

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

На правах рукописи

Подпись аспиранта

Митранков Юрий Михайлович

ФИО аспиранта

ОСОБЕННОСТИ РОЖДЕНИЯ ϕ -МЕЗОНОВ В $CU+AU$ И $U+U$
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{NN}} = 200$ И 193 ГЭВ
СООТВЕТСТВЕННО

наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)

Физико-математические науки,

1.3.15 «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий»

отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)

03.06.01_10 Физика атомного ядра и элементарных частиц

наименование направленности (шифр и наименование направления)

Академическая степень **Исследователь. Преподаватель-исследователь**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, профессор ВШФФИ СПбПУ,
Бердников Ярослав Александрович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в высшей школе «Фундаментальных физических исследований» Физико-Механического Института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, профессор ВШФФИ СПбПУ,
Бердников Ярослав Александрович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью
к.ф.-м.н., доцент, доцент Санкт-Петербургского
государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича «СПбГУТ»,
Рецензент: Павлов Федор Федорович
ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

Введение

Одной из главных задач современной физики элементарных частиц является поиск новых признаков, количественная оценка и описание свойств кварк-глюонной плазмы (КГП). КГП – сильновзаимодействующая материя, в которой цветовые заряды находятся в состоянии деконфайнмента [1]. Коллайдерные эксперименты по столкновению релятивистских ядер предоставляют уникальную возможность исследовать КГП в лабораторных условиях.

Влияния начальных условий, в особенности размера и формы области ядерного перекрытия, на эволюцию материи, образующейся в релятивистских столкновениях, возможно изучать путем измерения рождения легких адронов в различных взаимодействиях. Взаимодействия ядер Cu+Au представляют собой асимметричную комбинацию симметричных систем столкновений Cu+Cu и Au+Au. В центральных столкновениях Cu+Au ион меди полностью поглощается ионом золота. Во взаимодействии деформированных ядер урана достигаются различные конфигурации столкновения в зависимости от ориентации ядер относительно плоскости реакции. В результате область перекрытия ядер при столкновениях Cu+Au и U+U может обладать дополнительной асимметрией в плоскости, поперечной оси пучка, что приводит к отличным от симметричных систем начальным условиям. Таким образом, сравнение рождения частиц, измеренного в Cu+Au и U+U столкновениях и симметричных системах, является хорошим способом изучения влияния начальных условий на эволюцию кварк-глюонной материи [A1].

Особое место среди различных проявлений КГП занимают эффект гашения струй [2] и увеличение выхода странности [3]. Эффект гашения струй проявляется в подавлении выходов частиц с большим поперечным импульсом ($p_T > 5$ ГэВ/с), по причине энергетических потерь родительских партонов в горячей и плотной среде. Увеличение выхода странности наблюдается в избыточном выходе адронов, содержащих (анти)странные кварки в столкновениях тяжелых ионов (A+B) на одно нуклон-нуклонное столкновение по сравнению с $p+p$ -взаимодействиями. Для интерпретации наблюдаемого увеличения выхода адронов с открытой или закрытой странностью следует помимо механизма фрагментации рассматривать многокварковые или глюонные процессы во время образования адронов (коалесценция или рекомбинация) [4]. В релятивистских столкновениях ионов степень насыщения странности и потери энергии партонов чувствительны к начальным условиям [2; 3]. Таким образом, измерения рождения адронов с открытой и закрытой странностью позволяют понять зависимость свойств КГП от начальных условий.

Измерение коэффициентов азимутальной анизотропии второго порядка v_2 , т.е. эллиптического потока, является эффективным инструментом для исследования механизма преобразования исходной анизотропии области ядерного перекрытия в координатном пространстве в азимутальную анизотропию образующихся частиц в импульсном пространстве. Исследования эллиптического потока в симметричных системах (Au+Au, Cu+Cu) на RHIC показали зависимость v_2 от числа валентных кварков в адроне nq , эксцентриситета второго порядка и числа нуклонов участников события (ε_2 и $\langle N_{\text{part}} \rangle$) [5]. Сравнение полученных результатов с результатами расчетов гидродинамических моделей свидетельствует в пользу того, что КГП имеет свойства почти идеальной жидкости [1]. Следовательно, адронный эллиптический поток чувствителен к форме и размеру области ядерного перекрытия. Измерения эллиптического потока легких адронов в Cu+Au и U+U столкновениях могут выявить основные физические механизмы его развития.

