

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Лаборатории

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 г.

**ОТЧЕТ ПО ТЕМЕ / КРУПНОМУ ИНФРАСТРУКТУРНОМУ ПРОЕКТУ  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

**1. Общие сведения о теме / КИП**

**1.1. Шифр темы / КИП: 02—01—1088--2009/2022**

**1.2. Лаборатория: ЛФВЭ**

**1.3. Научное направление: Физика элементарных частиц и релятивистская ядерная физика**

**1.4. Наименование темы / КИП: ALICE: Исследование взаимодействий пучков тяжелых ионов и протонов на коллайдере LHC**

**1.5. Руководитель темы / КИП: А.С.Водопьянов**

**1.6. Проекты в теме / подпроекты КИП: ALICE**

**2. Научный отчет об исполнении темы / КИП**

**2.1. Аннотация**

ALICE является многоцелевым экспериментом для исследования взаимодействий тяжёлых ионов, который был создан для изучения физики сильно взаимодействующей материи и кварк - глюонной плазмы в ядро-ядерных столкновениях на LHC. В настоящее время в этом эксперименте участвуют 1946 специалистов из 173 институтов, из 42 стран.

Главные усилия группы ОИЯИ в анализе данных и в физическом моделировании были сконцентрированы на изучении фемтоскопических корреляций, рождения лёгких векторных мезонов в ультра-периферических Pb-Pb столкновениях и в развитии Термальной модели рождения частиц в pp и A-A столкновениях. Кроме того группа ОИЯИ продолжала участвовать в поддержании и развитии GRID-ALICE анализа в ОИЯИ и в работах по модернизации фотонного спектрометра.

**2.2. Развернутый научный отчет**

2.2.1. Описание выполненных работ и полученных результатов по всем проектам и активностям темы.

2.2.2. Основные публикации (список библиографических ссылок).

2.2.3. Полный список публикаций по теме (приложение в электронном виде).

2.2.4. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).

2.2.5. Патентная деятельность (при наличии).

## Раздел I. Исследование фемтоскопических корреляций.

### Секция I.1. Введение.

Экстремально высокие плотности энергии, достигаемые в столкновениях тяжёлых ионов на ЛНС, могут приводить к образованию кварк-глюонной плазмы (КГП): состоянию материи с характерными партонными степенями свободы. Считается, что возникающая в результате столкновения сжатая сильно взаимодействующая система подвергается продольному и поперечному расширению. Экспериментально такое расширение может проявлять себя через корреляции Бозе-Эйнштейна для пар тождественных частиц или через корреляции пар нетождественных частиц за счёт взаимодействий в конечном состоянии.

За период 2020-2022 гг группа ОИЯИ провела целый ряд различных типов анализа фемтоскопических корреляций заряженных каонов ( $K^{\text{ch}}K^{\text{ch}}$ ) в pp, p-Pb и Pb-Pb соударениях при энергиях 13 ТэВ, 2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ (на пару нуклонов) соответственно. При этом был использован опыт, накопленный в предыдущие годы по методическим исследованиям (отбору отдельных частиц и их пар, идентификации каонов и учёту фона) и использованию различных Монте-Карло генераторов событий. Изучались зависимости фемтоскопических радиусов от множественности (центральности) и поперечного импульса пары частиц ( $k_T$ ), делалось сравнение с частицами других типов и предсказаниями теоретических моделей. Часть результатов была представлена на международных конференциях и опубликована, по некоторым другим результатам исследования продолжают. Подробнее эти результаты будут обсуждаться в секциях I.2- I.4.

### Секция I.2. Исследование корреляций пар нетождественных каонов ( $K^+K^-$ ) в Pb-Pb соударениях при энергии 2.76 ТэВ (на пару нуклонов).

Группой ОИЯИ был проделан детальный анализ  $K^+K^-$  пар в рамках Модели взаимодействия частиц в конечном состоянии (FSI) Р. Ледницкого и В. Любошица [1]. Как и ранее, особое внимание уделялось максимально точному измерению чистоты отобранных каонов (purity) с использованием методов, разработанных группой ОИЯИ в предыдущих исследованиях. Чистота одиночных каонов и пар каонов приведена на Рис.1.

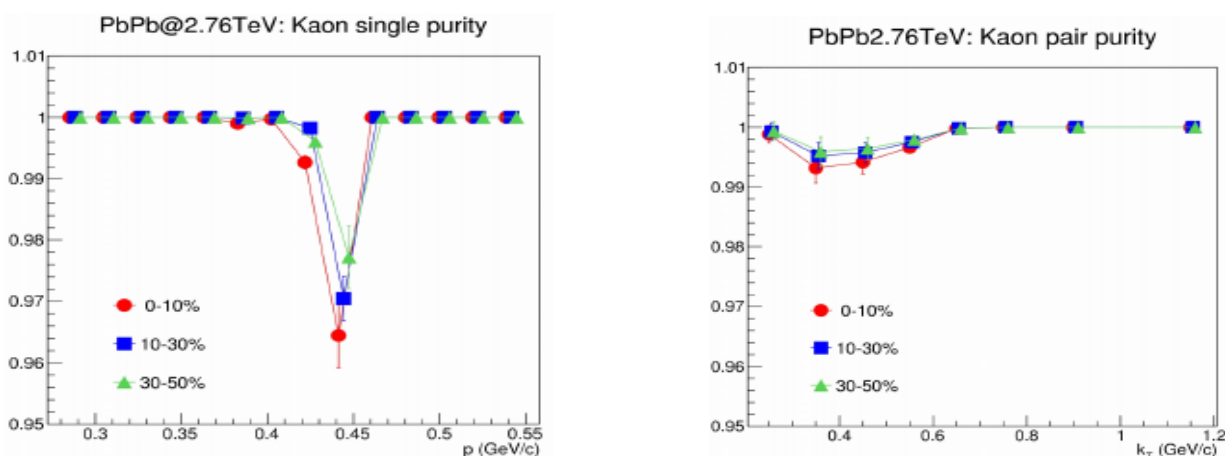


Рис.1. (Слева): чистота выделения отдельного каона в зависимости от его импульса и для трёх центральных событий; (справа): чистота выделения пары каонов в зависимости от

