

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Нигматкулов Григорий Александрович

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФЕМТОСКОПИЯ КАОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
SELEX

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук



Автор

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: Доцент отделения ядерной физики и технологий  
офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
**Булеков Олег Владимирович**

Научный консультант: Главный научный сотрудник кафедры  
физики элементарных частиц НИЯУ МИФИ,  
доктор физико-математических наук  
**Гуров Юрий Борисович**

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических  
наук, профессор  
**Лохтин Игорь Петрович**

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории сильных взаимодействий  
НИИЯФ МГУ

Доктор физико-математических  
наук, старший научный  
сотрудник  
**Батюня Борис Владимирович**

Начальник сектора лаборатории  
физики высоких энергий им. В.И.Векслера  
и А.М.Балдина ОИЯИ

Кандидат физико-математических  
наук  
**Михайлов Константин  
Русланович**

Старший научный сотрудник  
лаборатории релятивистской ядерной  
физики НИЦ «Курчатовский институт» -  
ИТЭФ

Защита состоится «15» апреля 2020 г. в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «    »                      2020 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета МИФИ.01.01,  
д.ф.-м.н., профессор



С.Е. Улин

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Одной из центральных проблем физики частиц является получение характеристик их множественного рождения таких как, механизмы образования, спектры, состав, координаты, время испускания, и другие. Начало исследования процессов многочастичного рождения было положено при изучении космических лучей. С появлением ускорителей стало возможным детальное исследование взаимодействия частиц и/или ядер в широком диапазоне энергий (от сотен МэВ до десятков ТэВ) при контролируемых условиях и высокой статистике. Экспериментально множественное рождение частиц, как правило, изучается в рамках инклюзивного подхода, когда измеряются характеристики (спектры и угловые распределения) одной или нескольких образовавшихся в результате взаимодействия частиц. Полученные экспериментальные распределения сравниваются с теоретическими предсказаниями.

В 1970-х годах Г.И. Копылов и М.И. Подгорецкий показали возможность использования импульсных (квантово-статистических) корреляций для изучения пространственно-временных характеристик процессов образования частиц в столкновениях частиц и/или ядер [В1]. В частности, ими было предложено изучать эффект интерференции при помощи корреляционной функции, а также использовать метод перемешивания событий для построения опорных распределений, не содержащих квантово-статистических корреляций. Обычно исследование импульсных корреляций применяется для тождественных частиц. В середине 90-х годов Р. Ледницки и В.Л. Любошиц предложили использовать тот же метод для изучения пространственно-временных параметров испускания нетождественных частиц [В2]. В дальнейшем, метод измерения квантово-статистических корреляций получил название *корреляционная фемтоскопия*. Последующие теоретические работы в совокупности с экспериментальными измерениями превратили корреляционную фемтоскопию в прецизионный инструмент [В3] для исследования пространственно-временных характеристик области рождения частиц и их взаимодействия в конечном состоянии (электромагнитного и сильного).

Изучение пространственно-временных параметров области испускания при помощи квантово-статистических корреляций частиц ведется практически во всех ускорительных экспериментах. Измерения проводятся в лептонных, лептон-адронных, адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновениях.

Наиболее распространенным является анализ двухпионных корреляций. Фемтоскопия других сортов частиц, таких как каоны, несет дополнительную информацию о пространственно-временных характеристиках области испускания. Доля каонов, образованных в результате распада резонансов, значительно меньше, чем пионов. Поэтому каоны несут более точную информацию об источнике испускания. Первые результаты по каонной фемтоскопии были получены в

экспериментах AFS на ISR и NA44 на SPS в CERN, но обладали малой статистической обеспеченностью ( $\sim 10^3$  пар частиц). Систематическое изучение пространственно-временных параметров области испускания с высокой статистической обеспеченностью впервые стало доступно только при максимальной энергии на RHIC в BNL, а также LHC в CERN. В случае «малых» систем, образующихся в столкновениях протонов или в адрон-ядерных столкновениях, корреляции каонов изучались в эксперименте ALICE на LHC в  $p+p$  и  $p+Pb$  столкновениях при энергиях  $\sqrt{s}=7$  ТэВ и  $\sqrt{s_{NN}}=5.02$  ТэВ, соответственно.

Данная работа посвящена измерению параметров области испускания заряженных каонов в адрон-ядерных столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} \approx 34$  ГэВ с высокой статистической обеспеченностью.

В рамках одной методики и трех типов пучков ( $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$  и  $p$ ) представляется актуальным получение новых данных по корреляциям каонов, образующихся в малых системах, что необходимо для проверки различных механизмов образования частиц.

### Цель работы

Экспериментальное определение пространственно-временных параметров области испускания заряженных каонов при множественном рождении частиц в  $\Sigma^-A$ -,  $\pi^-A$ - и  $pA$ -столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} \approx 34$  ГэВ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка метода отбора пар заряженных каонов в эксперименте SELEX;
- разработка метода коррекции двухчастичных эффектов «слияния» и «расщепления» треков в эксперименте SELEX;
- определение фемтоскопических параметров (размера области испускания  $R$  и силы корреляций  $\lambda$ ) заряженных каонов, образованных в реакциях:

$$\Sigma^- + C(Cu) \rightarrow K^\pm K^\pm + X, \quad (1)$$

$$\pi^- + C(Cu) \rightarrow K^\pm K^\pm + X, \quad (2)$$

$$p + C(Cu) \rightarrow K^\pm K^\pm + X, \quad (3)$$

при начальных энергиях  $\Sigma^-$ - и  $\pi^-$ -пучков 600 ГэВ и начальной энергии протонного пучка 540 ГэВ.