Векторный ϕ -мезон является легчайшим связанным состоянием $s\bar{s}$ -кварков [6], поэтому его образование чувствительно к модификациям рождения странности в КГП. Исследование инвариантных спектров по поперечному импульсу p_T рождения ϕ -мезона позволяет изучать зависимость потери энергии партонов от аромата, поскольку выходы ϕ -мезонов измеримы в области большого поперечного импульса. В связи с правилом ОЦИ и данным по фоторождению [7], ϕ -мезон имеет малое сечение взаимодействия с нестранными адронами. Кроме того, из-за большего времени жизни (42 фм/с [6]), чем у КГП (5 фм/с [1]), ϕ -мезоны в основном распадаются вне фазы КГП и их дочерние частицы реже перерассеиваются в фазе адронизации [8]. Следовательно, его кинематические свойства в первую очередь определяются условиями ранней партонной фазы, и в меньшей степени зависят от стадии адронного газа. Сравнение значений v_2 для ϕ -мезонов со значениями v_2 для π^\pm -мезонов и (анти)протонов может указать на роль стадии адронного газа в развитии эллиптического потока [A3].

На основании всего вышперечисленного, одновременное изучение особенностей инвариантных спектров по p_T и азимутальной анизотропии второго порядка рождения ϕ -мезонов предоставляет уникальную возможность для выявления зависимости свойств кварк-глюонной материи от начальных условий. Таким образом, в диссертации было проведено актуальное измерение образования ϕ -мезонов в асимметричных столкновениях Cu+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в крупнейшей системе столкновений U+U при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ в эксперименте ФЕНИКС [9].

Целью данной работы является экспериментальное изучение свойств ядерной материи, образующейся в столкновении ядер Cu+Au и U+U при энергии столкновений $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ соответственно, путем исследования особенностей рождения φ -мезонов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Произвести первичный отбор данных, событий и треков.
2. Определить азимутальный угол и разрешение плоскости реакции событий.
3. С использованием различных методик измерить выходы φ -мезонов в выбранных диапазонах по центральности, промежутках по p_T и азимутальному углу относительно плоскости реакции.
4. Вычислить инвариантные спектры рождения по поперечному импульсу и факторы ядерной модификации для φ -мезонов.
5. Измерить коэффициенты азимутальной анизотропии второго порядка v_2 для φ -мезонов.
6. Произвести классификацию и расчет систематических неопределенностей измерений.
7. Сравнить экспериментальные данные с результатами расчетов различных моделей (Pythia8/Angantyr, AMPT, iEBE-vishnu).
8. Произвести физическую интерпретацию полученных результатов.

Результаты

На рисунке 1 приведены инвариантные спектры по поперечному импульсу p_T рождения φ -мезонов, измеренные в Cu+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в U+U столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ в области малых быстрот $|\eta| < 0.35$. Пунктирные линии представляют аппроксимацию функцией Леви [10].