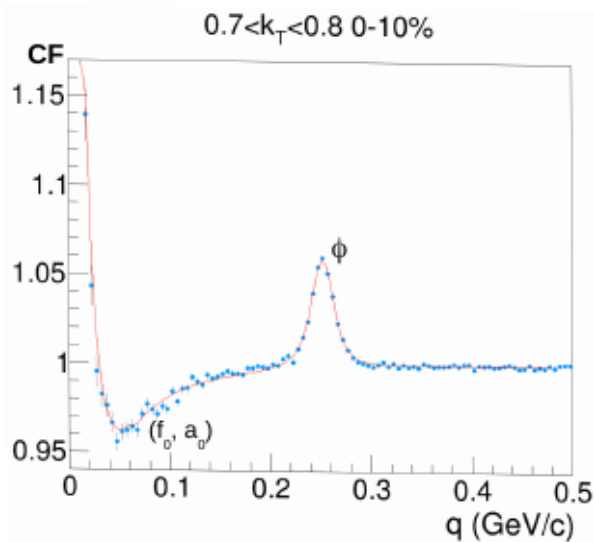
поперечного импульса пары ( $k_T$ ).

Корреляционная функция пар  $K^+K^-$  определялась в эксперименте по известному правилу  $C(p_1, p_2) = A(p_1, p_2)/B(p_1, p_2)$ , где двухчастичные распределения  $A$  и  $B$  получены для пар частиц из одного или из разных событий (методом смешивания). Для 1Д анализа  $C(p_1, p_2)$  представляется в зависимости от

$$q_{inv} = \sqrt{|\mathbf{q}|^2 - q_0^2}, \quad \mathbf{q} = \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2, \quad q_0 = E_1 - E_2.$$

Типичная форма корреляционной функции показана на Рис.2, где синие точки получены в эксперименте, а красная кривая – результат аппроксимации в модели по общей формуле

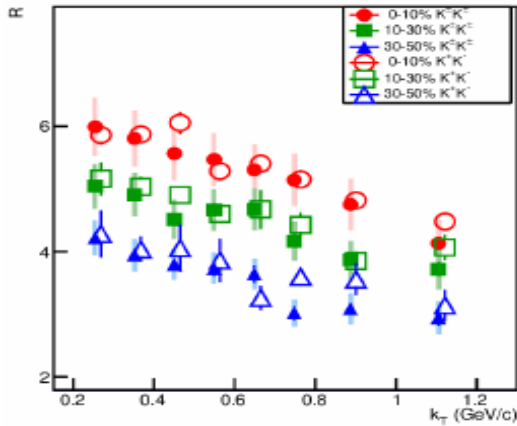
$$C_{FSI}(p_1, p_2) = 1 + C_{sFSI}(p_1, p_2) + N_1 C_{\phi-direct}(p_1, p_2) + N_2 C_{\phi}(p_1, p_2)$$



**Рис.2.** Корреляционная функция пар  $K^+K^-$  в зависимости от  $q_{inv}$  для Pb-Pb столкновений. Синие точки – эксперимент, красная кривая – результат модельного фита

Детально приведенная выше формула рассмотрена в работе [1]. Здесь отметим, что  $C_{sFSI}$  определяет вклад  $f_0$  и  $a_0$  мезонов, а  $C_{\phi-direct}$  и  $C_{\phi}$  – вклады  $\phi$  мезонов, образующихся соответственно на кварк-глюонном этапе и на этапе FSI. В качестве свободных параметров берутся: радиус источника излучения  $K^+$  и  $K^-$ , масса  $f_0$  мезона, константы связи для каналов  $f_0 \rightarrow K^+K^-$ ,  $f_0 \rightarrow \pi\pi$  и доли вкладов  $N_1, N_2$ . Остальные величины взяты из ранее проведенных исследований. В течение 2020-2021 гг совместно с автором модели Р. Ледницки были сделаны уточнения полученных из аппроксимации значений массы и ширины  $f_0$ , которые составили  $967 \pm 3 \pm 7 \text{ MeV}/c^2$  и  $43,8 \pm 8,8 \pm 6,9 \text{ MeV}$ , что соответствует табличным величинам. Кроме того, более детально исследовались возможные значения  $N_1$  и  $N_2$  с привлечением дополнительной корреляции параметров модели. В результате параметры  $N_1$  и  $N_2$  были получены соответственно в пределах 0,7- 0,8 и 0,3 – 0,2, т.е. доля образования  $\phi$  мезонов на стадии FSI не превышает 30%.

Рисунок 3 показывает зависимости радиусов источника ( $R_{inv}$ ) от поперечного импульса пары  $K^+K^-$  ( $k_T$ ) для событий с различными центральностями. Для сравнения приведены также результаты, полученные для пар тождественных каонов ( $K^+K^+/K^-K^-$ ) [2].



**Рис.3.** Зависимости радиуса источника излучения пар каонов от поперечного импульса пары для Pb-Pb событий с различными центральностями. Результаты для  $K^+K^-$  ( $K^+K^+/K^-K^-$ ) показаны открытыми (сплошными) символами.

Из Рис.3 видно, что радиусы для нетождественных и тождественных каонных пар совпадают и уменьшаются с ростом величин центральности и  $k_T$ , что соответствует предсказаниям гидродинамических моделей. Полученные результаты были частично опубликованы в [3] и включены в драфт полной публикации, подготовленной в 2022 г.

