

Тематическое направление 7

«Фундаментальные и прикладные исследования с использованием тяжелых ионов. Теоретическая и математическая физика»

ОТЧЕТ НИЦКИ – ПИЯФ (Лаборатория Релятивистской Ядерной Физики под руководством В.М.Самсонова) за 2013-2017 гг по тематическому направлению 7.1 «Исследования на пучках тяжелых ионов на ускорительном комплексе ГСИ (Дармштадт, Германия) и на пучках ядерных коллайдеров БАК (ЦЕРН), RHIC (БНЛ)»

Цель работы. Изучение природы и фундаментальных свойств ядерного вещества: получение в лабораторных условиях и исследование нового состояния материи – Кварк-Глюонной Плазмы, характеризуемой температурой, в 100000 раз более высокой, чем температура в центре Солнца. Программа таких исследований реализуется, в частности, на мегадетекторе PHENIX на Коллайдере Релятивистских Ионов (РИК) в США при энергии сталкивающихся ядер золота до 100 ГэВ/нуклон и на мегадетекторе ALICE на пучках ионов свинца с энергией до 2500 ГэВ/нуклон Большого Адронного Коллайдера (БАК) в ЦЕРНе. В рамках этой же программы на ускорительном комплексе FAIR (Дармштадт, Германия) запланирован эксперимент CBM для исследования состояния ядерного вещества при низких температурах, но более высоких значениях барионной плотности, в условиях, близких к состоянию ядерной материи во внутренней области нейтронных звезд.

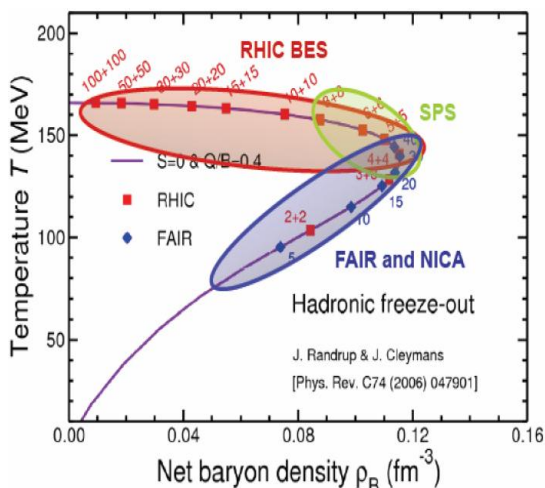
ПИЯФ активно участвует в Международных Коллаборациях PHENIX, ALICE, CBM.

Основным фундаментальным результатом проведенных к настоящему времени исследований является объявленное в 2005 году открытие существования новой формы ядерного вещества - Кварк-Глюонной Плазмы, обладающей признаками сильно взаимодействующей почти идеальной жидкости при температуре, превышающей температуру 160-170 МэВ, предсказанную для фазовых переходов, обусловленных деконфайнментом и спонтанным нарушением киральной симметрии в сильных взаимодействиях.

Основная цель исследований по данной тематике в период 2013-2017 гг – детальное изучение свойств формируемой Кварк-Глюонной Плазмы и поиск новых ярких эффектов во взаимодействии ультррелятивистских ионов. В результате проведенных исследований получен ряд важнейших результатов в области физики фундаментальных взаимодействий элементарных частиц и ядер.

7.1.1. Поиск критической точки КХД в эксперименте PHENIX

После открытия нового экстремального состояния ядерного вещества – плотной, высокотемпературной, сильновзаимодействующей, почти идеальной кварк-глюонной жидкости, формируемой в центральных столкновениях ультррелятивистских ионов на RHIC и LHC, исключительно важен вопрос, как меняются свойства этого состояния с понижением энергии столкновения. С этой целью на РИК Коллаборацией PHENIX, в которой НИЦ КИ представлен группами сотрудников из ПИЯФ, КИ и ИФВЭ, была реализована обширная программа RHIC Beam Energy Scan. Траектория такого сканирования по энергии, показанная схематически на рисунке в плоскости температура – барионная плотность, фактически означает поиск критической точки КХД, в которой