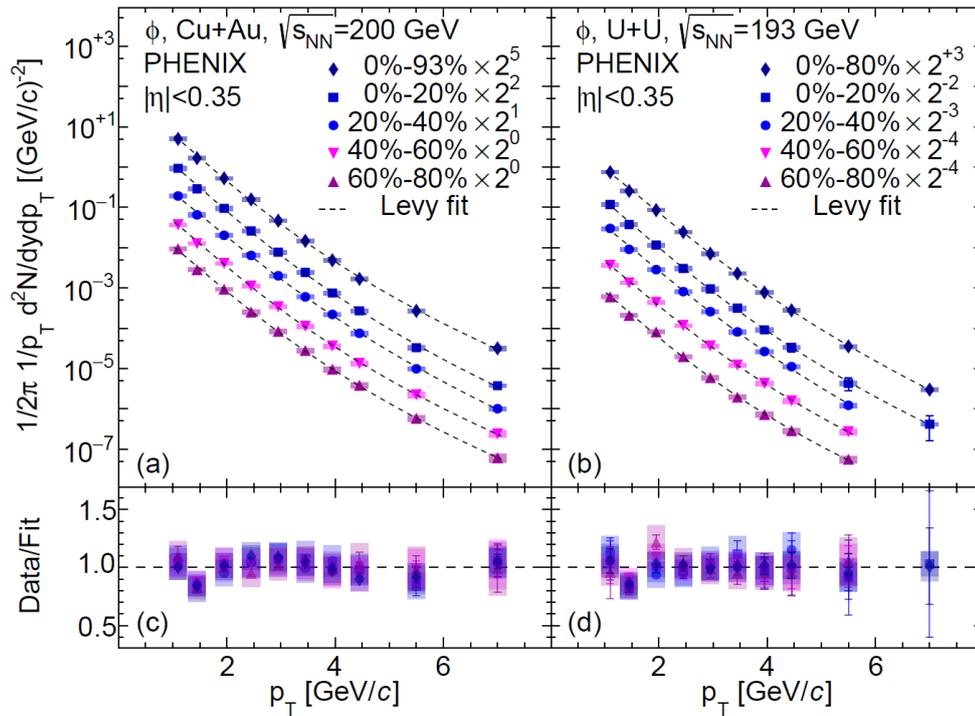


Рис. 1 — Инвариантные спектры по поперечному импульсу рождения ϕ -мезонов, измеренные (а) в Cu+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и (б) в U+U столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ в области $|\eta| < 0.35$ и (в-г) отношения экспериментальных данных к аппроксимации функцией Леви [10].

Вертикальные линии соответствуют статистическим ошибкам, а «прямоугольники» – систематическим.

Для изучения различных эффектов, влияющих на особенности рождения адронов в столкновениях релятивистских ядер A+B, используются факторы ядерной модификации R_{AB} :

$$R_{AB} = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AB}/dydp_T}{dN_{pp}/dydp_T}$$

где $dN_{AB}/dydp_T$ – значение инвариантного спектра по p_T рождения частиц в A+B взаимодействиях, $dN_{pp}/dydp_T$ – значение инвариантного спектра по p_T рождения частиц в $p+p$ взаимодействиях, $\langle N_{coll} \rangle$ – количество бинарных нуклон-нуклонных столкновений.

На рисунке 2 представлены факторы ядерной модификации R_{AB} , измеренные для ϕ -мезонов в зависимости от p_T в столкновениях Cu+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в столкновениях U+U при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ. Также на рисунке 2 приводится сравнение со значениями R_{AB} для π^0 - и η - мезонов [11; 12]. Значения R_{AB} для ϕ -мезонов больше, чем значения R_{AB} для π^0 - и η - мезонов в центральных столкновениях в промежуточном диапазоне по p_T ($2 < p_T$ [ГэВ/с] < 5).