### Научная новизна

1. Впервые показано, что фемтоскопические размеры области испускания заряженных каонов, образованных в  $\Sigma^-A$ -,  $\pi^-A$ - и  $pA$ -столкновениях, уменьшаются с ростом поперечных импульсов пар  $k_T$ .
2. Для экспериментов на фиксированной мишени разработаны методы подавления двухчастичных эффектов «слияния» и «расщепления» треков, позволяющие устранить искажения корреляционных функций в области малых относительных четырехимпульсов.

## Практическая значимость

Полученные значения параметров области испускания заряженных каонов могут быть использованы для совершенствования современных теоретических моделей множественного рождения частиц [B4] и тестирования Монте-Карло генераторов взаимодействий.

Разработанные методы отбора и идентификации заряженных каонов, а также учета вклада двухчастичных эффектов («слияния» и «расщепления» треков) могут быть использованы в будущих экспериментах по исследованию свойств кварк-глюонной материи в экспериментах на фиксированной мишени BM@N и CBM на будущих мега-сайенс установках NICA (ОИЯИ) и FAIR (GSI), во второй фазе программы сканирования по энергии эксперимента STAR на RHIC, а также в планирующемся эксперименте COMPASS++/AMBER на SPS, нацеленном на исследование структурных функций каонов.

## Достоверность

Достоверность экспериментальных результатов обусловлена рекордной статистической обеспеченностью ( $\approx 4.8 \times 10^6$  пар каонов) на гиперонном пучке. Полученные параметры (размер области испускания  $R$  и сила корреляций  $\lambda$ ), измеренные тремя методами построения корреляционной функции (перемешивание событий, использование нетождественных пар, вращение импульса одной частиц из пары в поперечной плоскости) для трех типов пучков ( $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$ ,  $p$ ), совпадают в пределах погрешностей. Полученные результаты согласуются с данными эксперимента ALICE в CERN, полученными в  $p$ +Pb-столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ.

## Личный вклад

Автором предложены, разработаны и реализованы: а) метод отбора и идентификации заряженных каонов, обеспечившего высокую эффективность идентификации пар заряженных каонов (более 95 %); б) метод учета влияния эффектов «слияния» и «расщепления» треков в детекторных подсистемах эксперимента SELEX. Автор внес определяющий вклад в обработку и анализ экспериментальных данных. Им получены оценки размеров области испускания и коэффициентов силы корреляций пар заряженных каонов для трех реакций, идущих под действием  $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$  и  $p$  пучков, а также для трех интервалов поперечных импульсов пар каонов  $k_T$ . Автором подготовлены и опубликованы статьи и доклады по теме диссертации.

## Положения и результаты, выносимые на защиту

- Метод отбора и идентификации каонов, обеспечивающий высокую эффективность идентификации каонных пар ( $\geq 95\%$ ) в эксперименте SELEX.
- Метод учета эффектов «слияния» и «расщепления» треков частиц с малыми относительными импульсами для экспериментов на фиксированной мишени.

- Зависимости фемтоскопических параметров (размера области испускания и силы корреляций) заряженных каонов от поперечного импульса  $k_T$  в реакциях, идущих под действием  $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$  и  $p$ -пучков с углеродной и медной мишенями при  $\sqrt{s_{NN}} \approx 34$  ГэВ.

### **Апробация работы**

Результаты исследований, положенные в основу диссертационной работы, были доложены на российских и международных конференциях: Международный симпозиум по многочастичной динамике (ISMD 2013, США), Рабочее совещание по корреляциям и флуктуациям (WPCF 2013, Италия), СЯФ ОФН РАН (2014, Россия), Международная конференция «Ядро» (2010, 2013, 2014, Россия), Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц (2012, 2015, Россия), НС НИЯУ МИФИ (2009–2013, 2015), Международная конференция «XXIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems «Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics» (2016, Россия), а также на научных семинарах ФГБУ «НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ (Россия) и университета штата Огайо (OSU, США).

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 6 статей в научных изданиях, из них 5 входят в базы данных Web of Science или Scopus.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации: 114 страниц, 43 рисунка, 3 таблицы и 173 наименования цитируемой литературы.

### **Основное содержание диссертации**

Во введении обосновывается новизна и актуальность научной проблемы, исследованию которой посвящена работа. Представлена цель и задачи, решаемые в работе, а также основные положения выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основы метода корреляционной фемтоскопии. Вводятся понятия квантово-статистических корреляций и электромагнитного взаимодействия в конечном состоянии. Для исследования пространственно-временных параметров области испускания измеряется корреляционная функция  $C(Q)=A(Q)/B(Q)$ , где  $A(Q)$  – распределение относительных импульсов  $Q$  пар частиц из одного события, содержащее квантово-статистические корреляции и взаимодействие в конечном состоянии.  $B(Q)$  – опорное распределение, в котором квантово-статистические корреляции и взаимодействие в конечном состоянии отсутствуют. В работе для построения опорного распределения используются три метода: а) перемешивание событий, когда пары составляются из