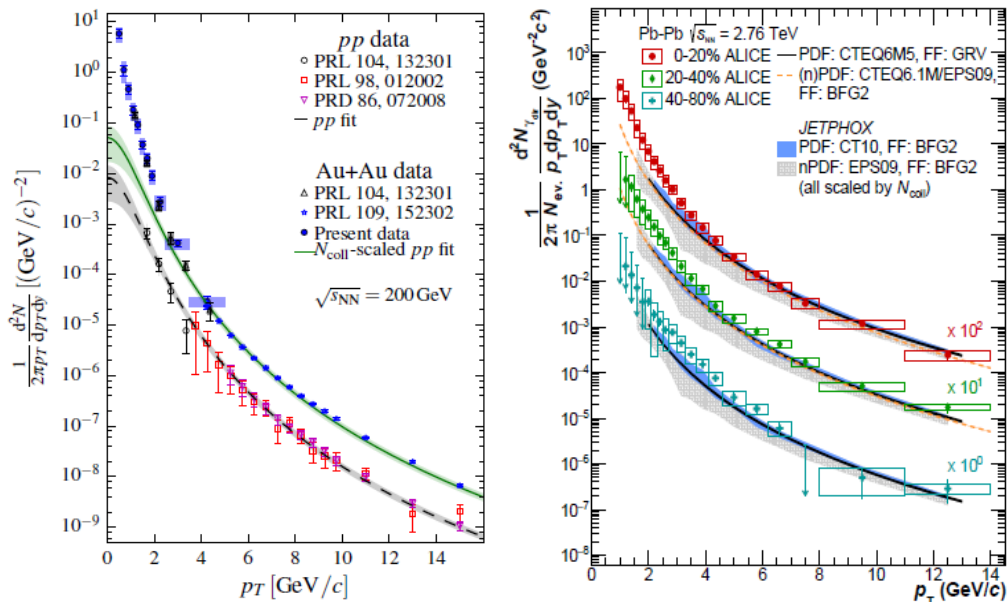
происходит переход из одного фазового состояния среды в другое. В рамках этой программы показано, что при уменьшении энергии взаимодействия вплоть до $\sqrt{s_{NN}} = 39$ ГэВ по-прежнему наблюдаются признаки образования кварк-глюонной плазмы со свойствами идеальной жидкости – параметр, характеризующий эллиптические потоки постоянен, а подавление выхода легких адронов слабо зависит от энергии.

Из поведения эллиптических потоков следует, что критическую точку разумно искать в интервале энергий столкновения $\sqrt{s_{NN}} = 20 - 40$ ГэВ [PHENIX Collaboration “ Recent PHENIX results from the RHIC energy scan” Nucl.Phys. A904-905 (2013) 264c-269c].

Нижняя граница этой области будет доступна для исследований на FAIR и NICA

7.1.2 Температура Кварк-Глюонной Плазмы 240 МэВ определена из спектра прямых фотонов в AuAu взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и 300 МэВ из спектра фотонов при центральных PbPb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2760$ ГэВ.

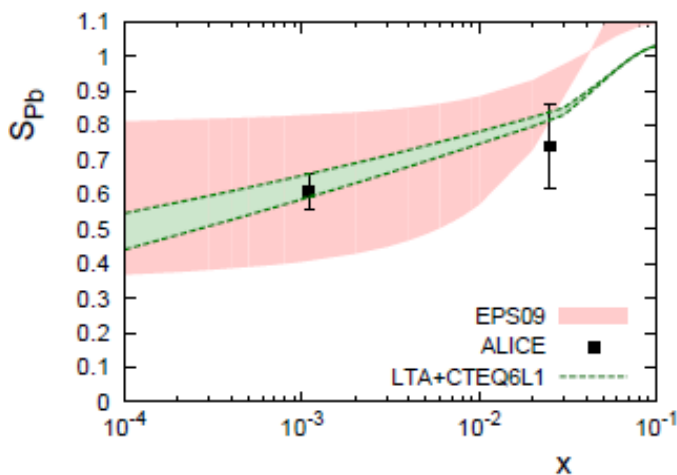
Прямые фотоны (происходящие не от распада адронов), рожденные в области взаимодействия ядер, покидают ее, отражая состояние взаимодействующей системы на момент их излучения. На рисунке показаны спектры рождения прямых фотонов, измеренные в p+r и Au+Au столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ (левая панель рисунка), а также в столкновении ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 2760$ ГэВ (правая панель).