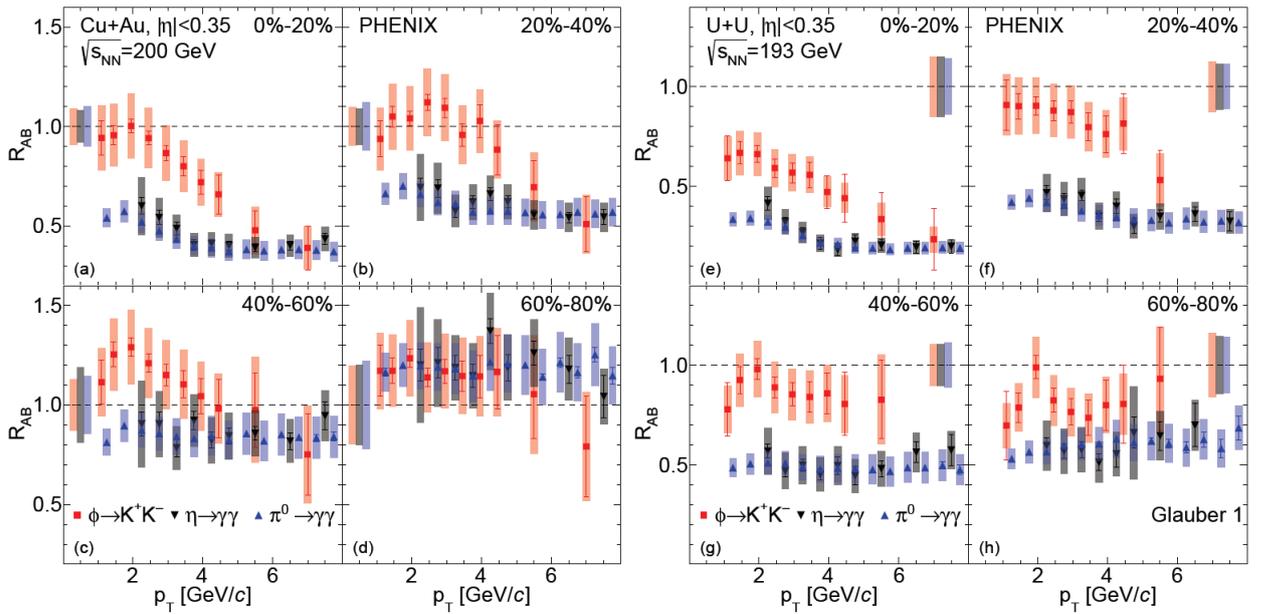


Рис. 2 — Сравнение значений факторов ядерной модификации R_{AB} для φ -мезонов со значениями R_{AB} для π^0 - и η - мезонов [11; 12], измеренными как функция p_T в Cu+Au столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и в U+U столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ в области $|\eta| < 0.35$. Здесь и далее «прямоугольники» на пунктире обозначают систематической неопределенности типа «С».

Наблюдаемые различия в уровне подавления выходов мезонов уменьшаются по мере увеличения центральности столкновений. Данные особенности образования легких адронов в промежуточном диапазоне по p_T объясняются в рамках моделей, учитывающих эффект увеличения выхода странности и механизм коалесценции тепловых партонов [4]. В центральных Cu+Au и U+U столкновениях в области больших поперечных импульсов ($p_T > 5$ GeV/c) выходы φ -, π^0 - и η - мезонов имеют одинаковый уровень подавления с учетом неопределенностей измерений. Данное наблюдение согласуется с предположением о независимости или слабой зависимости от аромата потерь энергии предфрагментационных партонов в горячей и плотной среде [A2].