частиц из разных событий, б) «вращение» частиц, когда импульс одной частицы из пары поворачивается в поперечной плоскости, в) нетождественных частиц, когда в качестве опорного распределения используются пары противоположно заряженных частиц. В силу ограниченной статистики для  $\pi^-$ - и  $p$ -пучков исследование выполнялось для инвариантного относительного четырехимпульса  $Q \equiv q_{inv} = \sqrt{(\vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2 - (E_1 - E_2)^2}$ , где  $E_1$ ,  $\vec{p}_1$  и  $E_2$ ,  $\vec{p}_2$  – энергии и трехимпульсы первой и второй частицы из пары соответственно. Для измерения фемтоскопических параметров (размера области испускания  $R$  и силы корреляций  $\lambda$ ) выполнялся фит корреляционной функции уравнением Боулера-Синюкова [B5, B6]:

$$C(q_{inv}) = N \left( 1 - \lambda + \lambda K_{Coul}(q_{inv})(1 + e^{-q_{inv}^2 R^2}) \right), \quad (4)$$

где  $N$  – коэффициент нормировки,  $K_{Coul}(q_{inv})$  – двухчастичная корреляционная функция, описывающая кулоновское отталкивание, интегрированная по сферическому источнику испускания.

Приведен обзор мировых данных по корреляционной фемтоскопии тождественных пионов и каонов [B3]. В столкновениях релятивистских тяжелых ядер образующаяся система находится в условиях высокой барионной плотности и/или температуры и формирует состояние, в котором адронная материя переходит в состояние со «свободными» кварками и глюонами – кварк-глюонная материя (КГМ). Далее система быстро расширяется, остывает и переходит в адронную материю. Для описания столкновений релятивистских тяжелых ионов широкое распространение получила релятивистская гидродинамика. Одной из особенностей гидродинамического поведения системы является возникновение так называемых «областей однородности» [B7] – областей фазового пространства, в которых образующиеся частицы вылетают в определенных направлениях и с близкими скоростями. Измеряемые фемтоскопические параметры (размер  $R$  и сила корреляций  $\lambda$ ) области испускания соответствуют не всему размеру источника генерации, а размерам областей однородности, которые меньше полного размера источника. Коллективные потоки в ядро-ядерных столкновениях приводят к характерному уменьшению измеряемых размеров области генерации с ростом поперечного импульса пары частиц ( $k_T = |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|_T/2$ -зависимости). Исследование  $k_T$ -зависимости размера области испускания позволяет исследовать динамику процессов рождения частиц.

Первое сравнение параметров области испускания тождественных пионов, образованных в Au+Au и  $p + p$  столкновениях, было проведено в эксперименте STAR [B8]. Полученные размеры области испускания тождественных пионов, образованных в  $p + p$  столкновениях, обладают схожей динамикой, что и в Au+Au. Таким образом, важной задачей является измерение  $k_T$ -зависимости размера области испускания от типа сталкивающихся пучков, поскольку дает возможность проверки различных моделей множественного рождения.

Наиболее часто исследуются фемтоскопические корреляции тождественных

пионов. Однако, в пионные измерения существенный вклад вносят распады резонансов. Поэтому, с увеличением экспериментальной статистики интересными представляются исследования более тяжелых частиц.

В эксперименте ALICE были измерены  $k_T$ -зависимости фемтоскопических корреляций заряженных каонов в  $p + p$  столкновениях при энергии  $\sqrt{s} = 7$  ТэВ и  $p + \text{Pb}$  [B9] столкновениях при энергии  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  ТэВ. Измеренные радиусы области испускания каонов в столкновениях  $p + \text{Pb}$  уменьшаются с 1.3 фм до 1.2 фм с ростом  $k_T$  с 0.2 до 0.8 ГэВ/с. Полученные радиусы области испускания каонов в  $p + p$  и  $p + \text{Pb}$  согласуются в пределах погрешностей. Это свидетельствует о схожей динамике процессов многочастичного рождения при высоких энергиях  $p + p$  и  $p + \text{A}$  столкновений.

Во второй главе приведено описание установки SELEX на ускорителе Tevatron (FNAL) [B10]. Установка SELEX (SEgmented Large  $X_F$  baryon spectrometer) – трехсекционный магнитный спектрометр, предназначенный для исследования очарованных частиц и резонансов (рис. 1).

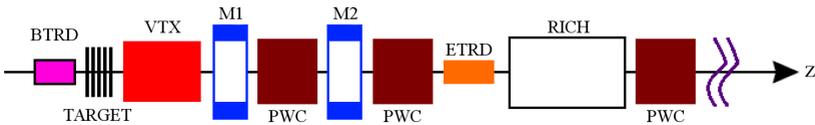


Рис. 1. Схематический вид установки SELEX.

Пучки  $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$  с энергиями  $600 \pm 50$  ГэВ и  $p$  с энергией  $540 \pm 50$  ГэВ направлялись на неподвижную композитную мишень установки SELEX. Пучковые частицы метились при помощи десяти модулей пучкового детектора переходного излучения (BTRD).

Для измерения координат и направления движения пучковой частицы использовались восемь стриповых кремниевых детекторов (SSD) с расстоянием между стрипами 20 мкм. Взаимодействие пучковой частицы происходило в одной из пяти экспериментальных мишеней (две медных и три углеродных), разделенных расстоянием 1.5 см. Полная толщина мишени составляет 4.3 % длины взаимодействия протона.

