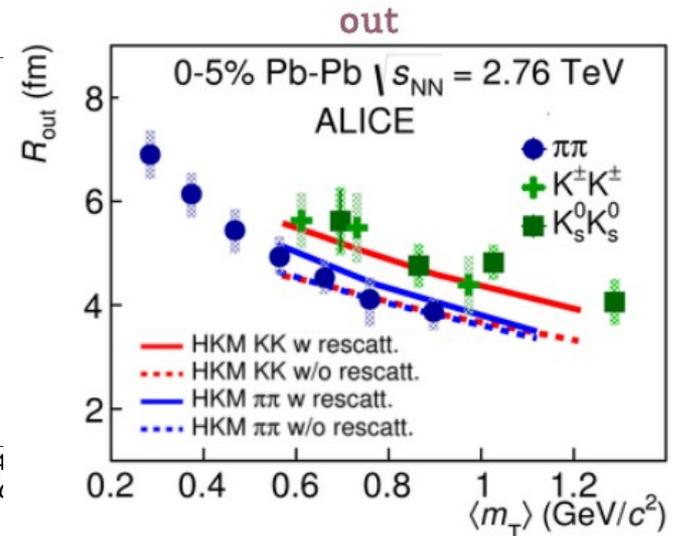
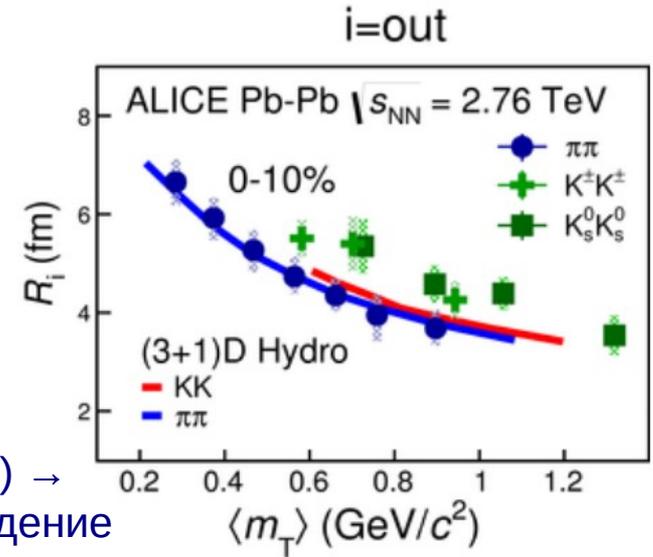
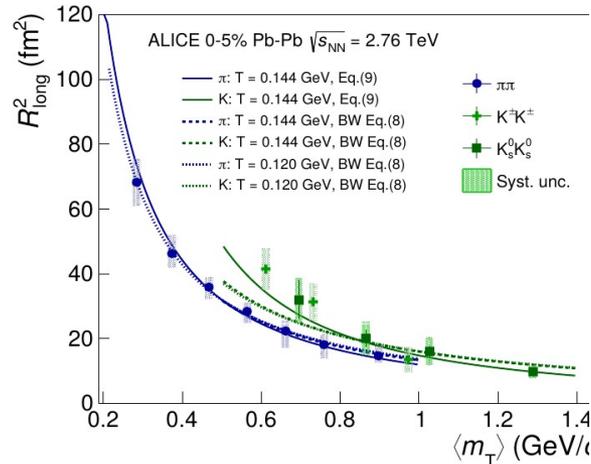
Результаты из *Phys. Rev. C 96, 064613 (2017)*.

- В эксперименте нарушен m_T -скейлинг → каонные радиусы больше пионных
- В чисто гидродинамической модели без перерасеяний → предсказывается скейлинг
- Сравнение с гидрокинетической моделью, где присутствует стадия адронных перерасеяний (HKM) → скейлинг нарушен (из-за перерасеяний K через рождение $K^*892 \sim 4 \text{ fm/c}$, а π – через N^* , Δ ..)