### Секция I.3. Исследование корреляций пар тождественных каонов и пионов в pp соударениях при энергии 13 ТэВ.

Указанные исследования проводились с отбором событий по сферичности, которая определялась по формуле

$$S_{XY} = \frac{1}{\sum_i p_T^i} \sum_i \frac{1}{p_T^i} \begin{pmatrix} (p_x^i)^2 & p_x^i \cdot p_y^i \\ p_x^i \cdot p_y^i & (p_y^i)^2 \end{pmatrix},$$

( $p_T$ ,  $p_x$ ,  $p_y$  компоненты импульсов частиц), что позволяло отбирать отдельно сферичные события с  $S_{xy} > 0,7$  и события с образованием струй с  $S_{xy} < 0,3$ . Основным интересом является в сравнении зависимостей радиусов источников от поперечной массы пар  $m_T$  в этих событиях, для проверки возможного проявления коллективных эффектов в pp столкновениях. Корреляционная функция определялась по методу, указанному в Секции 1.2, и аппроксимация проводилась по формуле

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

где  $N$  — коэффициент нормировки,  $R_{inv}$  — радиус источника,  $K$  — функция кулоновского взаимодействия с радиусом  $r$ ,  $D$  — функция, отражающая фоновые эффекты, и  $\lambda$  — фактор силы корреляции. Зависимости  $R_{inv}$  от  $m_T$  для пар пионов и каонов в событиях разных множественностей и  $S_T$  ( $S_{XY}$ ) показаны на Рис.4, где видно, что  $R_{inv}$  уменьшаются с ростом  $m_T$

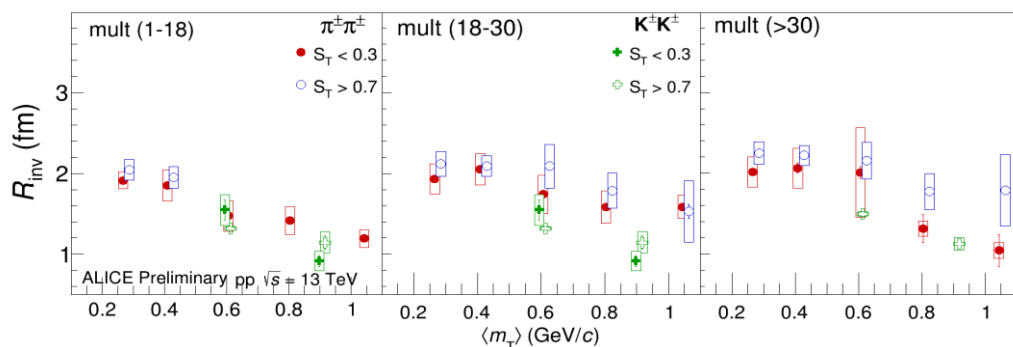


Рис.4. Зависимости  $R_{inv}$  от  $m_T$  для пар пионов и каонов в событиях разных множественностей и сферичностей  $S_T$ .

в обоих случаях отборов по  $S_T$ , т.е. и в событиях без образования струй, что может означать некоторое проявление коллективных гидродинамических механизмов в pp столкновениях. Эти предварительные результаты представлялись на конференции “5<sup>th</sup> International Conference on Particle physics and Astrophysics (ICPPA-2020), October 7, 2020, MPhI, Moscow”, и требуют дальнейшей проверки на увеличенной статистике в pp столкновениях.

#### Секция I.4. Исследование корреляций пар тождественных каонов и пионов в Pb-Pb соударениях при энергии 5,02 ТэВ.

Указанные исследования включали 1Д и 3Д анализы, сделанные при максимальной энергии Pb-Pb соударений. Метод 1Д анализа, описанный в Секции 1.2, использовался и в этом случае с применением формулы 1 для аппроксимации корреляционной функции. На Рисунке 5 приведены зависимости радиусов источника  $R_{inv}$  излучения каонов от поперечного импульса пары каонов  $k_T$  для событий разной центральности. Видно, что  $R_{inv}$  уменьшаются с ростом  $k_T$  как следствие проявления коллективного эффекта при взаимодействии ядер, и этот эффект

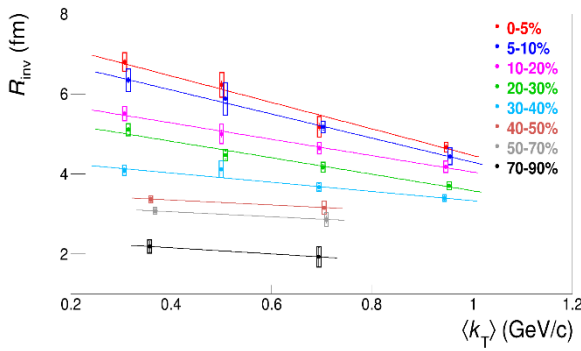


Рис.5. Зависимость  $R_{inv}$  для каонов от поперечного импульса пары каонов для событий разной центральности.

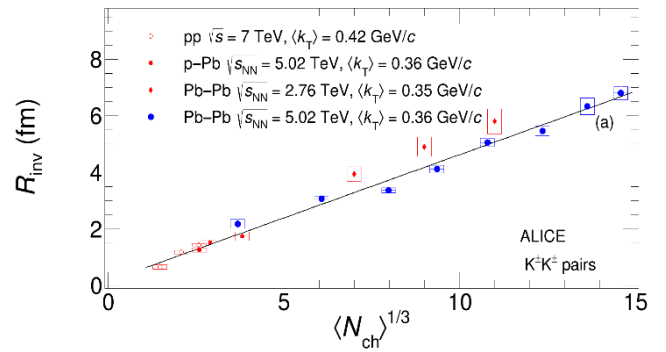


Рис.6. Зависимость  $R_{inv}$  для каонов от множественности заряженных частиц для разных взаимодействующих систем.