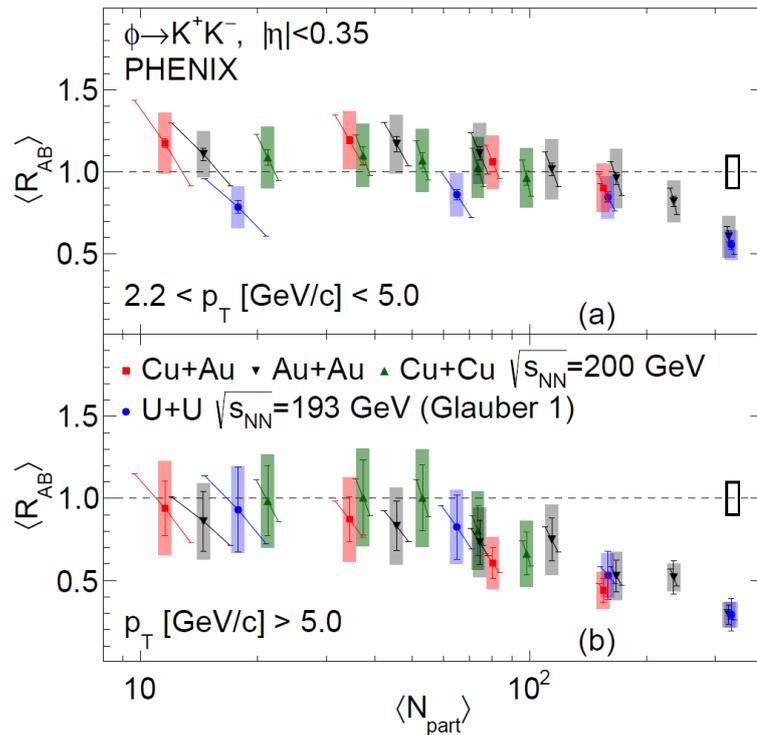


Рис. 3 — Интегральные факторы ядерной модификации $\langle R_{AB} \rangle$, измеренные для ϕ -мезонов в зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ в Cu+Cu [8], Cu+Au, Au+Au [8] столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, и в U+U столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ, интегрированные в области промежуточных поперечных импульсов $2.2 < p_T$ [ГэВ/с] < 5.0 и в области больших p_T [ГэВ/с] > 5.0 в области $|\eta| < 0.35$. Наклонные линии представляют собой коррелированные неопределенности из моделирования Глаубера методом Монте-Карло.

Для лучшего понимания особенностей образования ϕ -мезонов интегральные факторы ядерной модификации $\langle R_{AB} \rangle$ для ϕ -мезонов были измерены в зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ и представлены на рисунке 3 для различных систем взаимодействий (Cu+Au, Au+Au [8] и Cu+Cu [8] при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и U+U при $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ). Интегрирование проведено в промежуточном диапазоне по p_T ($2.2 < p_T$ [ГэВ/с] < 5.0) и в диапазоне больших p_T (p_T [ГэВ/с] > 5.0). Значения $\langle R_{AB} \rangle$ для ϕ -мезонов, полученные во всех рассмотренных системах столкновений, находятся в согласии в пределах неопределенностей измерений при близких значениях $\langle N_{part} \rangle$, что уже наблюдалось при изучении π^0 - и η - мезонов [11; 12]. Величина $\langle N_{part} \rangle$ характеризует объем области перекрытия ядер, поэтому принято считать, что она пропорциональна объему КПП, образующейся при релятивистском столкновении тяжелых ионов [5]. Таким образом, полученные результаты указывают на масштабирование рождения легких адронов, интегрированного по азимутальному углу, со средним размером области ядерного перекрытия независимо от геометрии столкновений и симметрии области ядерного перекрытия [A1].

На рисунке 4 изображено сравнение значений R_{AB} для ϕ -мезонов, измеренных в зависимости от p_T в столкновениях Cu+Au, с модельными расчетами, выполненными в генераторах AMPT [13] и PYTHIA/Angantyr [14].

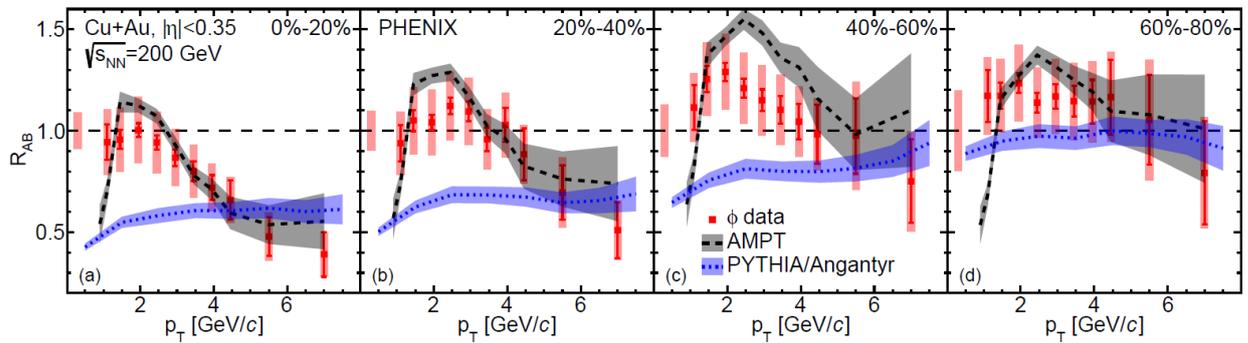


Рис. 4 — Сравнение значений R_{AB} , измеренных для ϕ -мезонов в зависимости от p_T в столкновениях Cu+Au при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области $|\eta| < 0.35$, с предсказаниями генераторов AMPT и PYTHIA/Angantyr.

