

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника Токарева Михаила Владимировича на диссертацию Радзевича Павла Владиславовича “Рождение легких нейтральных мезонов в U+U взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ”, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Целью данной работы является экспериментальное исследование особенностей рождения π^0 , η и K_S -мезонов на установке PHENIX в релятивистских U+U взаимодействиях на коллайдере RHIC, для получения новых данных о механизмах рождения адронов и изучения свойств ядерной материи в условиях высоких температур и плотностей энергии.

Актуальность темы диссертационной работы

Первый в мире коллайдер релятивистских ионов и поляризованных протонов RHIC успешно работает уже около 20 лет. Результаты экспериментов, проводимых на RHIC по программе физики тяжелых ионов, показали, что в центральных столкновениях ядер золота образуется сильновзаимодействующая материя с весьма необычными свойствами, напоминающая скорее идеальную жидкость кварков и глюонов с малой вязкостью, чем идеальных газ этих частиц. Эти свойства изучались с помощью различных пробников, таких как адроны, лептонные пары, фотоны и струи. Установлено ряд ярких эффектов - подавление выходов адронов с большими поперечными импульсами, коллективные потоки, $\Delta\phi$ - $\Delta\eta$ корреляции. Изучение механизмов влияния ядерной материи на рождение частиц, таких как потери энергии и многочастичные взаимодействия, представляет интерес для развития теории и экспериментальной проверки используемых моделей с целью выявления таких сигнатур, которые бы свидетельствовали о правильном понимании наблюдаемых физических явлений и способствовали бы поиску новых закономерностей, прежде всего сигнатур фазовых переходов и установления фазовой диаграммы ядерной материи.

Нейтральные частицы - фотоны, мезоны, барионы, наряду с заряженными частицами, широко используются как эффективные пробники состояния ядерной материи. Они представляют значительный интерес, прежде всего как частицы, идентифицируемые с помощью электромагнитных калориметров – детекторов отличных от пропорциональных камер (TRC) и время пролетных систем (ToF) и позволяют исследовать области с большими поперечными импульсами (вплоть до 20 ГэВ/c). Ожидается, что информация об образовании нейтральных мезонов в столкновениях симметричных (Au+Au, Cu+Cu, Pb+Pb) и несимметричных ядер (Cu+Au), а также сферически-несимметричных (U+U) ядер с максимально-возможной ядерной плотностью даст дополнительную информацию как об особенностях рождения частиц в широком диапазоне центральностей

столкновения и поперечных импульсов, так и для проверки моделей ядер. Выходы частиц, фактор ядерной модификации как функции энергии и центральности столкновения и поперечного импульса регистрируемой частицы используются в качестве стандартного набора величин для анализа. Модификации этих величин, связанные с потерями энергии конститuentов в среде, способствует развитию реалистичных моделей образования частиц в столкновениях тяжелых ионов и дают информацию о партонных распределениях и функциях фрагментации в ядрах. Набор пробников, отличающихся массой, спином, четностью и странностью, предоставляет возможность более «тонкого» анализа экспериментальных данных и установления четких закономерностей, необходимых для развития моделей.

Исходя из вышесказанного, следует признать, что тема диссертационной работы Радзевича Павла Владиславовича, посвященная изучению рождения π^0 -, η - и K_S - мезонов в столкновениях U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ, представляется **важной и актуальной**, так как включает **систематическое изучение** свойств нового состояния ядерной материи, характеризуемой высокой плотностью энергии и температурой.