● Из $R_{\text{long}}^2(m_T)$

τ_π (fm/c)	τ_K (fm/c)
9.5 ± 0.2	11.6 ± 0.1

Время эмиссии каонов больше чем пионов на 2.1 fm/c



1D K^+K^- фемтоскопический анализ в Pb-Pb

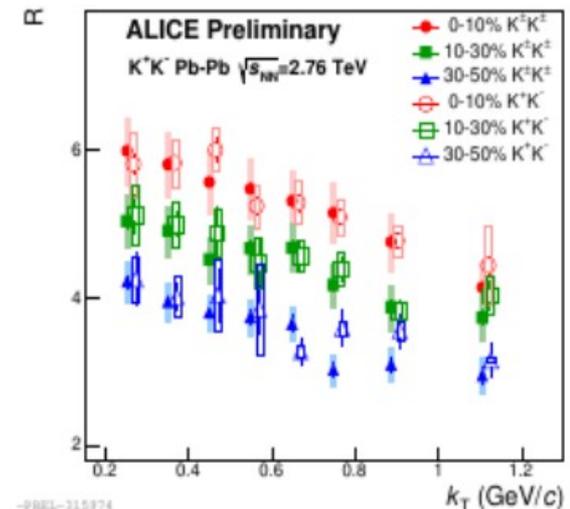
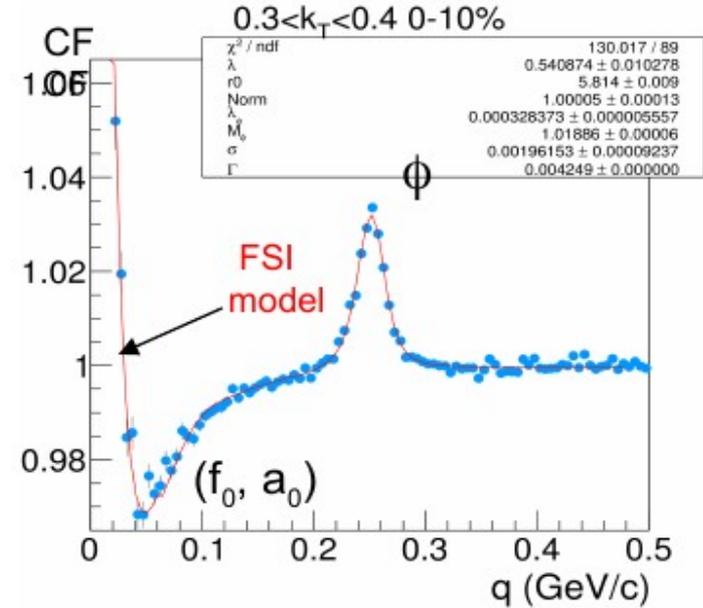
Результаты из *K.Mikhaylov, ICPPA 2020*

- Фемтоскопия позволяет изучать процесс рассеяния частиц, для которых эксперименты по их прямому рассеянию затруднены
- Параметры описания каонной CF получены сравнением с предсказаниями модели взаимодействий в конечном состоянии (FSI) Р. Ледницкого и В. Любошица
- Полученные массы и ширины a_0 , f_0 и ϕ близки к PDG
- Новые параметры для $f_0(980)$:

$$\begin{aligned}
 Y_{f_0 \rightarrow K^+K^-} &= 0.31 \pm 0.062 \pm 0.092 \text{ GeV} \\
 Y_{f_0 \rightarrow \pi\pi} &= 0.081 \pm 0.0162 \pm 0.024 \text{ GeV} \\
 M_{f_0} &= 0.972 \pm 0.003 \pm 0.005 \text{ GeV}/c^2
 \end{aligned}$$

- $K^{\text{ch}}K^{\text{ch}}$ и K^+K^- радиусы совпадают в пределах неопределенностей измерения