В области поперечных импульсов $p_T < 2$ ГэВ/с наблюдается ярко выраженный избыточный выход прямых фотонов относительно измерений в p+r столкновениях, масштабированных числом парных неупругих нуклон-нуклонных столкновений (N_{coll}) в ядро-ядерных взаимодействиях. Аппроксимация избыточного выхода в AuAu взаимодействиях экспоненциальной функцией дает значение эффективной температуры ~ 240 МэВ, что существенно превышает критическую температуру фазового перехода ~ 175 МэВ [Phys.Rev. C91 (2015) no.6, 064904]. Превышение выхода мягких фотонов также отчетливо проявляется в центральных PbPb столкновениях при энергиях БАК. Извлеченная из анализа температура оказалась равной 297 МэВ [Phys.Lett. B754 (2016) 235-248].

7.1.3 Экранировка ядерной глюонной плотности из данных по J/ψ рождению в ультрапериферических столкновениях на LHC.

Значительные усилия группы ПИЯФ в обработке данных эксперимента ALICE были сфокусированы на процессах, в исследовании которых существенную роль играл мюонный магнитный спектрометр детектора ALICE. В частности впервые были измерены сечения фоторождения чармония в ультрапериферических столкновениях ядер свинца и протонов при значениях быстрот $y=-3$ и $y=0$. Результаты измерений опубликованы в журналах *Physics Letters B* 718,1273, 2013 и *Eur. Journal of Physics C* (2013),73:2617. Из этих данных в рамках лидирующего порядка теории возмущения КХД впервые получена фактически прямая экспериментальная оценка экранировки ядерных глюонов (черные квадраты на рисунке), несущих малую долю x нуклонного

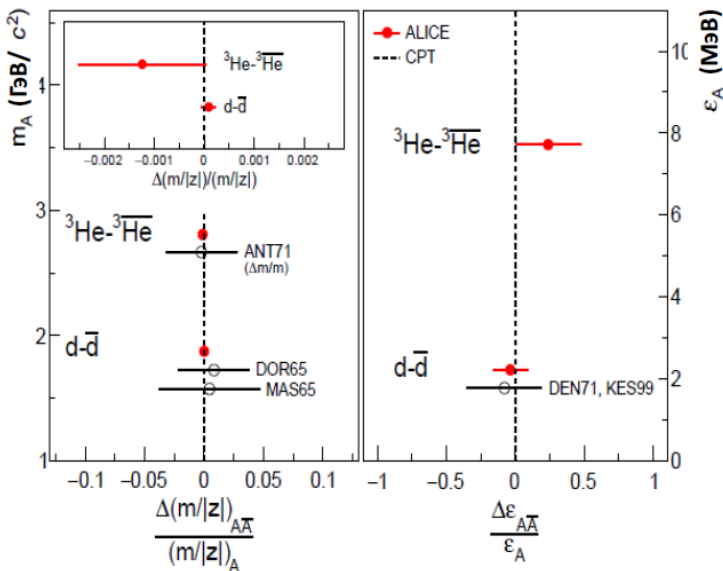


импульса в ядре [**Physics Letters B726 (2013) 290**]. Эта оценка фактора ядерной экранировки глюонов S_{pA} гораздо точнее величины, извлеченной из данных по глубоконепругому рассеянию электронов на ядрах в рамках Глобальных Анализом (розовый цвет на рисунке – пример области неопределенности в одном из

Глобальных Анализом - EPS09). Важно отметить, что экранировка ядерных глюонов является одним из ключевых эффектов, важных не только для оценки сечений жестких процессов в ядерных взаимодействиях, но и для понимания механизма формирования и эволюции кварк-глюонной материи в столкновении ультрарелятивистских ионов на коллайдерах RHIC и LHC.