Вторичные частицы летели вдоль направления пучка и регистрировались детекторами, расположенными на длине 60 м (рис. 1). Координаты частиц определялись по информации, снимаемой с пропорциональных проволочных камер (PWC) и кремниевых детекторов (SD), находившихся до и после магнитов. Импульс частиц определялся по их отклонению в магнитном поле.

После композитной мишени располагался вершинный детектор, состоящий из набора кремниевых детекторов. Система кремниевых детекторов состояла из 20 односторонних стриповых детекторов, сгруппированных по 4 плоскости.

Пространственное разрешение вершинного детектора составляло 6.5 мкм, а отдельной плоскости  $\approx 23$  мкм. Эффективность регистрации вершинного детектора превышала 98 % [B10].

Основным источником данных для идентификации частиц являлся кольцевой детектор черенковского излучения (RICH), расположенный на расстоянии 16 м от последней мишени. На рис. 2 показаны зависимости радиусов колец, измеренных в RICH-детекторе, от импульса частицы.

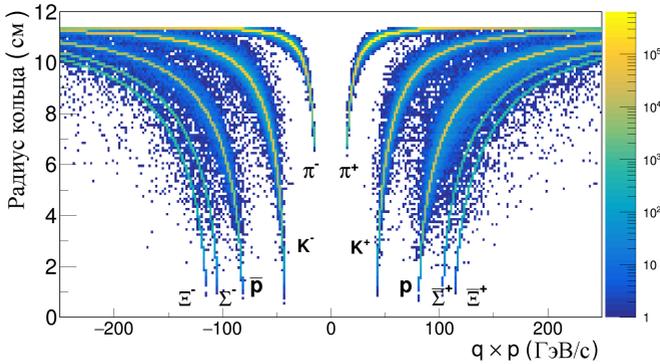


Рис. 2. Измеренная зависимость радиуса колец в RICH-детекторе от импульса частицы.

В третьей главе приведены результаты разработанной методики по отбору и идентификации каонных пар, а также влиянию на них двухчастичных эффектов «слияния» и «расщепления» треков [A1–A6].

Отбирались события, в которых восстановленная точка взаимодействия пучковой частицы находилась внутри любой из пяти мишеней. В работе использовались треки, имеющие сигналы в вершинном микростриповом детекторе, а также в пропорциональных камерах спектрометров M1 и M2. Для исключения треков от распадов долгоживущих частиц расстояние сближения трека с первичной вершиной в поперечной плоскости (X–Y) не превышало 20 мкм.

Неправильная идентификация частиц может привести к искажению измеряемых корреляционных функций и фемтоскопических параметров источника испускания заряженных каонов. Поэтому, была разработана и реализована методика, направленная на отбор каонов с высокой эффективностью (более 95 %). Каоны идентифицировались в RICH-детекторе с импульсами в диапазоне от 45 до 160 ГэВ/с. При обработке данных требовалось, чтобы вероятность каонной гипотезы превышала любую другую более чем в 3 раза. Основным источником фона при идентификации каонов являлись пионы [A1, A5, A6]. На рисунке 3 представлены распределения радиусов черенковских колец для импульсных интервалов 110–120 ГэВ/с (рис. 3а), 150–160 (рис. 3б). Для оценки эффективности

идентификации каонов распределения фитировались двумя функциями Гаусса. Вычислялась доля пионов, попадающая в  $\pm 3\sigma$  каонного пика.

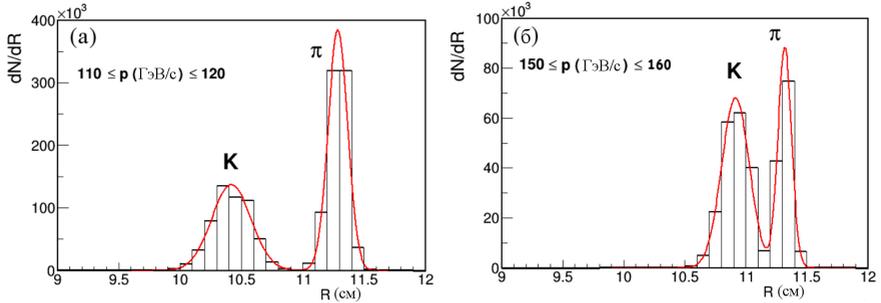


Рис. 3. Распределения радиусов колец в RICH-детекторе для заданных интервалов импульсов.

Эффективность идентификации каонов оценивалась по формуле:

$$\epsilon(K) = \frac{N_{kaons}^{\pm 3\sigma(K)}}{N_{kaons}^{\pm 3\sigma(K)} + N_{pions}^{\pm 3\sigma(K)}}, \quad (5)$$

где  $N_{kaons}^{\pm 3\sigma(K)}$  и  $N_{pions}^{\pm 3\sigma(K)}$  соответствует количеству каонов и пионов, попавших в  $\pm 3\sigma$  каонной гипотезы.

На рис. 4а) представлена зависимость эффективности идентификации каонов, образованных в  $\Sigma^-$  А-,  $\pi^-$  А- и  $p$ А-столкновениях, от их импульсов. Видно, что в диапазоне импульсов от 45 до 120 ГэВ/с эффективность идентификации одиночных каонов близка к 100 %. Уменьшение эффективности идентификации при больших импульсах связана с близостью величин радиусов черенковских колец для пионов и каонов в RICH-детекторе.