Научная новизна

В диссертационной работе получены новые физические результаты по рождению легких π^0 -, η - и K_S - мезонов в столкновениях ядер урана при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ:

1. Впервые разработана методика исследования рождения легких нейтральных мезонов.
2. Впервые получены выходы легких нейтральных мезонов в зависимости от центральности соударения и поперечного импульса частицы.
3. Впервые получены факторы ядерной модификации легких нейтральных мезонов в зависимости от поперечного импульса частицы и центральности соударения.
4. Впервые установлено совпадение в пределах систематической и статистической неопределенности факторов ядерной модификации легких нейтральных мезонов в зависимости от поперечного импульса частицы и центральности соударения.
5. Впервые получены отношения выходов η/π^0 и K_S/π^0 легких нейтральных мезонов в зависимости от поперечного импульса частицы и центральности соударения.
6. Впервые установлено, что отношения выходов η/π^0 и K_S/π^0 легких нейтральных мезонов в зависимости от поперечного импульса совпадают в пределах систематической и статистической неопределенности для всех классов по центральности соударения.
7. Впервые получены интегральные факторы ядерной модификации в зависимости от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии, для π^0 -, η - и K -мезонов в

столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ, и Au+Au и Cu+Cu взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

8. Впервые установлено, что подавление π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ и столкновениях Au+Au и Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в основном зависит от среднего числа парных нуклон-нуклонных столкновений, а не от геометрических свойств сталкивающихся ядер.

9. Впервые установлено совпадение зависимости выходов π^0 -, η - и K -мезонов от поперечного импульса в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ и Au+Au и Cu+Cu столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области импульсов $p_T > 5-6$ ГэВ/с.

Задачи, решенные в диссертации

1. Разработана методика идентификации легких нейтральных мезонов с использованием двух систем (PbSc и PbGl) электромагнитного калориметра (EMCal) установки PHENIX для получения выходов частиц в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ и определения фактора ядерной модификации.

2. Получены выходы π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса частицы и центральности соударения.

3. Получены факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса частицы и центральности соударения.

4. Получены интегральные факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в зависимости от общего числа нуклонов, участвующих во взаимодействии.

5. Получены отношения η/π^0 и K_S/π^0 выходов легких нейтральных мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса частицы и центральности столкновения.

Оформление диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из Введения, четырех глав, Заключение и Приложения. Объем диссертации составляет 106 страниц, 45 рисунков и 13 таблиц. Список литературы включает 97 наименований.

Во **Введении** сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, дано обоснование актуальности и важности исследуемых проблем, сформулированы научная новизна полученных результатов и практическая значимость представляемой работы, отмечен личный вклад автора в получении результатов исследований, связанных с темой, и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дан краткий обзор экспериментальных результатов в области изучения ядерной материи при больших значениях температуры и плотности энергии, имеющих в мире на момент написания диссертационной работы. В главе обсуждаются теоретические аспекты, необходимые для понимания и

интерпретации результатов, полученных в данной работе (характеристики частиц, представление о кварк-глюонной плазме и её свойствах, фазовой диаграмме ядерной материи).

Во **второй главе** представлено описание и характеристики ускорительного комплекса RHIC, как ускорителя релятивистских протонов и ядер. Приведено описание экспериментальной установки PHENIX. Отличительной особенностью установки PHENIX является наличие различных подсистем для исследования спектров фотонов, лептонных пар и нейтральных адронов, образующихся в столкновениях тяжелых ионов.

Установка включает подсистемы: черенковский детектор (RICH), используемый для регистрации электронов и позитронов; дрейфовую камеру (DC), используемую для измерения траектории заряженных частиц и определения их поперечного импульса; время-пролетную систему (ToF), используемую для идентификации заряженных адронов в диапазоне малых поперечных импульсов; систему падковых камер (PC1, PC2, PC3), используемую для подтверждения треков заряженных частиц, зарегистрированных в дрейфовой камере; электромагнитный калориметр (PbSc, PbGl), используемый для измерения энергии и координат электронов и фотонов.

Акцептанс центральной части экспериментального комплекса установки PHENIX охватывает область $2 \times \pi$ по азимутальному углу и $|\eta| < 0.35$ по псевдобыстроте.

В качестве первичной триггерной системы при регистрации γ -квантов используется счетчик ядро-ядерных столкновений (BBC) и калориметры нулевого угла (ZDC), расположенные на оси движения пучков спектрометра. С помощью ZDC измеряется светимость пучка, а с помощью BBC определяется координата точки столкновения и центральность события при столкновении ядер.