7.1.4 Проверка СРТ инвариантности в легких ядерных системах

Одна из фундаментальных симметрий в квантовой теории поля, сформулированная в виде теоремы СРТ, гласит, что все физические законы инвариантны при одновременном обращении времени (Т), сопряжении заряда (С) и инверсии пространства (Р). Прямым следствием СРТ теоремы является равенство масс частиц и античастиц. К настоящему времени это равенство в секторе бозонов проверено в слабых взаимодействиях с беспрецедентной точностью измерением распадов нейтральных каонов в эксперименте KLOE. Наиболее прецизионным тестом СРТ инвариантности в барионном секторе Стандартной Модели (СМ) является экспериментально измеренное отношение R масс и зарядов для протонов и антипротонов. В 2015 году Коллаборация ALICE, в которой



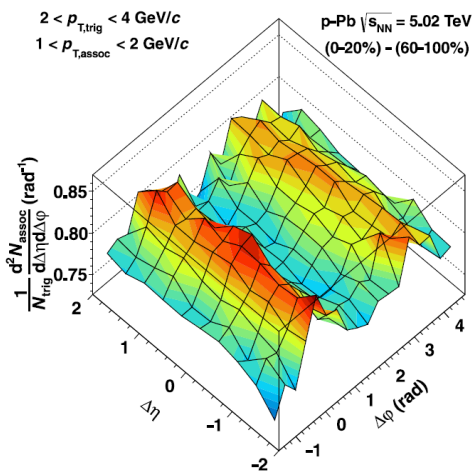
НИЦ КИ представлен группами сотрудников из ПИЯФ, КИ, ИФВЭ и ИТЭФ, опубликовала в журнале Nature Physics 11,v.10,2015 результаты измерения выхода ядер D , ${}^3\text{He}$, \bar{D} , ${}^3\bar{\text{He}}$ в столкновениях ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Из анализа данных получено, что разности отношений масс ядер к их заряду согласуются с нулем в пределах неопределенности

измерений на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ для системы дейтрон-антидейтрон и $3 \cdot 10^{-3}$ для ядер гелий-антигелий (левая панель на рисунке).

С полученными значениями масс ядер и анти-ядер были также вычислены энергии связи этих систем, с использованием для масс нуклонов и антинуклонов значения, рекомендованные CODATA. Разность энергий связи ядер и антиядер совместима с нулем в пределах экспериментальной неопределенности (правая панель на рисунке). Для ядер гелий-антигелий такая оценка получена впервые. Этот результат свидетельствует о том, что с точностью до экспериментальных неопределенностей эффективные ядерные силы, ответственные за формирование основного состояния легких ядер и антиядер не нарушают СРТ-инвариантность.

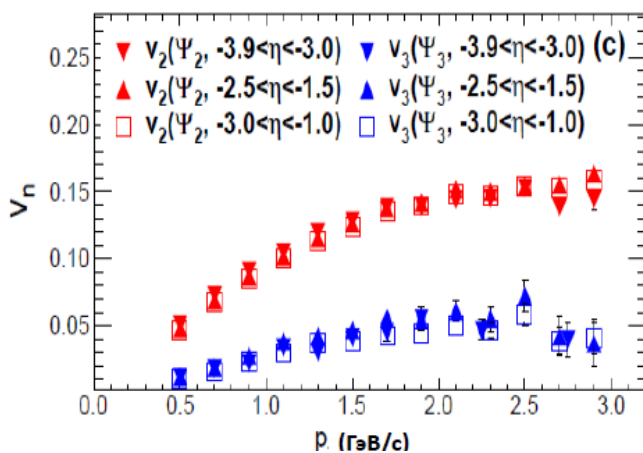
7.1.5. Дальние корреляции во взаимодействиях легких и тяжелых ядер при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ.

Коллаборация PHENIX в период 2013-2017 гг при исследовании столкновений ультррелятивистских легких и тяжелых ионов обнаружила корреляции между двумя эффектами – значительным коллективным потоком адронов и двугорбой структурой (double-ridge structure) в событиях с высокой множественностью рождающихся частиц. Оба эти явления ранее наблюдались в ультррелятивистских столкновениях тяжелых



ядер и успешно объяснялись гидродинамическими потоками, обусловленными значительными градиентами давления в горячей плотной партонной среде в зоне максимального перекрытия взаимодействующих тяжелых ядер. В эксперименте ALICE на БАК в протон-ядерных столкновениях с высокой множественностью обнаружена двугорбая структура, аналогичная корреляциям, ранее найденным в столкновении тяжелых ядер.