На рис. 4 б) показана полученная зависимость эффективности идентификации пар заряженных каонов  $\epsilon(KK)$  от суммарного поперечного импульса. Величина вычислялась как произведение одночастичных эффективностей идентификации треков.

Выбранные критерии отбора обеспечивали высокую эффективность идентификации пар заряженных каонов на  $\Sigma^-$  и  $\pi^-$  пучках более 98 %, а на протонном пучке более 95 % [A1].

В работе предложен и реализован новый метод учета влияния на корреляционную функцию двухчастичных эффектов «расщепления», когда один трек восстанавливается как два, и «слияния» треков, когда два трека восстанавливаются как один [A1, A3].

Уровень «расщепления» треков (SL) оценивался как  $SL = \frac{\sum_i S_i}{Nhits_1 + NHits_2}$ , где  $S_i = +1$ , когда один трек из пары имеет кластер ионизации (хит) в данной

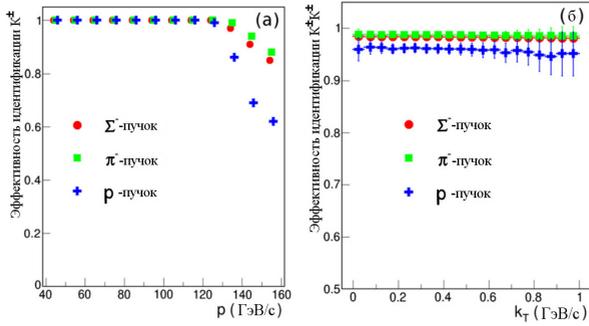


Рис. 4. Эффективность идентификации а) одиночных и б) пар заряженных каонов.

плоскости микрострипового детектора,  $S_i = -1$ , если оба трека дают хиты в детектирующей плоскости, и  $S_i = 0$ , если ни один из треков не имеет хитов в плоскости детектора. После вычисления суммы по 20 плоскостям величина  $S_i$  делилась на сумму количества хитов первого и второго треков. Полученный уровень расщепления может принимать значения в диапазоне от  $SL = -0.5$ , когда оба трека имеют срабатывания в одних и тех же микростриповых плоскостях, до  $SL = 1$ , когда только один трек из пары имеет хит в данной плоскости. В работе требовалось, чтобы уровень расщепления был меньше 0.6. Ввиду высокой эффективности регистрации микрострипового детектора влияние эффекта «расщепления» треков мало.

Эффект «слияния» треков оценивался из анализа траекторий движения пар частиц и среднего расстояния между ними в каждой станции вершинного детектора. Среднее расстояние рассчитывалось по формуле:  $AveSep = \frac{\sum_{k=1}^{20} dist_k}{20}$ , где  $dist_k$  - расстояние между координатами треков в  $k$ -ой микростриповой плоскости вершинного детектора. Зависимости корреляционных функций от среднего расстояния между треками представлены на рис. 5 а).

Показано, что корреляционная функция каонов в области  $q_{inv} < 0.1$  ГэВ/с возрастает с изменением  $AveSep$  от 0 до 110 мкм. При  $AveSep$  более 70 мкм, соответствующего трем пространственным разрешениям одного стрипа, это изменение становится малым. Рис. 5 б) для  $\Sigma^-$  А-столкновений показано отношение корреляционных функций с ограничением ( $AveSep > 70$  мкм) и без ограничений на среднее расстояние между треками. Видно, что величина эффекта «слияния» треков при  $q_{inv} < 0.1$  ГэВ/с достигает 35 %, что указывает на необходимость коррекции измеряемых корреляций.

В четвертой главе приведены результаты обработки и анализа фемтоскопических корреляций. Представлен метод учета нефемтоскопических корреляций, процедура извлечения фемтоскопических параметров и влияние выбора опор-

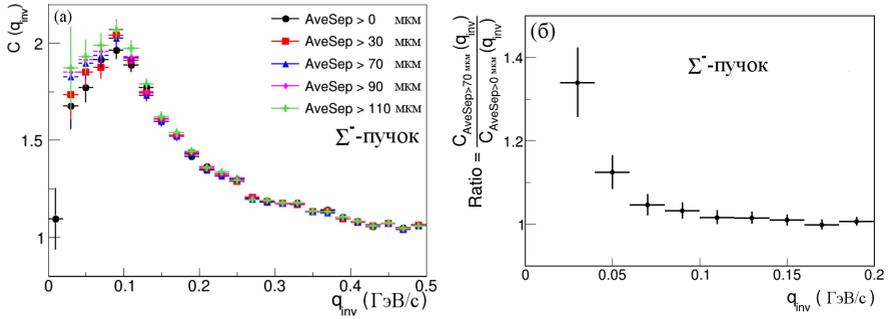


Рис. 5. (а) Зависимость корреляционной функции заряженных каонов от ограничения на среднее расстояние между треками. (б) Отношение корреляционной функции с ограничением на среднее расстояние между треками более 70 мкм, к корреляционной функции, без ограничения на среднее расстояния между треками каонов.

ного распределения на них. Дается описание трех независимых методов построения опорного распределения. Выполнены измерения зависимости фемтоскопических параметров от поперечных импульсов пар заряженных каонов [A1].