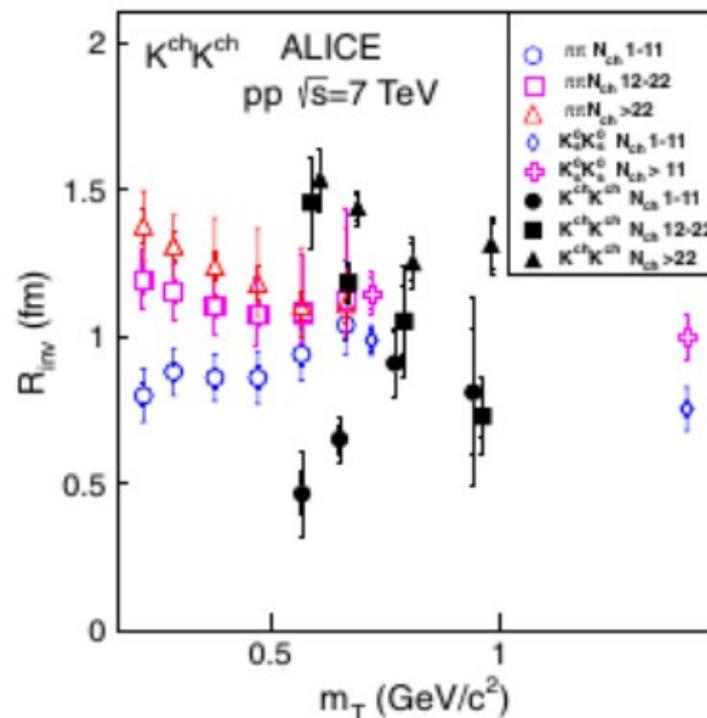
Correlation functions of K^+K^- pairs



КК фемтоскопический анализ в pp 7 TeV

Результаты из *Phys. Rev. D 87, 052016 (2013)*

- Данные для заряженных каонов были получены в pp столкновениях впервые.
- R_{inv} растут с ростом N_{ch} для пар всех типов. С ростом m_T и при $N_{ch} > 11$ наблюдается регулярное падение R_{inv} , но при меньших N_{ch} вместо падения для заряженных мезонов виден рост радиусов, который количественно сильнее для каонных пар.
- Падение R_{inv} в pp столкновениях подобно АА связывают с возможным влиянием гидродинамической фазы, вклад которой очень мал при малых величинах N_{ch} .



Возможное проявление коллективных эффектов при образовании малых систем в pp и p-Pb столкновениях с ростом множественности заряженных частиц обсуждается также на основании таких наблюдений, как “ridge” эффект (CMS, LHC), увеличение выхода странных частиц с ростом множественности событий (ALICE).

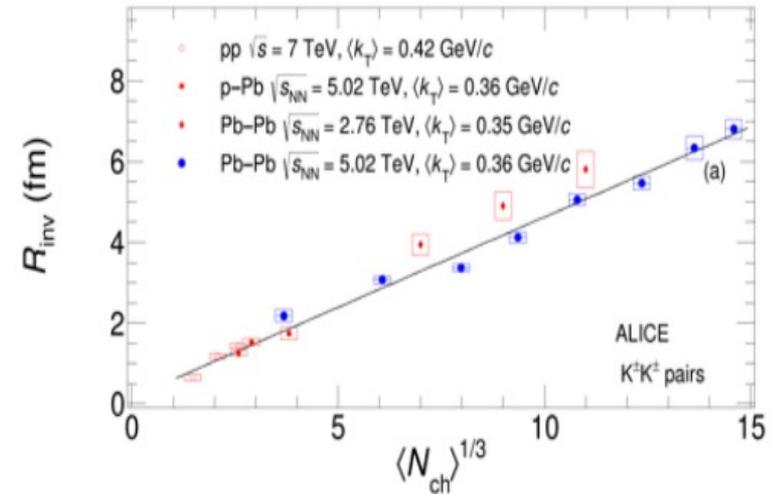
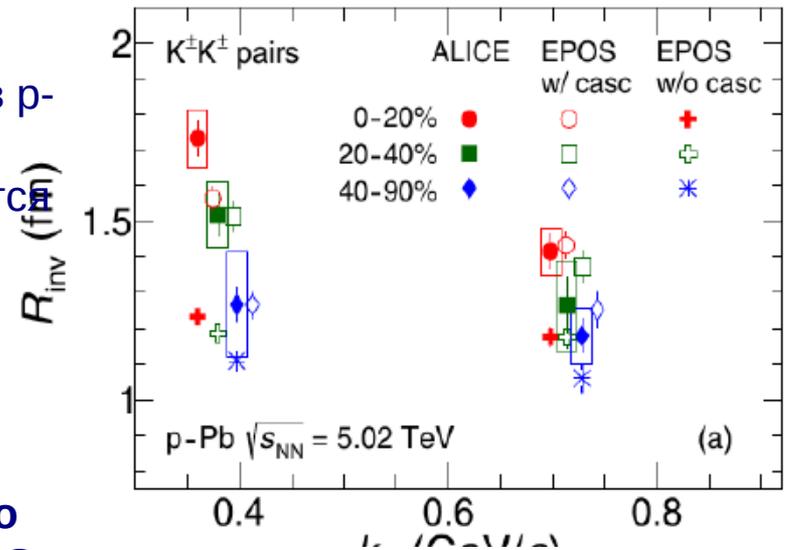
1D K^+K^- фемтоскопический анализ в p-Pb 5.02 TeV

Результаты из *Phys. Rev. C 100, 024002 (2019)*

● Исследование фемтоскопических корреляций в p-A столкновениях вызывает интерес прежде всего тем, что такой тип взаимодействий является промежуточным между pp и A-A с точки зрения влияния механизмов гидродинамики на размер источника испускаения частиц.