заметно ослабевает для периферичных событий. На Рис.6 показана зависимость  $R_{inv}$  от множественности заряженных частиц ( $N_{ch}$ ) в pp, p-Pb и Pb-Pb столкновениях при близких значениях  $k_T$  каонных пар. Видно, что все точки близки к одной линейной зависимости, т. е. радиусы источников для разных взаимодействующих систем во многом определяются множественностью образующихся частиц.

Трёхмерный (3Д) анализ фемтоскопических корреляций позволяет более детально изучать три компоненты радиуса источника испускания частиц, т. е. фактически пространственную форму источника. Экспериментальная методика в данном анализе была такой же, как и в одномерном анализе, рассмотренном выше. Корреляционная функция в трехмерном анализе представляется зависящей от трёх компонент переменной  $q$  (указанной в секции 1.2), которые вычисляются в системе LCMS, где продольный импульс пары зануляется и определяются компоненты  $q_{out}$ ,  $q_{side}$ ,  $q_{long}$  с осями: «long» - вдоль пучка, «out» - вдоль поперечного импульса пары, «side» - перпендикулярной последней в поперечной плоскости. Корреляционная функция фитировалась формулой

$$C(\mathbf{q}) = N(1 - \lambda) + N\lambda K(q) [1 + \exp(-R_{out}^2 q_{out}^2 - R_{side}^2 q_{side}^2 - R_{long}^2 q_{long}^2)],$$

Параметр  $\lambda$  и функция  $K(q)$ , как и в формуле (1), описывают соответственно силу корреляции и кулоновское взаимодействие заряженных частиц. На Рисунке 5 приведены зависимости радиуса источника  $R_{\text{long}}$  от поперечной массы ( $m_T$ ) пары каонов для событий разной центральности. Видно, что  $R_{\text{inv}}$  уменьшаются с ростом  $m_T$  как и в случае 1Д анализа. Зависимости для  $R_{\text{site}}$  и  $R_{\text{out}}$  имеют подобный характер (здесь не показаны). В этом анализе

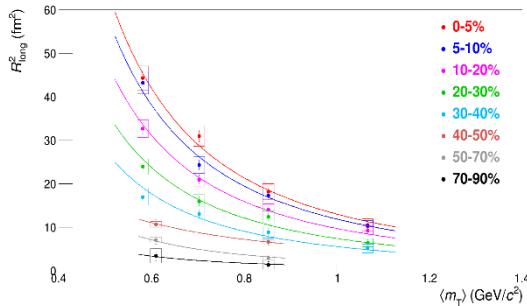


Рис.5. Зависимость  $R_{\text{inv}}$  для каонов от поперечного импульса пары каонов и для событий разной центральности.

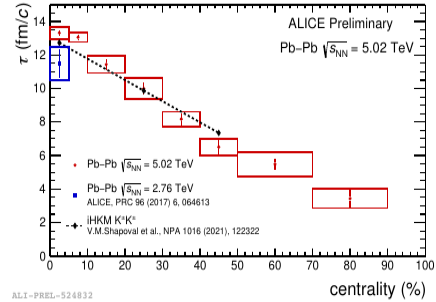


Рис.6. Зависимость времени эмиссии частиц ( $\tau$ ) от центральности событий.

Впервые в таком анализе была получена зависимость максимального времени эмиссии каонов от центральности событий. Как и в работе [4]

$$R_{\text{long}}^2 = \tau_{\text{max}}^2 \frac{T_{\text{max}}}{m_T \cosh y_T} \left( 1 + \frac{3T_{\text{max}}}{2m_T \cosh y_T} \right), \text{ использовалась формула}$$

$$\cosh y_T = (1 - v_T^2)^{-1/2}, \quad v_T = \frac{\beta p_T}{\beta m_T + \alpha}$$

где  $T_{\text{max}}$  — максимальная температура.

На Рис.6 показана эта зависимость вместе с предсказанием НКМ модели [5] (чёрные кресты) и значением (синяя точка), полученным ранее при энергии 2,76 ТэВ [4] для наиболее центральных событий. Видно, что ожидаемое уменьшение  $\tau$  для более периферичных событий согласуется с предсказанием модели. Полученные результаты докладывались на Советании группы ALICE по фемтоскопическим исследованиям и были включены в дипломную работу магистра МГУ 2021-го года Г.Э. Романенко.

## Секция I.5. Выводы для раздела I

Основные выводы приведенных результатов следующие:

- Прделан более точный 1-Д фемтоскопический корреляционный анализ для пар нетождественных ( $K^+$  и  $K^-$ ) каонов, образующихся в Рb-Рb взаимодействиях при энергии 2.76 TeV. При описании экспериментальных результатов в Модели взаимодействия частиц в конечном состоянии Р. Ледницкого и В. Любошица были уточнены (в сотрудничестве с Р. Ледницким) параметры модели. и доли различных механизмов рождения  $\phi$  мезонов. В результате этих исследований были получены более точные масса и ширина  $f_0$  резонанса, доля рождения  $\phi$  мезона на стадии взаимодействия частиц в конечном состоянии и показано, что радиусы источников для нетождественных и тождественных каонных пар совпадают по величинам с одинаковыми зависимостями от центральности событий и поперечного импульса пары.
- Было проведено исследование фемтоскопических корреляций каонных и пионных пар в рр соударениях при энергии 13 ТэВ с отбором по сферичности событий и показано, что  $R_{\text{inv}}$  уменьшаются с ростом  $m_T$  в событиях без образования струй, что может означать некоторое проявление коллективных гидродинамических механизмов в рр столкновениях.
- Выполнены 1Д и 3Д анализы фемтоскопических корреляций пар тождественных каонов при

максимальной энергии Pb-Pb соударений. В 1Д анализе показано, что радиусы источников для разных взаимодействующих систем во многом определяются множественностью образующихся частиц. Впервые в 3Д анализе была получена зависимость максимального времени эмиссии каонов от центральности событий.