Сложность при измерении квантово-статистических корреляций в малых системах представляет учет нефемтоскопических корреляций, возникающих из-за законов сохранения энергии-импульса, распадов резонансов и фрагментации струй. Для их учета рассчитывались взаимодействия гиперонного, пионного, протонного пучков в Монте-Карло генераторе RYTHIA-6.4.28 [B11] с настройкой Perugia 2011 [B12]. На рис. 6 а–в) представлены сравнения корреляционных функций пар заряженных каонов с  $0.30 \leq k_T$  (ГэВ/с)  $\leq 0.55$ , измеренных в SELEX для  $\Sigma^-$ -А-,  $\pi^-$ -А- и  $p$ А-столкновений, и моделированных событий.

Наблюдается удовлетворительное согласие между экспериментом и моделированием в области больших относительных четырехимпульсов. Для оценки систематической погрешности вносимой генератором использовались различные настройки Perugia: 0, 2010, Tevatron.

В работе использовались три метода построения опорного распределения: перемешивание событий, вращение одной частицы из пары в поперечной плоскости и распределения для пар нетождественных частиц. При методе перемешивания в качестве опорного распределения строились пары из разных событий. В работе перемешивались только те события, в которых пучковая частица сталкивалась с одной и той же мишенью. Опорное распределение относительных четырехимпульсов  $q_{inv}$  получалось путем перемешивания частиц, образованных в одном столкновении, с частицами, рожденными в десяти событиях. В методе «вращения» частиц импульс одной частицы из пары поворачивается в поперечной плоскости путем замены  $x$  и  $y$  компонент импульса на противо-

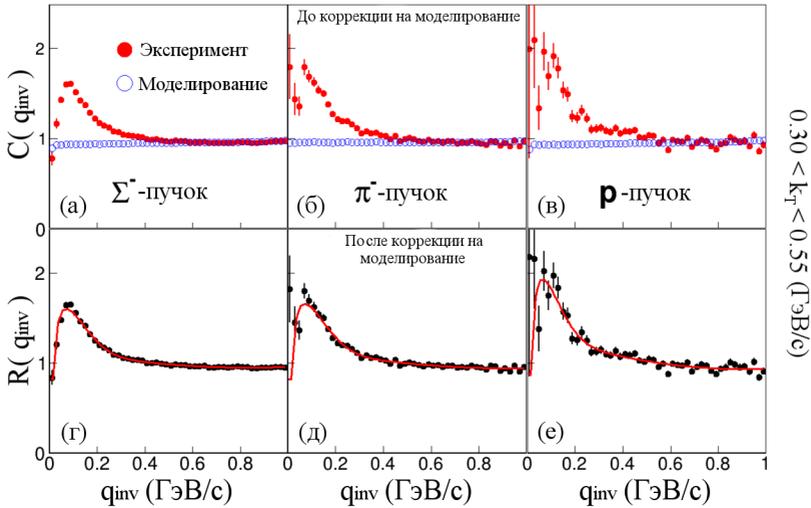


Рис. 6. (а–в) Сравнение корреляционных функций  $C(q_{inv})$  заряженных каонов для поперечных импульсов пар  $0.30 \leq k_T$  (ГэВ/с)  $\leq 0.55$ , измеренных в эксперименте SELEX, и при моделировании методом перемешивания. (г–е) Отношение корреляционных функций заряженных каонов, измеренных в эксперименте, к моделированным (двойное отношение). Сплошной линией показан фит двойного отношения.

положные, т.е.  $(px, py, pz) \rightarrow (-px, -py, pz)$ . Процедура исключает квантово-статистические корреляции. В случае применения метода противоположно заряженных частиц, корреляционная функция строится как отношение распределений относительных четырехимпульсов пар тождественных частиц к относительному четырехимпульсу, полученному для пар нетождественных частиц. Основным недостатком такого подхода является наличие в спектре нетождественных частиц резонансов. В случае нетождественных каонов основной вклад будет вноситься распадами  $\phi(1020) \rightarrow K^+ + K^-$ . Значения  $R$  и  $\lambda$ , полученные тремя методами, использовались для оценки систематических погрешностей, связанных с выбором опорного распределения [A1, A2, A4].

На рис. 6 г), 6 д) и 6 е) представлены корреляционные функции пар каонов, полученные для  $\Sigma^-$ -,  $\pi^-$ - и  $p$ -пучков, фитированные с помощью уравнения (4).

В таблице 1 и на рис. 7 представлены результаты измерения фемтоскопических параметров области испускания заряженных каонов для трех интервалов по поперечным импульсам  $k_T$  в  $\Sigma^- A^-$ -,  $\pi^- A^-$ - и  $p A^-$ -столкновениях в эксперименте SELEX.

Видно, что размеры области испускания заряженных каонов, измеренные на  $\Sigma^-$ -,  $\pi^-$ - и  $p$ -пучках, согласуются между собой в пределах погрешностей. Для

Таблица 1. Радиус области испускания  $R$  и сила корреляций  $\lambda$ , измеренные на  $\Sigma^-$ ,  $\pi^-$  и  $p$  пучках.