В этой главе описаны назначение, конструкция, состав и характеристики подсистем, процедура определения центральности соударения. В главе также обоснованы возможности и характеристики детекторной установки эксперимента PHENIX для достижения цели и решения задач, поставленных перед автором и сформулированных в первой главе. В работе рассмотрена модифицированная модель Глаубера для описания пространственного сферически-несимметричного распределения нуклонов в ядре урана, используемая для классификации классов центральности соударений.

В **третьей главе** подробно описана разработанная автором методика исследования рождения легких мезонов, позволяющая достичь основной цели диссертационной работы - определить инвариантные выходы и факторы ядерной модификации легких нейтральных π^0 -, η - и K -мезонов, образующихся в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, в условиях большой множественности рождающихся частиц и малой статистической выборки экспериментальных данных.

Разработанная в работе методика включает:

1. Первичную обработку экспериментальных данных (анализ качества работы электромагнитного калориметра во время набора данных в столкновениях ядер U+U).
2. Измерение количества частиц, распадающихся по каналам $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ и $K_S \rightarrow \pi^0\pi^0$, восстановленных с помощью электромагнитного калориметра.
3. Проведение моделирования экспериментальной установки и оценка эффективности регистрации исследуемых частиц в установке.
4. Получение статистических и систематических погрешностей результатов.
5. Получение инвариантных выходов нейтральных π^0 - и η - мезонов (отдельно для PbSc и PbGl подсистем электромагнитного калориметра и их усреднение).
6. Получение инвариантных выходов K_S -мезонов.
7. Получение интерполяционных выходов легких мезонов в столкновениях протонов при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.
8. Вычисление факторов ядерной модификации легких мезонов, рожденных в столкновениях U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.

Отметим, что разработанная методика отбора данных с идентификацией частиц в широкой области поперечных импульсов и центральностей столкновений, оценка статистических и систематических погрешностей, позволили автору впервые получить инвариантные выходы и факторы ядерной модификации легких нейтральных мезонов π^0 -, η - и K -мезонов, образующихся в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.

В **четвертой главе** приведены и обсуждаются основные результаты, полученные автором при проведения диссертационного исследования:

1. Представлены результаты измерения инвариантных выходов рождения π^0 -, η - и K -мезонов, рожденных в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
2. Представлены результаты измерения фактора ядерной прозрачности для π^0 -, η - и K -мезонов, рожденных в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
3. Представлены результаты измерения отношения η/π^0 и K_S/π^0 выходов легких нейтральных мезонов, рожденных в U+U столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
4. Проведено сравнение факторов ядерной модификации π^0 - и η - мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U и Au+Au при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ и 200

ГэВ, и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.

5. Проведено сравнение факторов ядерной модификации K_S -мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U и Au+Au, Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ и 200 ГэВ, и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
6. Проведено сравнение факторов ядерной модификации π^0 -, η - и K_S -мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, и установлена их зависимость от центральности соударения и поперечного импульса рожденной частицы.
7. Проведено сравнение интегральных факторов ядерной модификации π^0 -, η - и K_S - мезонов, рожденных в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, и установлена их зависимость от количества участников столкновения.

В **Заключении** сформулированы основные **результаты и выводы** по результатам, полученным автором в рамках данной работы:

1. Разработана и применена методика исследования рождения π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ.
2. Получены инвариантные выходы π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса регистрируемой частицы для пяти классов по центральности для π^0 -и η -мезонов и для четырех классов по центральности для K_S -мезонов.
3. Получены факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ в зависимости от поперечного импульса регистрируемой частицы для пяти классов по центральности для π^0 - и η - мезонов и для четырех классов по центральности для K_S -мезонов.
4. Получены интегральные факторы ядерной модификации в зависимости от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии, измеренные для π^0 -, η - и K_S - мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ, и Au+Au и Cu+Cu столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.
5. Получены отношения η/π^0 и K_S/π^0 выходов частиц, измеренных в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, в зависимости от поперечного импульса регистрируемой частицы для пяти классов по центральности для π^0 -и η -мезонов и для четырех классов по центральности для K_S -мезонов.