## Раздел II Ультра-периферические столкновения тяжелых ионов.

Ультра-релятивистские тяжелые ионы являются источником сильного ( $\sim Z^2$ ) электромагнитного поля - потока квазиреальных фотонов в рамках подхода Вайцекера-Вильямса [6]. В случае больших ( $>$  суммы радиусов) прицельных параметров сталкивающихся ионов взаимодействия называют ультра-периферическими столкновениями (УПС). В таких взаимодействиях возможно фоторождение векторных мезонов - фотон поля одного ядра флуктуирует в связанную кварк-антикварковую пару, которая затем упруго рассеивается на другом ядре через обмен помероном. В период 2020-2022 гг группа ОИЯИ-ALICE участвовала в исследованиях когерентного рождения  $\rho^0$  в Pb-Pb ультра-периферических столкновениях с энергией 5.02 TeV как во всех событиях, так и с отбором событий с четырьмя заряженными частицами. На Рис.7 показано распределение по инвариантной массе  $\pi^+\pi^-$  пар, наблюдаемых в области быстрот ТРС. Большая статистика, полученная в процессе Run2 LHC, позволила выделить пик  $\rho^0$  с хорошей точностью и наблюдать более тяжёлое состояние  $\rho^0$ , показанное на Рис.8. Синяя кривая на Рис.7 показывает сумму вкладов резонанса (Breit-Wigner — зелёная кривая),  $\rho^0$  -  $\pi\pi$  интерференции (зелёный пунктир), вклад мюонных распадов (красный пунктир). Полученные при фитировании значения массы и ширины равнялись соответственно  $769,5 \pm 1,2 \pm 2,0$  MeV/c<sup>2</sup> и

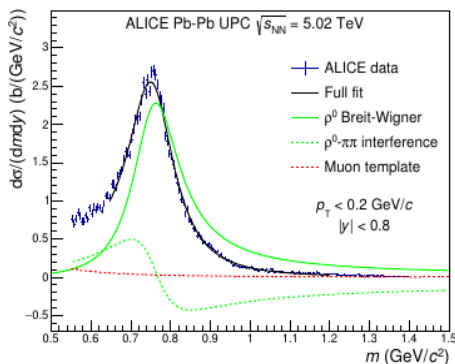


Рис.7. Распределение по инвариантной массе  $\pi^+\pi^-$  пар. Кривые линии обозначают разные вклады (смотрите текст).

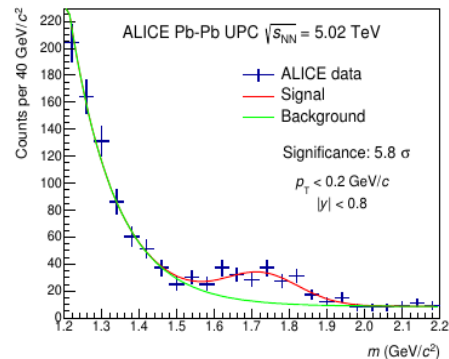


Рис.8. Распределение по инвариантной массе  $\pi^+\pi^-$  пар. Кривые линии обозначают выделенный сигнал и фон.

$156 \pm 2,0 \pm 3,0$  MeV/c<sup>2</sup>, близкие к значениям PDG. Результаты включали также дифференциальные сечения в зависимости от быстроты и их сравнение с разными моделями. Масса и ширина более тяжёлого резонанса, полученные из фитирования (Рис.8), равнялись  $1725 \pm 17$  и  $143 \pm 21$  MeV/c<sup>2</sup>, что соответствует PDG значениям  $\rho^0$  (1700). Все результаты были представлены в публикации ALICE [7].

На Рис.9 показан предварительный результат для распределения по инвариантной массе когерентных событий с четырьмя заряженными пионами ( $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ ) в конечном

состоянии. Красная кривая — результат фитирования экспериментальных данных функцией Breit-Wigner (B-W). Полученные значения массы и ширины резонансного максимума составляли соответственно  $1456 \pm 7$  и  $387 \pm 15$  MeV/c<sup>2</sup>, что совпадает со значениями PDG для состояния  $\rho^0(1450)$  при значимости фитирования  $\chi^2/\text{ndf} = 108/39$ . На Рис.10 показан такой же результат, но при фитировании двумя функциями Breit-Wigner. Здесь суммарный фит (красная кривая) включает вклады двух функций B-W (зелёная и синяя кривые) и интерференцию между ними (розовая кривая). Значения массы и ширины первого состояния равнялись  $1447 \pm 50$  и  $504 \pm 144$  MeV/c<sup>2</sup>, и второго состояния -  $1722 \pm 63$  и  $440 \pm 207$  MeV/c<sup>2</sup>, при значимости  $\chi^2/\text{ndf} = 54/35$ . Видно, что наложение двух резонансов  $\rho^0(1450)$  и  $\rho^0(1700)$  имеет несколько лучшую значимость чем фитирование одной функцией B-W хотя соответственно с заметно большими ошибками полученных параметров. Для выбора между этими двумя представлениями необходимы дальнейшие исследования с повышенной статистикой. Результаты докладывались на Совещаниях ALICE.

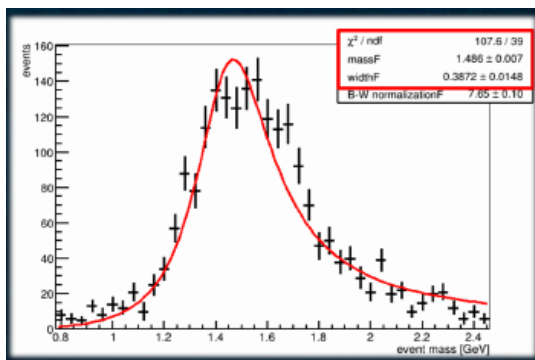


Рис.9. Распределение по инвариантной массе когерентных событий с четырьмя заряженными пионами ( $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$ ) в конечном состоянии. Кривая — фит функцией B-W.