$\Sigma^-$ -пучок		
$k_T$ (ГэВ/с)	$\lambda$	$R$ (фм)
0.00–0.30	$0.71 \pm 0.02_{\text{стат.}} \pm 0.08_{\text{сист.}}$	$1.32 \pm 0.02_{\text{стат.}} \pm 0.07_{\text{сист.}}$
0.30–0.55	$0.66 \pm 0.02_{\text{стат.}} \pm 0.08_{\text{сист.}}$	$1.18 \pm 0.02_{\text{стат.}} \pm 0.05_{\text{сист.}}$
0.55–1.00	$0.66 \pm 0.04_{\text{стат.}} \pm 0.10_{\text{сист.}}$	$0.98 \pm 0.03_{\text{стат.}} \pm 0.04_{\text{сист.}}$
$\pi^-$ -пучок		
$k_T$ (ГэВ/с)	$\lambda$	$R$ (фм)
0.00–0.30	$0.67 \pm 0.06_{\text{стат.}} \pm 0.09_{\text{сист.}}$	$1.25 \pm 0.06_{\text{стат.}} \pm 0.06_{\text{сист.}}$
0.30–0.55	$0.69 \pm 0.06_{\text{стат.}} \pm 0.06_{\text{сист.}}$	$1.13 \pm 0.06_{\text{стат.}} \pm 0.06_{\text{сист.}}$
0.55–1.00	$0.44 \pm 0.10_{\text{стат.}} \pm 0.11_{\text{сист.}}$	$1.16 \pm 0.19_{\text{стат.}} \pm 0.14_{\text{сист.}}$
$p$ -пучок		
$k_T$ (ГэВ/с)	$\lambda$	$R$ (фм)
0.00–0.30	$0.98 \pm 0.17_{\text{стат.}} \pm 0.13_{\text{сист.}}$	$1.54 \pm 0.16_{\text{стат.}} \pm 0.17_{\text{сист.}}$
0.30–0.55	$0.80 \pm 0.15_{\text{стат.}} \pm 0.13_{\text{сист.}}$	$1.32 \pm 0.12_{\text{стат.}} \pm 0.15_{\text{сист.}}$
0.55–1.00	$0.91 \pm 0.24_{\text{стат.}} \pm 0.11_{\text{сист.}}$	$1.13 \pm 0.17_{\text{стат.}} \pm 0.11_{\text{сист.}}$

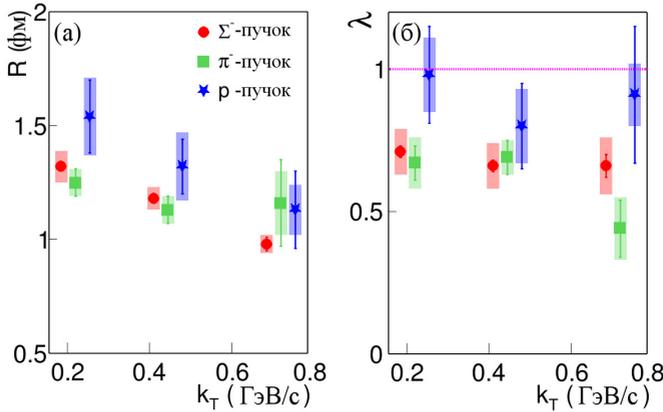


Рис. 7. Зависимость размера области испускания заряженных каонов  $R$  (а) и силы корреляций  $\lambda$  (б) от поперечного импульса пар  $k_T$ . Закрашенные области показывают систематические погрешности измерений.

всех пучков обнаружено уменьшение размеров области испускания  $R$  с ростом поперечных импульсов пар  $k_T$ . Уменьшение фемтоскопических радиусов заряженных каонов с ростом  $k_T$  связано с динамикой эволюции системы, образующейся в результате столкновений, а именно с уменьшением размера областей импульсной однородности [В7]. Разница в измеренных значениях  $\lambda$ , полученных для различных реакций, может возникать из-за разных механизмов рождения

каонов, а также разного вклада от распада резонансов [B13]. Следует отметить, что полученные результаты по каонным корреляциям в эксперименте SELEX согласуются с данными эксперимента ALICE в пределах погрешностей [B9].

В заключении приведены основные результаты:

- Впервые, в рамках одной методики, для  $\Sigma^-$ -А-,  $\pi^-$ -А- и  $p$ -А-столкновений и трех интервалов поперечного импульса  $k_T$  пар каонов определены фемтоскопические параметры: радиус области испускания  $R$  и сила корреляций  $\lambda$ . Показано, что с ростом  $k_T$  размер области испускания каонов уменьшается с  $1.32 \pm 0.07$  до  $0.98 \pm 0.05$  фм, с  $1.25 \pm 0.08$  до  $1.16 \pm 0.23$  фм и с  $1.54 \pm 0.23$  до  $1.13 \pm 0.20$  фм в случае  $\Sigma^-$ -,  $\pi^-$ - и  $p$ -пучков соответственно [A1–A5]. Полученные результаты необходимы для тестирования и совершенствования теоретических моделей множественного рождения частиц.
- Впервые в эксперименте SELEX разработан метод отбора  $K^\pm K^\pm$  пар в указанных столкновениях. Это позволило выделить  $\sim 4.8 \times 10^6$ ,  $\sim 5.9 \times 10^5$  и  $\sim 1 \times 10^5$  пар тождественных каонов на  $\Sigma^-$ -,  $\pi^-$ - и  $p$ -пучках с эффективностью идентификации превышающей 95 % [A1, A5, A6].
- Разработаны и реализованы методы подавления эффектов «слияния» и «расщепления» треков частиц для экспериментов на фиксированной мишени, позволяющие в SELEX устранить искажения корреляционных функций в области разности четырехимпульсов  $q_{inv} < 0.1$  ГэВ/ $c$  [A1, A3].