● Изучение корреляций пар K в p-Pb столкновениях показало, что для правильного описания радиусов источников в модели EPOS, как и для Pb-Pb взаимодействий, важен учёт механизма перерасеяния адронов в конечном состоянии.

● Из сравнения величин полученных радиусов с найденными для pp и Pb-Pb столкновений можно сделать вывод, что при одинаковой множественности заряженных частиц значения радиусов близки во всех трёх типах взаимодействий (магистерский диплом Г. Романеко, представлено на ALICE meetings).



Заключение

В представленном цикле работ впервые исследовались фемтоскопические корреляции пар заряженных каонов, образующихся в pp , p -Pb и Pb-Pb столкновениях при энергиях ЛНС. При этом во взаимодействиях протонов с протонами и протонов с ядрами такие исследования не делались никогда, даже при более низких энергиях. Был получен ряд новых результатов, которые кратко можно сформулировать следующим образом:

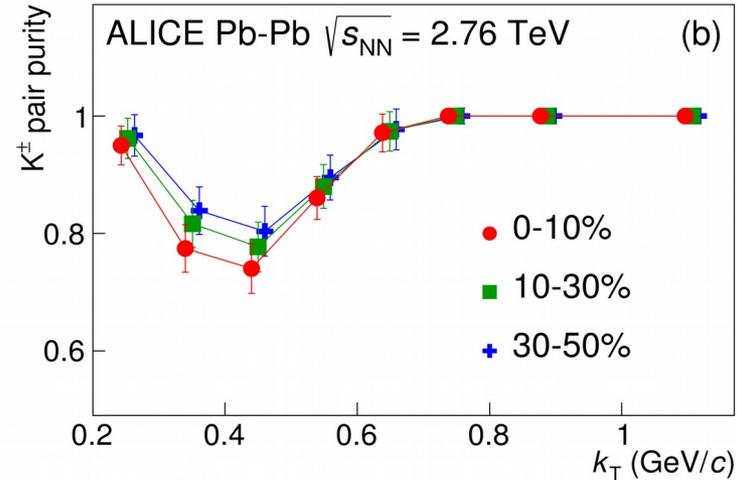
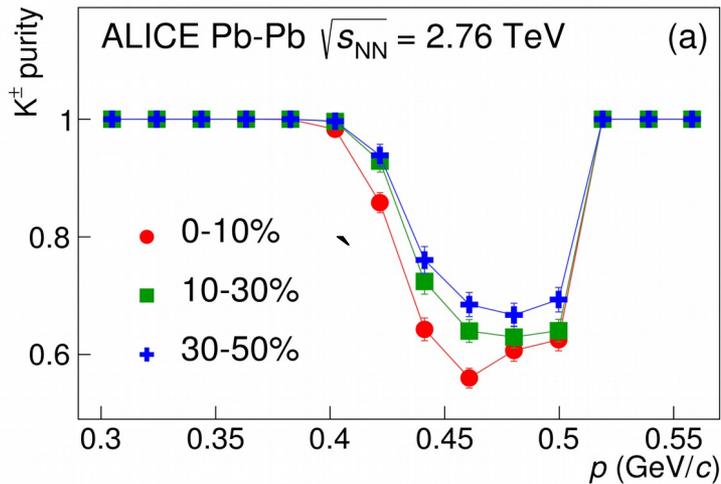
- Обнаружено, что предсказанный теоретически для различных пар частиц m_T -скейлинг нарушался в Pb-Pb соударениях при 2.76 ТэВ при сравнении пар пионов и каонов. Это было объяснено в рамках гидрокинетических моделей (НКМ и EPOS) **влиянием механизма перерассеяния адронов в конечной стадии взаимодействия.**
- Извлеченное экспериментально время эмиссии каонов превышало соответствующее время, найденное для пионов, что объяснялось (НКМ, EPOS модели) влиянием разных резонансов при рождении этих частиц и согласовывалось с наблюдаемым нарушением m_T -скейлинга.
- Изучение корреляций пар K^\pm в p -Pb столкновениях показало, что для правильного описания радиусов источников в модели EPOS, как и для Pb-Pb **взаимодействий, важен учёт механизма перерассеяния адронов в конечном состоянии.**