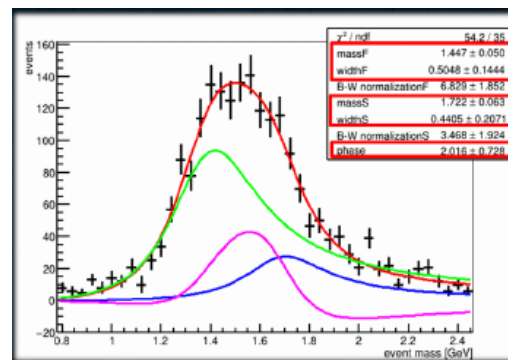


Рис.10. То же самое что на рис.9, но с фитированием двумя B-W функциями и интерференцией между ними (кривые пояснены в тексте).

## Выводы для раздела II.

- На статистике, полученной в течение 2015-2018 гг, исследовано когерентное рождение  $\rho^0$  в ультра-периферических (UPC) Pb-Pb столкновениях с энергией 5.02 TeV. Измерено дифференциальное сечение и сделано сравнение с предсказаниями различных моделей.
- Проведено предварительное исследование когерентного рождения состояний  $\rho^0(1450)$  и  $\rho^0(1700)$  в (UPC) событиях с четырьмя пионами ( $\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$ ) в конечном состоянии.

## Раздел III. Развитие Термальной модели рождения частиц в pp и A-A столкновениях.

Была разработана новая версия Термальной модели с рассмотрением A-A столкновений, как развитие предыдущей для pp взаимодействий, опубликованной в [8]. Модель включала три компоненты: термальное распределение (эффект потока частиц) Больцмана — Гибса, распределение Тсаллиса для распадов резонансов, степенной закон для КХД жёстких процессов. Получены отношения выходов заряженных частиц, их спектры по поперечным импульсам ( $p_T$ ), факторы ядерной модификации, которые при столкновении ядер A и B определяются как



$$R_{AB} = \frac{d^2 N_{AB}/dp_T dy}{\langle N_{coll} \rangle d^2 N_{pp}/dp_T dy}$$

где  $N_{coll}$  — число нуклонных столкновений. На Рис. 11 сравниваются зависимости от  $p_T$  величин  $R_{PbPb}$  для разных частиц и событий разных центральностей, полученных в модели и в экспериментах ALICE и CMS. Видно хорошее согласие модельных и экспериментальных результатов. Результаты опубликованы в [9].

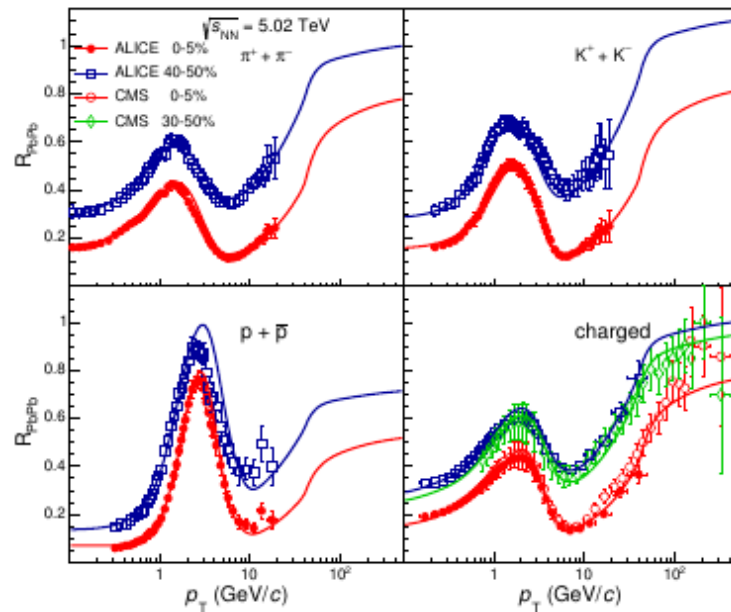


Рис.11. Фактор ядерной модификации ( $R_{AB}$ ) для разных частиц, образующихся в Pb-Pb столкновениях при 5.02 TeV в сравнении с результатами Термальной модели.

### Выводы для раздела III.

- В группе ALICE ОИЯИ предложена трёх компонентная феноменологическая модель (BWTP) для описания спектров поперечного импульса различных адронов измеренных в p-p, p-A и A-A столкновениях на LHC. Анализированы данные по спектрам тринадцати частиц (от пионов до чармониев), рожденных в p-p и Pb-Pb, для разных энергий и центральности столкновений. Модель хорошо описывает все эти экспериментальные данные, а также данные по ядерной модификации спектров. Описание модели и результаты работы опубликованы в [9].

## Раздел IV. Поддержание и развитие системы ALICE-GRID в ОИЯИ

В период 2020-2022 гг продолжалось поддержание и развитие системы ALICE-GRID ОИЯИ 2-го уровня (tier 2). В Таблице 1 приведены Параметры компьютерных GRID-ALICE центров 2-го уровня в 8-ми российских институтах в 2020-2022 гг (NRC KI, Курчатовский институт с 2022 г имеет центр только 1-го уровня). Из Табл. 1 видно, что ОИЯИ занимает лидирующую позицию (~ 40 %) по мощности ресурсов. Общий вклад российских центров в ALICE-GRID составляет ~ 4 % .