Сформулированы выводы

1. О подавлении выходов π^0 -, η - и K -мезонов на (70-80) % в центральных столкновениях при больших ($p_T > 5$ ГэВ/с) поперечных импульсах и подавлении π^0 - и η - мезонов в области малых и промежуточных импульсов ($p_T=1-5$ ГэВ/с).
2. О подавлении на (40-50) % и независимости от поперечного импульса выходов π^0 -, η - и K -мезонов в периферических U+U столкновениях.

3. О слабой зависимости величины фактора ядерной модификации π^0 -, η - и K -мезонов, образованных в U+U столкновениях от кваркового состава и массы регистрируемой частицы.

4. О зависимости величины подавления выходов π^0 -, η - и K -мезонов в столкновении ядер U+U, Au+Au и Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ от среднего числа парных нуклон-нуклонных столкновений.

5. О совпадении в пределах систематических и статистических погрешностей величины отношения η/π^0 и K_S/π^0 , выходов частиц образованных в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ, во всех классах по центральности.

4. О совпадении в пределах систематических и статистических погрешностей величины выходов π^0 -, η - и K -мезонов в столкновении ядер U+U и Au+Au, Cu+Cu при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ и 200 ГэВ в области больших поперечных импульсов для всех классов по центральности.

Практическая значимость результатов и рекомендации по использованию

Разработанная и реализованная автором методика измерения спектров рождения π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U может быть использована при анализе данных, полученных в экспериментах по изучению столкновений различных тяжелых ядер. Новые результаты (выходы, отношения выходов, факторы ядерной модификации) являются частью систематических исследований закономерностей рождения π^0 -, η - и K -мезонов в столкновении ультрарелятивистских ядер и позволяют оценить влияние плотной и горячей среды на рождение частиц при формировании кварк-глюонной плазмы. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при сравнительном анализе свойств ядерной материи в экспериментах PHENIX, STAR, ALICE, ATLAS, CMS, NA61/SHINE, включены в программу специальных дисциплин при подготовке студентов по направлению экспериментальной ядерной физики в институтах и университетах МГУ, СПбГУ, ТПУ, ВГУ, МИФИ, ФИАН, ОИЯИ, НИЦ Курчатовский институт, использованы для проверки и развития феноменологических моделей, а также планирования физических программ на будущих ускорительных комплексах тяжелых ионов NICA (ОИЯИ, Дубна) и FAIR (GSI, Германия).

Полученные в диссертации результаты вносят **существенный вклад в систематическое экспериментальное изучение** свойств ядерной материи, образующейся в столкновениях тяжелых ионов на RHIC при экстремально больших значениях энергии столкновения и плотности множественности с использованием легких нейтральных мезонов. Эти результаты представляют также значительную **теоретическую ценность** для понимания нового состояния ядерной материи (кварк-глюонной плазмы) и установления особенностей её фазовой диаграммы.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием результатов, полученных с применением двух типов электромагнитных

калориметров (PbSc и PbGl). Высокий профессиональный уровень коллаборации PHENIX и одобрение с ее стороны результатов, представляемой работы, также является признанием их достоверности. Результаты, полученные в работе, представлялись на крупных международных конференциях, рабочих совещаниях коллаборации PHENIX и опубликованы в 7 печатных работах в журналах из списка, рекомендованного ВАК (5 индексируемых в Web of Science и 4 включены в перечень SCOPUS).

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на совещаниях международной коллаборации PHENIX в БНЛ, семинарах ОФВЭ ПИЯФ, ЛФВЭ ОИЯИ, на международных конференциях «Nucleus-2017» (Almaty, Kazakhstan), «Nucleus-2018» (Voronezh, Russia), PhysicA.SPb (2017, 2018) (Saint Petersburg, Russia.), 12 International Workshop on High- p_T Physics in the RHIC/LHC Era, 2017 (Bergen, Norway), «Неделя Науки СПбПУ» (2016, 2017, 2018 гг.) (Санкт-Петербург, Россия).