Заключение

- Из сравнения величин радиусов найденных для pp, p-Pb и Pb-Pb столкновений можно сделать вывод, что при одинаковой множественности заряженных частиц значения радиусов близки во всех трёх типах взаимодействий. Этот результат несколько отличен от полученного ранее при изучении образования π^\pm и требует дальнейшего исследования в рамках теоретических моделей.
- При исследовании в Pb-Pb взаимодействиях корреляций K^+K^- благодаря взаимодействиям в конечном состоянии **были уточнены параметры сильного взаимодействия при переходе $K^+K^- \rightarrow f_0$** с использованием ожидаемого совпадения размеров источников испускания пар тождественных и нетождественных каонов. При этом полученные масса и ширина f_0 согласуются с табличными значениями из PDG
- Все приведённые результаты показывают, что свойства фемтоскопических корреляций рассмотренных частиц, образующихся при столкновениях тяжёлых ядер, достаточно хорошо описываются гидродинамическими моделями при рассмотрении нескольких стадий взаимодействия ядер: первоначальной – до наступления теплового равновесия, предтермализованной стадии с переходом к термализованной равновесной кварк-глюонной плазме, стадии адронизации с учётом перераспределения частиц в конечном состоянии. Для взаимодействий pp и p-Pb предсказания моделей не столь однозначны требуют дальнейшего понимания прежде всего влияния вклада гидродинамических механизмов в эти процессы.

Additional slides

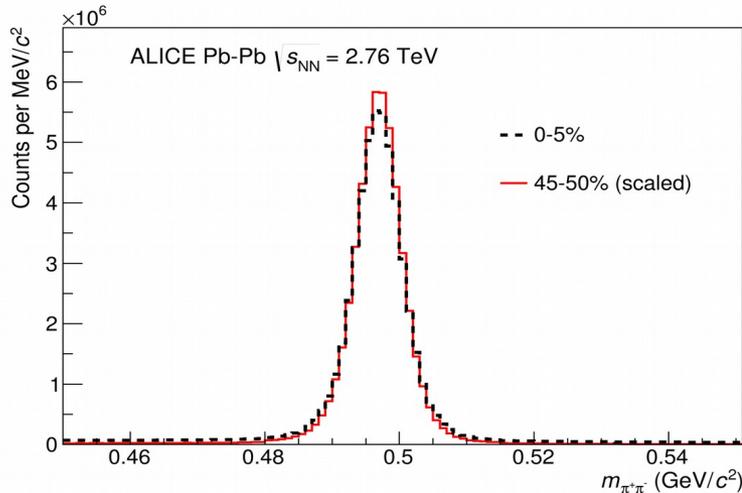
K^\pm and K^0_s PID (ArXiv.org:1506.07884)



ALI-PUB-94243

ALI-PUB-94247

- K^\pm : $0.15 < p_T < 1.5$ GeV/c, $|\eta| < 0.8$, TCP and TOF ($p > 0.5$ GeV/c) $N\sigma$ PID ($N < 3$)
- Single and pair purity: main contamination ($0.4 < p < 0.5$ GeV/c) comes from e^\pm



- $K^0_s \rightarrow \pi^+\pi^-$ ($\sigma = 2.7$ cm)
Daughter π : $p_T > 0.15$ GeV/c, $|\eta| < 0.8$
- TPC and TOF ($p > 0.8$ GeV/c) $N\sigma$ PID
 K^0_s : $|\eta| < 0.8$, $\pi^+\pi^-$ DCA < 0.3 cm,
DCA to prim. vertex < 0.3 cm
- decay length < 30 cm, $\cos(\text{point. angle}) > 0.99$
- $0.480 < m_{\text{inv}} < 0.515$ GeV/c²; Purity $> 95\%$

ALI-PUB-94251

“non-Traditional” femtoscopy:

beyond the system size

$$C(\vec{q}) = \int S(\vec{r}) |\Psi(\vec{q}, \vec{r})|^2 d^3 r$$

measured correlation

emission function
(source size/shape)