**Публикации (выделенными номерами обозначены работы, выполненные при активном участии сотрудников группы ОИЯИ-ALICE за 2020-2022 гг).**

- [1] R.Lednický and V.L. Lyuboshitz, Sov. J. Nucl. Phys. 35 (1982) 770;  
R.Lednický, Phys. of Part. and Nucl. Lett. Vol 8, (2011) 965.
- [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] 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).
- [4] “Kaon femtoscopy in Pb–Pb collisions at  $(s_{NN})^{0.5} = 2.76$  TeV”, S. Acharya et al., [ALICE Collaboration], Phys.Rev.C96 (2017) 064613.
- [5] V.M. Shapoval et al., Eur.Phys.J. A56 (2020) 260.
- [6] **C. F. Weizsacker, Z. Phys. 88, 612 (1934); E.J. Williams, Phys. Rev. 45, 729 (1934).**
- [7] “Coherent  $\rho^0$  photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $(s_{NN})^{1/2} = 5.02$  TeV”, ALICE Collaboration (S.Acharya et al), JHEP 06, (2020) 035.
- [8] S. Grigoryan, “Using the Tsallis distribution for hadron spectra in pp collisions: Pions and quarkonia at  $\sqrt{s} = 5 - 13000$  GeV..”, Phys.Rev. D95 (2017) 056021.
- [9] S.Grigoryan “ A three component model for hadron pT-spectra in pp and Pb-Pb collisions at the LHC ”, Eur. Phys. J. A57 (2021) 12.
- [10] “ $\Lambda$ K femtoscopy in Pb-Pb collisions at  $(s_{NN})^{1/2} = 2.76$  TeV”, ALICE Collaboration (S.Acharya et al), arXiv:2005.11124, 2020.
- [11] “ Investigation of K+K- interactions via femtoscopy in Pb-Pb collisions at  $(s_{NN})^{0.5} = 2.76$  TeV at the LHC.”, ALICE Collaboration, arXiv : 2211.15194, 2022 (accepted in Phys. Rev. C).
- [12] E.Rogochaya (JINR), B.Batyunya (JINR), L.Malinina (SINP MSU, JINR), K.Mikhaylov (ITEP, JINR), G.Romanenko (SINP MSU, JINR), K. Verner (Subatech, France), “Identical pion and kaon femtoscopy in EPOS3 with and without the hadronic afterburner UrQMD”, Journal of Physics Conference Series 1690 (2020) 012102.
- [13] “Kaon-proton strong interaction at low relative momentum via femtoscopy in Pb-Pb collisions at the LHC, ALICE Collaboration (S.Acharya et al), Phys. Lett. B 822(2021) 136708.
- [14] “First measurement of coherent  $\rho^0$  photoproduction in ultra-peripheral Xe-Xe collisions at  $(s_{NN})^{1/2} = 5.44$  TeV”, ALICE Collaboration (S.Acharya et al), Phys. Lett. B 820 (2021) 136481.

**Доклады на конференциях сотрудников группы ОИЯИ-ALICE в период 2020-2022 гг.**

1. K.Mikhaylov (on behalf of the ALICE Collaboration), “Non-identical charged kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at  $(s_{NN})^{0.5} = 2.76$  TeV ”, 5<sup>th</sup> International Conference on Particle physics and Astrophysics (ICPPA-2020), October 7, 2020, MEPhI, Moscow.
2. 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”, 5<sup>th</sup> International Conference on Particle physics and Astrophysics (ICPPA-2020), October 7, 2020, MEPhI, Moscow.
3. E.Rogochaya (JINR), B.Batyunya (JINR), L.Malinina (SINP MSU, JINR), K.Mikhaylov (ITEP, JINR), G.Romanenko (SINP MSU, JINR), K. Verner (Subatech, France), “Pion and kaon femtoscopy in Pb-Pb collisions at 2.76 TeV in comparison with EPOS 3 model prediction”, 5<sup>th</sup> International Conference on Particle physics and Astrophysics (ICPPA-2020), October 9, 2020, MEPhI, Moscow.
4. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “ Recent ALICE results on photon-induced J/ψ production”, 10<sup>th</sup> International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions , University of Texas, Austin, USA, (31 May – 5 June) 2020.

5. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “ Vector meson photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at the LHC with ALICE”. 40<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2020), 28.7-6.8, Prague, Czech Republic.
6. E.Rogochaya (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “Determination of the strong interaction for hyperon-nucleon pairs with ALICE” The 55<sup>th</sup> Rencontres de Moriond “QCD & High Energy Interactions” 27.03-3.04, 2021.
7. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “ Recent results on ultra-peripheral collision studies with ALICE at the LHC ”, 20<sup>th</sup> Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, MSU, 19-25.08, 2021.
8. V.Pozdnyakov (JINR, on behalf of the ALICE Collaboration), “ Coherent photoproduction of  $\rho^0$  vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb and Xe-Xe collisions with ALICE”. XXVIII International Workshop on Deep- Inelastic Scattering and Related Subjects. Stony Brook University, 12-14.04. 2021.

#### **Активность по другим видам научной деятельности.**

- Выборы в 2020-2022 гг Л. Малининой и Е. Рогочей конвинерами ALICE в группе исследований по фемтоскопии.
- Участие Л. Малининой (руководитель), К. Михайлова (руководитель), Е. Рогочей во внутренних ревизионных комитетах по различным публикациям ALICE.
- Участие группы ОИЯИ во внутренних институтских ревизионных комитетах по различным публикациям ALICE.
- Участие в дежурных сменах ALICE (81 смена по контролю за детекторами установки в 2022 году).