Вклад автора

Автор диссертационной работы является членом коллаборации PHENIX. Он принимал непосредственное и активное участие в работе эксперимента, наборе экспериментальных данных по рождению легких мезонов и анализе данных, включая импульсные выходы и факторы ядерной модификации π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях ядер U+U при энергии $\sqrt{s_{NN}}=192$ ГэВ. В работах, опубликованных по теме диссертации, вклад автора является определяющим. Все основные результаты, представленные в данной диссертационной работе получены автором лично. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

В **Заключении** диссертации перечислены основные результаты работы и сформулированы наиболее значимые положения, выносимые на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Замечания по работе

1. Для понимания роли различных механизмов в образовании π^0 -, η - и K -мезонов в столкновениях U+U было бы полезно сравнить их выходы с результатами прямых, в рамках КХД, и модельных МС расчетов.

2. Не представлены в работе значения плотностей множественности в центральной области псевдобыстрот для столкновений U+U, представляющих интерес для оценки плотности энергии и используемых также для определения центральности соударения.

3. Неоправданное использование жаргонной лексики: «зрители» (стр.37), «мертвые карты» (стр.45).

Заключение

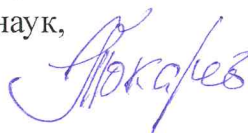
Отмеченные замечания не уменьшают общую положительную оценку диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Радзевича Павла Владиславовича “Рождение легких нейтральных мезонов в $U+U$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 192$ ГэВ”, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. В опубликованных автором работах отражены основные результаты и положения диссертации. Диссертационная работа обладает научной и практической значимостью.

Оформление диссертации, публикации и апробация работы соответствуют «Положению о присуждении ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 и от 21.04.2016 г. № 335), а автор диссертационной работы Радзевич Павел Владиславович заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Официальный оппонент:

Начальник сектора Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник



Токарев Михаил Владимирович
« 3 » марта 2020 г.

Почтовый адрес:

141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Телефон: +7 (49621) 65-059

E-mail: tokarev@jinr.ru

Подпись сотрудника ЛФВЭ ОИЯИ Токарева М.В. заверяю.

Ученый секретарь ЛФВЭ ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук



Пешехонов Дмитрий Владимирович



Список основных публикаций М.В.Токарева
в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации
за последние 5 лет

1. Tokarev M.V., Kechechyan A.O., Zborovsky I. «Validation of z-scaling for negative particle production in Au+Au collisions from BES-I at STAR», 2020, Nucl. Phys. A, v.993, p.121646.
2. Adam J.,...Tokarev M.V et. al. «Charge-dependent pair correlations relative to a third particle in p + Au and d + Au collisions at RHIC», 2019, Phys. Lett. B, v.798, p.134975.
3. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «First observation of the directed flow of D^0 and \bar{D}^0 in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV», 2019, Phys. Rev. Lett, v.123, p.162301.
4. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «Observation of Excess J/ψ Yield at Very Low Transverse Momenta in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and U+U Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193$ GeV», 2019, Phys. Rev. Lett, v.123, №13, p.132302.
5. Tokarev M.V., Kechechyan A.O., Zborovsky I. «Self-similarity of negative particle production in Au+Au collisions at STAR», 2019, Physics of Particles and Nuclei Letters, v.16, № 5, pp.508-513.
6. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «Azimuthal Harmonics in Small and Large Collision Systems at RHIC Top Energies», 2019, Phys. Rev. Lett, v.122, p.172301.
7. Adam J.,...Tokarev M.V. et. al. «Collision-energy dependence of pt correlations in Au+Au collisions at energies available at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider», 2019, Phys. Rev. C, v.99, p.044918.
8. Tokarev M.V., Zborovsky I. «New indication on scaling properties of strangeness production in pp collisions at RHIC», 2017, Int. J. Mod. Phys. A, v.32, № 5, p.1750029.