Two-particle
wave function

**Obtained by
experiment**

known

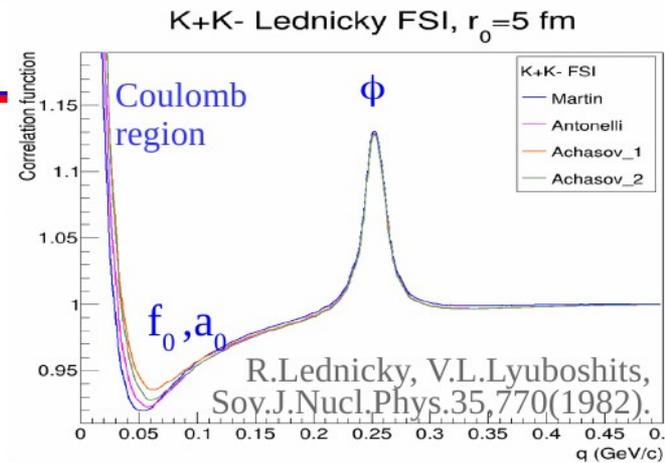
Interaction unknown

- One can use femtoscopy to measure interactions for those pairs where it is poorly known or not known at all!
- Powerful tool when scattering experiments are not possible
- Scattering data, hypernuclei, search for bound states, exotic atoms, etc.

K+K- correlations

Input for fit:

- $C(\mathbf{q}) = \text{Norm} \cdot [1 + \lambda \cdot C_{\text{sFSI}}(\mathbf{q}, \mathbf{R}) + \lambda_\phi \cdot C_\phi(\mathbf{q}, \mathbf{M}, \sigma)]$
 $C_{\text{sFSI}}(\mathbf{q}, \mathbf{R})$ - Lednicky model
 $C_\phi(\mathbf{q}, \mathbf{M}, \sigma)$ - Breit-Wigner $\Gamma_\phi = 4.25 \text{ MeV}$
- a_0 parameters fixed from Achasov² [ALICE PLB774 (2017) 64, PLB 790 (2019) 22]
- f_0 mass and coupling parameters are free