#### **Раздел V. Модернизация электромагнитного калориметра PHOS**

Электромагнитный калориметр PHOS детектора ALICE на коллайдере LHC в CERN

предназначен для регистрации фотонов в широком динамическом диапазоне энергии от десятков МэВ до сотен ГэВ. PHOS состоит из 12 тысяч ячеек. Каждая ячейка представляет собой прямоугольный параллелепипед вольфрамата свинца  $PWO_4$  размером  $180 \times 22 \times 22$  мм<sup>3</sup>. На торце  $22 \times 22$  мм<sup>2</sup> расположены фотоприемник - лавинный фотодиод (APD) размером  $5 \times 5$  мм<sup>2</sup> и зарядочувствительный предусилитель (Рис.12). Этот фотоприемник обеспечивает измерение с хорошей линейностью энергии электромагнитного ливня до 160 ГэВ с разрешением при 1 ГэВ около  $\sigma_E = 3\%$  и временным разрешением  $\sigma_t = 3$  нс. Кристаллы и фотоприемники находятся при температуре  $-26^\circ\text{C}$ , при которой световыход кристаллов  $PWO_4$  увеличивается в три раза по сравнению с комнатной температурой, а шумы фотодетекторов и предусилителя уменьшаются. Коллаборация PHOS проводит R&D по замене фотодетектора с целью получить временное разрешение 100-150 пс и улучшить энергетическое разрешение для низких энергий. Наиболее подходящими фотодетекторами являются кремниевые фотоумножители SiPM, основными кандидатами из которых являются MPPC Hamamatsu S14160-6015PS (много-пиксельный фотонный счетчик, Рис.13). Некоторые проблемы возникают из-за большого динамического диапазона измерения энергии. Поскольку кремниевые фотоумножители нелинейны, то при самых высоких энергиях происходит насыщение. Кроме того, если одним детектором пытаться работать во всем диапазоне энергий, то амплитуда при низких энергиях будет слишком мала для получения хорошего разрешения.

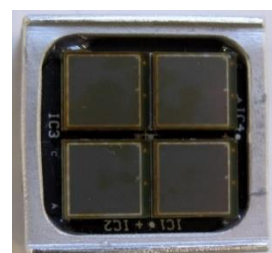


Рис.12. Фотодетекторы и кристалл  $\text{PWO}_4$  с лавинным фотодиодом.

Рис.13. МРРС S14160-6015PS

В результате проведённых сеансов в 2021-22 гг на тестовом пучке ускорителя PS в ЦЕРН было предложено использовать комбинацию трёх SiPM размером  $6 \times 6 \text{ мм}^2$  и одного SiPM размером  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Кристаллы и фотодетекторы охлаждались до температуры  $-26.5^\circ\text{C}$  с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Измерения проводились с помощью VME системы сбора данных с использованием CAEN электроники: ADC V785, QDC V792, TDC V1290 и автономного 5 ГГц диджитайзера CAEN DT5742B. Усилители перед входом диджитайзера не использовались. Были получены хорошие энергетическое (до 2%, Рис.14) и временное (до 0.14 нс, Рис.15) разрешения фотодетекторов.

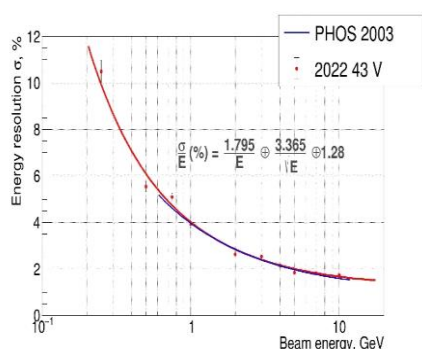


Рис.14. Энергетическое разрешение фотодетекторов SiPM.

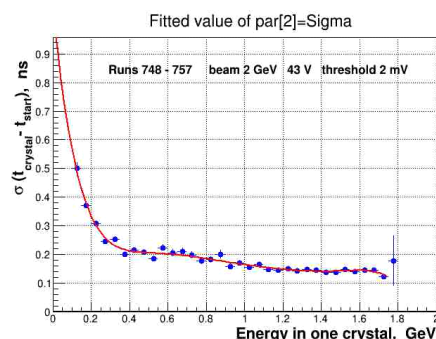


Рис.15. Временное разрешение Фотодетекторов SiPM.

### 2.3. Результаты сопутствующей деятельности

**2022 – поощрительная премия по научно-исследовательским работам.**

### 3. Международное научно-техническое сотрудничество

Фактически участвующие страны, институты и организации.

| Организация | Страна    | Город  | Участники          | Тип соглашения  |
|-------------|-----------|--------|--------------------|---|
| CERN        | Швейцария | Женева | Коллаборация ALICE | Memorandum of Understanding for the Collabortation on the Construction of ALICE Detector, ALICE RRB-D 00-41 |
| CERN        | Швейцария | Женева | Коллаборация ALICE | Memorandum of Understanding for the Maintenance   |

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  | and Operation of the ALICE Detector, CERN-RRB-2002-034 |
|  |  |  |  |  |

**4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных**  
**4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета)**

| №№<br>п/п | Категория<br>работника | Основной<br>персонал<br>сумма FTE | Ассоциированный<br>персонал<br>сумма FTE |
|-----------|------------------------|-----------------------------------|--|
| 1.        | научные работники      | 10,0                              |  |
| 2.        | инженеры               | 5,0                               |  |
| 3.        | специалисты            |                                   |  |
|           | <b>Итого:</b>          | <b>15,0</b>                       |  |

**4.2. Фактическая сметная стоимость темы / КИП**

| №№<br>п/п     | Наименование работ   | Полная<br>стоимость | Расходы за год,<br>предшествующий<br>отчетному<br>(тыс. долл. США) |
|---------------|--|---------------------|--|
| 1.            | Международное сотрудничество (МНТС)  | <b>324,9</b>        | <b>105.9</b>   |
| 2.            | Материалы  | <b>365.0</b>        | <b>113.0</b>   |
| 3.            | Оборудование и услуги сторонних организаций  | <b>55.0</b>         | <b>3.3</b>   |
| 4.            | Пуско-наладочные работы  |                     |  |
| 5.            | Услуги научно-исследовательских организаций  | <b>15.4</b>         | -  |
| 6.            | Приобретение программного обеспечения  | <b>5.0</b>          | -  |
| 7.            | Проектирование/строительство   |                     |  |
| 8.            | Сервисные расходы<br><i>(планируются в случае прямой принадлежности к проекту)</i> |                     |  |
| <b>ВСЕГО:</b> |  | <b>765.3</b>        | <b>222.2</b>   |

**4.3. Другие ресурсы**

**5. Заключение**

**6. Предлагаемые рецензенты**