В эксперименте PHENIX на РИК подобные корреляции были изучены в $^3\text{He}+\text{Au}$ взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. В этих столкновениях реализуется различная геометрия начального состояния, в частности, и обусловленная треугольной конфигурацией нуклонов в ^3He . Заметный триангулярный поток (синий цвет маркеров

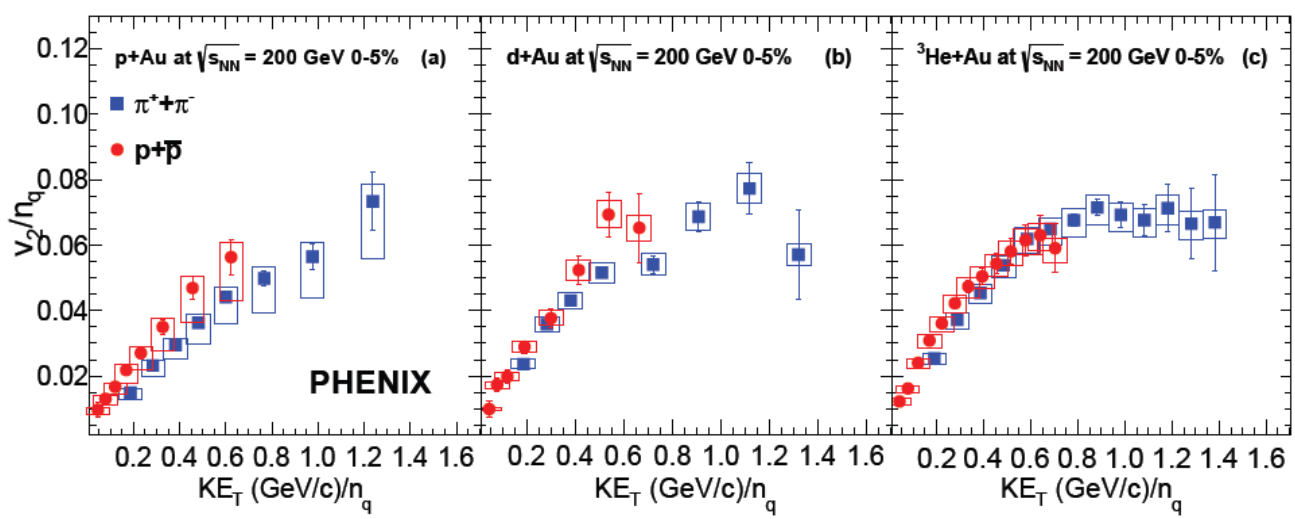


на рисунке) отражает влияние треугольной симметрии зоны взаимодействия, обусловленной структурой ^3He . Это может рассматриваться как свидетельство образования сгустков кварк-глюонной плазмы со свойствами почти идеальной жидкости в малых объемах с радиусом

порядка радиуса ^3He при взаимодействии ультррелятивистских ядер ^3He и Au с высокой множественностью рожденных адронов. [Phys.Rev.Lett. 115 (2015) no.14, 142301]

7.1.6 Кварк-Глюонная Жидкость при взаимодействиях малых ядерных систем с тяжелыми ядрами?

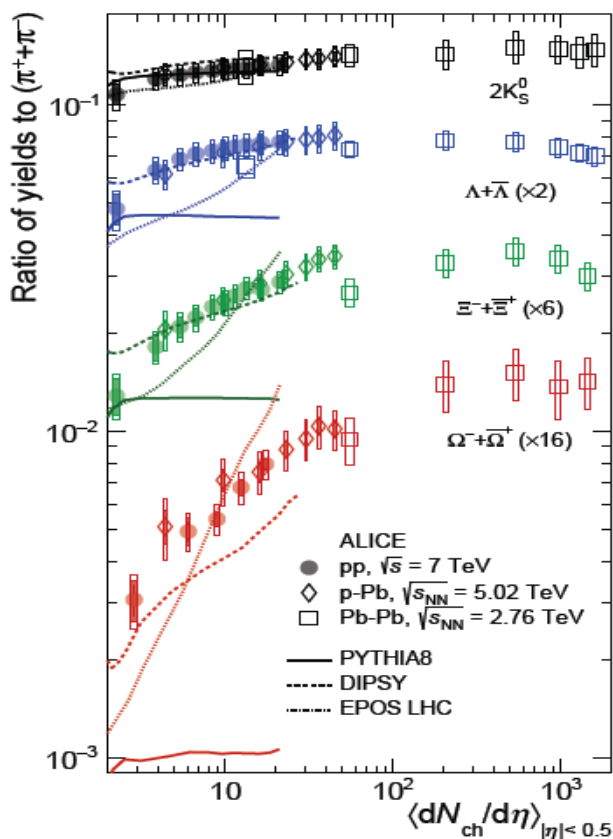
В 2017 г. в эксперименте PHENIX в событиях с высокой множественностью обнаружены эллиптические потоки (v_2) заряженных пионов и протонов в p+Au, d+Au, ^3He +Au взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ. Как и при Au+Au взаимодействиях, при анализе этих потоков наблюдается явление кваркового скейлинга: величина потоков практически одинакова при масштабировании потоков частиц различного сорта и их поперечной кинетической энергии числом валентных кварков в этих частицах. Из этого наблюдения можно сделать вывод, что в изученных взаимодействиях даже столь малых (p, d, ^3He) систем с ядрами гидродинамические анизотропные потоки возникают до перехода рожденной во взаимодействии кварк-глюонной среды в адронную фазу, свидетельствуя о возможном формировании сильновзаимодействующей почти идеальной кварк-глюонной жидкости



[Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 81 (2017) no.10, 1179-1180]

7.1.7 Аномально высокий выход странных адронов в протон-протонных и протон-ядерных столкновениях на БАК – индикатор формирования Кварк-Глюонной Плазмы?

Аномально высокий выход странных адронов в центральных столкновениях тяжелых ядер считается одним из характерных признаков формирования Кварк-Глюонной Плазмы, так как в начальных состояниях сталкивающихся ядер вклад странных кварков сильно подавлен.



Выход странных адронов в pp и pPb взаимодействиях, измеренный в эксперименте ALICE в 2017 году, растет с увеличением средней множественности в области центральных быстрот тем сильнее, чем выше содержание странных кварков в рожденном адроне. При высокой множественности его величина приближается к ранее наблюдаемым значениям в центральных PbPb столкновениях. Наряду с ранее обнаруженными эффектом «Риджа» и коллективными анизотропными потоками, поведение выхода мультистранных адронов может

рассматриваться как еще одно указание на формирование в столь малых взаимодействующих системах, как pp, состояния вещества, обладающего признаками кварк-глюонной плазмы [ALICE Collaboration *Nature Phys.* **13** (2017) 535-539].

ОСНОВНЫЕ ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ СОТРУДНИКАМИ ПИЯФ (совместно с сотрудниками КИ, ИТЭФ, ИФВЭ НИЦ КИ) в ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ТЕМЕ 7.1 НАПРАВЛЕНИЯ 7:

1. Из выхода прямых фотонов в центральных столкновениях тяжелых ядер получена оценка температуры Кварк-Глюонной Плазмы на начальной стадии ее эволюции – температура КГП, созданной при энергии столкновения 200 ГэВ на РИК составляет 250 МэВ, а при энергии столкновения 2760 ГэВ на БАК - 300 МэВ.
2. Впервые получена из экспериментальных данных оценка экранировки глюонной плотности при малых x , важная для надежного вычисления сечений жестких КХД процессов, анализа механизмов формирования КГП и выхода на новый режим сильных глюонных полей в КХД, характеризуемый малой константой взаимодействия в сверхплотной глюонной среде.
3. Впервые получены прямые экспериментальные указания на формирование Кварк-Глюонной Плазмы в малых объемах ядерного вещества, близких к объему нуклона.
4. Впервые показано, что разность энергий связи ядер и антиядер гелия совместима с нулем в пределах экспериментальной неопределенности. Этот результат свидетельствует о том, что эффективные ядерные силы, ответственные за формирование основного состояния легких ядер и антиядер не нарушают СРТ-инвариантность сильных взаимодействий.
5. Программа сканирования по энергии столкновения на РИК ограничила область поиска критической точки перехода адронной материи в кварк-глюонную фазу - нижняя граница этой области находится в пределах достижимости на NICA и FAIR.
6. Всего за период 2013-2017 гг по теме 7.1 количество публикаций (в основном, в составе коллабораций ALICE и PHENIX) более 200 с суммарным индексом цитируемости более 10000.

Использование результатов НИР:

Результаты проведенных исследований используются в анализе новых данных и теоретических исследованиях по физике сильных взаимодействий при высоких энергиях. **Научно-технический уровень выполненных НИР находится на уровне лучших достижений в данной области.**