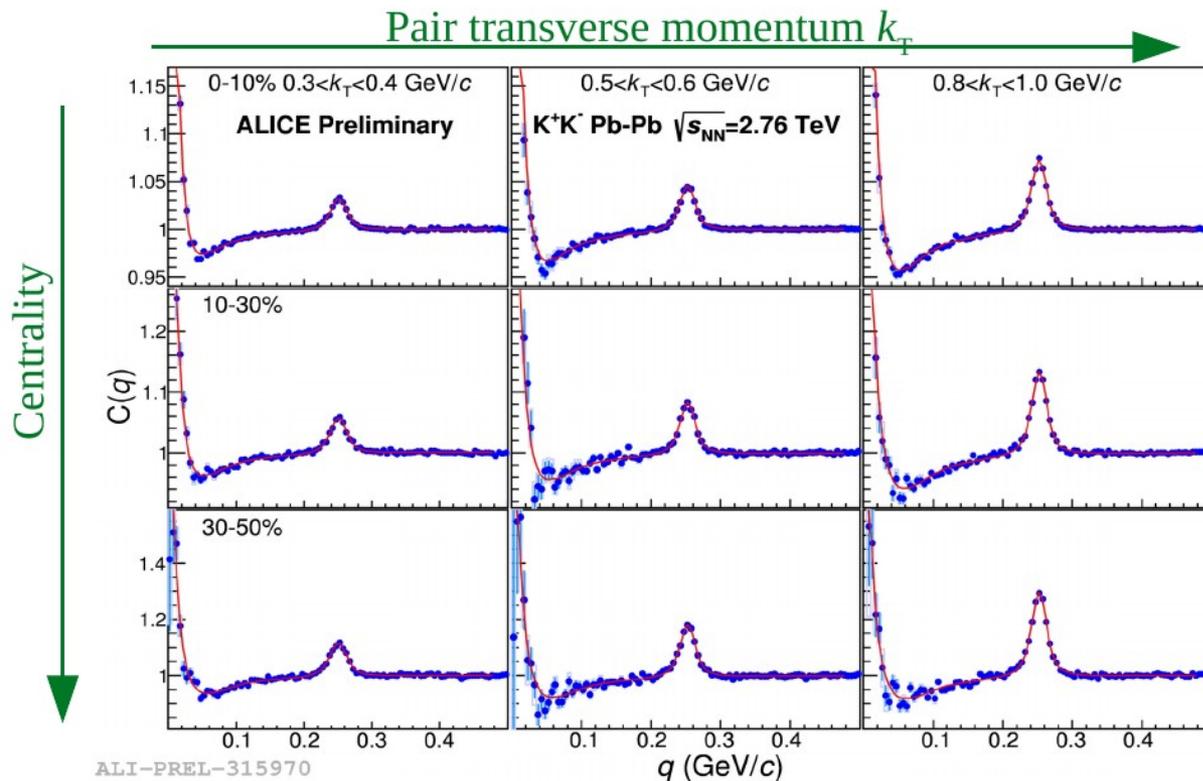


The masses (a_0 and f_0) and coupling parameters

Model	$m_{f_0}^2$	$m_{a_0}^2$	$Y_{f_0 \rightarrow K+K-}$	$Y_{f_0 \rightarrow \pi\pi}$	$Y_{a_0 \rightarrow K+K-}$	$Y_{a_0 \rightarrow \pi\eta}$	
Martin	.9565	.9487	.792	.199	.333	.222	NPB 121 (1977) 514
Antonelli	.9467	.9698	2.763	.5283	.4038	.3711	hep-ex/0209069
Achasov ¹	.9920	.9841	1.305	.2684	.5555	.4401	PRD 63(2001) 094007
Achasov ²	.9920	1.0060	1.305	.2684	.8365	.4580	PRD 68(2003) 014006

K+K- correlations

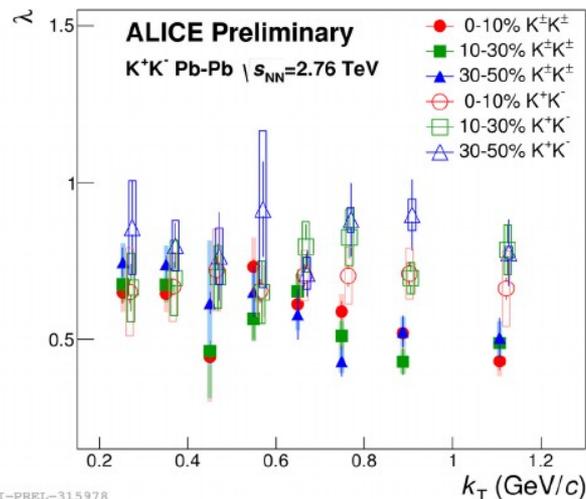
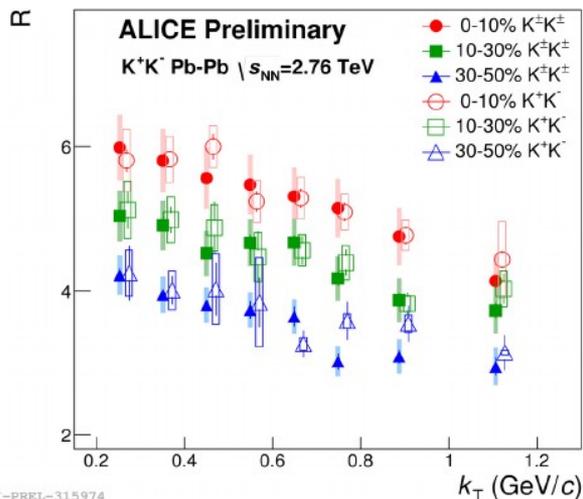
Correlation functions fitted by FSI with new f_0 parameters



- Fit function gives a good description for all k_T (left to right) and centrality(top to bottom) bins.

K+K- correlations

Comparison radii and λ of K^+K^- and $K^\pm K^\pm$



- Radii are in agreement within errors
- λ of K^+K^- tend to be larger than for λ of $K^\pm K^\pm$ (possible due to FSI slightly underestimate)
- New preliminary $f_0(980)$ couplings and mass parameters:

$$Y_{f_0 \rightarrow K^+K^-} = 0.31 \pm 0.062 \pm 0.092 \text{ GeV}$$

$$Y_{f_0 \rightarrow \pi\pi} = 0.081 \pm 0.0162 \pm 0.024 \text{ GeV}$$

$$M_{f_0} = 0.972 \pm 0.003 \pm 0.005 \text{ GeV}/c^2$$