**Результаты исследований опубликованы в следующих основных работах:**

- A1. Nigmatkulov G.A. et al. The transverse momentum dependence of charged kaon Bose-Einstein correlations in the SELEX experiment // Phys. Lett. B. – 2016. – V.753. – P.458–464, DOI: 10.1016/j.physletb.2015.12.041 (индексируется в Web of Science и Scopus).
- A2. Синев Г.В., Нигматкулов Г.А. Корреляционная фемтоскопия каонов в эксперименте SELEX // Известия РАН. Серия физическая. – 2013. – Т.77. – С.883–885; G.V. Sinev, G.A. Nigmatkulov. Correlation Femtoscopy of Kaons in the SELEX Experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. – 2013. – V.77. – P.800–802 (индексируется в Scopus).
- A3. Nigmatkulov G. Beam and target dependencies of two-kaon femtoscopic correlations in SELEX // EPJ Web Conf. – 2017. – V.138. – P.03013 (1–6), DOI: 10.1051/epjconf/201713803013 (индексируется в Web of Science и Scopus).
- A4. Nigmatkulov G. Measurement of the charged kaon correlations at small relative momentum in the SELEX experiment // Proc. of the XLIII Int. Symp. on

Multipart. Dynam. // Ed. by S. Chekanov, Z. Sullivan. – Chicago (USA). – 2013. – P.81–88.

- A5. Nigmatkulov G. Two-meson correlation femtoscopy in the SELEX experiment // Phys. Procedia. – 2015. – V.74. – P.92–96, DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.225 (индексируется в Web of Science и Scopus).
- A6. Нигматкулов Г.А., Савченко А.А. Корреляции антипротонов с малым относительным импульсом в эксперименте SELEX // Известия РАН. Серия физическая. – 2011. – Т.75. – С.516–519; G.A. Nigmatkulov, A.A. Savchenko. Correlations of antiprotons with small relative momentum in the SELEX experiment // Bull. Russ. Acad. Sci. Ser. Phys. – 2011. – Vol.75. – P.480–483 (индексируется в Scopus).

### Список литературы:

- B1. Kopylov G.I., Podgoretsky M.I. Correlations of identical particles emitted by highly excited nuclei // Sov. J. Nucl. Phys. – 1972. – V.15. – P.219.
- B2. Lednický R. et al. How to measure which sort of particles was emitter earlier and which later // Phys. Lett. B – 2006. – V.373. – P.33, DOI: 10.1016/0370-2693(96)00124-4.
- B3. Lisa M.A. et al. Femtoscopy in relativistic heavy ion collisions: two decades of progress // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. – 2005. – V.55. – P.357, DOI: 10.1146/annurev.nucl.55.090704.151533.
- B4. Pratt S. et al. Constraining the equation of state of superhadronic matter from heavy-ion collisions // Phys. Rev. Lett. – 2015. – V.114. – P.202301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.202301.
- B5. Bowler M. Coulomb corrections to Bose-Einstein corrections have greatly exaggerated // Phys. Lett. B – 1991. – V.270. – P.69, DOI: 10.1016/0370-2693(91)91541-3.
- B6. Sinyukov Yu.M. et al. Coulomb corrections for interferometry analysis of expanding hadron systems // Phys. Lett. B – 1998. – V.270. – P.248, DOI: 10.1016/S0370-2693(98)00653-4.
- B7. Akkelin S.V., Sinyukov Yu.M. The HBT-interferometry of expanding sources // Phys. Lett. B. – 1995. – V.356. – P.525, DOI: 10.1016/0370-2693(95)00765-D.
- B8. Aggarwal M.M. et al. Pion femtoscopy in  $p + p$  collisions at  $\sqrt{s} = 200$  GeV // Phys. Rev. C – 2011. – V.83. – P.064905, DOI: 10.1103/PhysRevC.83.064905.

- B9. Acharya S. et al. One-dimensional charged kaon femtoscopy in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV // Phys. Rev. C – 2019. – V.100. – P.024002, DOI: 10.1103/PhysRevC.100.024002.
- B10. Russ J.S. et al. First charm hadroproduction results from SELEX // Proc. 29th Int. Conf. on High-Energy Physics, ICHEP'98 / Ed. by A. Astbury et al. – V.II – Vancouver (Canada), 1998. – P.1259.
- B11. Sjostrand T., Mrenna S., Skands P. PYTHIA 6.4 physics and manual // J. High Energy Phys. – 2006. – V.05. – P.026, DOI: 10.1088/1126-6708/2006/05/026.
- B12. Skands P. Tuning Monte Carlo Generators: The Perugia Tunes // Phys. Rev. D – 2010. – V.82. – P.074018, DOI: 10.1103/PhysRevD.82.074018.
- B13. Humanic T.J. Predictions for two-pion correlations for  $\sqrt{s_{NN}} = 14$  TeV proton-proton collisions // Phys. Rev. C – 2007. – V.76. – P.025205, DOI: 10.1103/PhysRevC.76.025205.