Обе модели хорошо зарекомендовали себя в физике элементарных частиц. В обоих генераторах используется Лундовская модель для адронизации, но в AMPT присутствует фаза деконфамента и для адронизации также используется механизм коалесценции. Значения R_{AB} , измеренные для ϕ -мезонов в периферийных столкновениях Cu+Au, хорошо описываются расчетами, произведёнными с помощью обеих моделей PYTHIA/Angantyr и AMPT. В центральных столкновениях Cu+Au в области промежуточных p_T значения R_{AB} для ϕ -мезонов, полученные с помощью PYTHIA/Angantyr, значительно меньше, чем измеренные значения R_{AB} , тогда как модель AMPT воспроизводит измеренные значения факторов ядерной модификации. Таким образом, усредненное по азимутальному углу рождение ϕ -мезонов, измеренное в Cu+Au-столкновениях, хорошо описывается моделью AMPT, в которой в механизме образования ϕ -мезонов при умеренных p_T преобладает коалесценция пар $s\bar{s}$ [13].

На рисунке 5 представлены значения эллиптического потока v_2 для ϕ -мезонов, измеренные в зависимости от p_T в 0-20%, 20-60% Cu+Au взаимодействиях и в 0-50% U+U столкновениях. Также на рисунке 5 приведены значения эллиптического потока для ϕ -мезонов, ранее измеренные в 20-60% Au+Au столкновениях в эксперименте PHENIX [15] и в 0-30%, 30%-80% Au+Au столкновениях в эксперименте STAR [16].

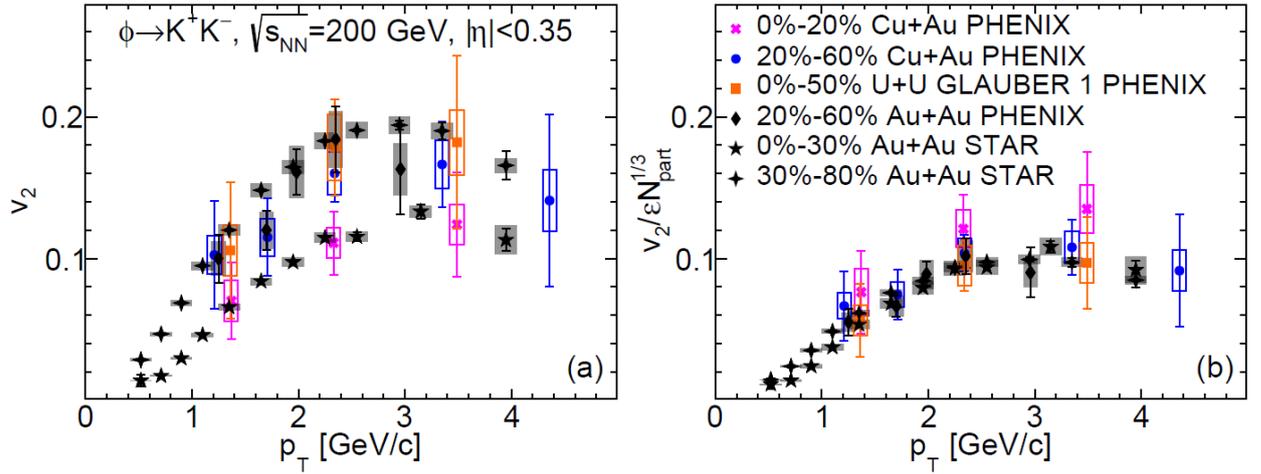


Рис. 5 — Сравнение эллиптических потоков v_2 и нормированных эллиптических потоков $v_2/(\epsilon N_{\text{part}}^{1/3})$, измеренных для ϕ -мезонов в зависимости от p_T в столкновениях Cu+Au, U+U и Au+Au [15; 16] при $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ в области $|\eta| < 0.35$.

Сравнение эллиптического потока для ϕ -мезонов в симметричной и асимметричной системах столкновений показывает, что значения v_2 подчиняются общеизвестному эмпирическому масштабированию с $\epsilon N_{\text{part}}^{1/3}$. Масштабирование с эксцентриситетом участника второго порядка ϵ представляет собой зависимость v_2 от формы области ядерного перекрытия. Фактор $N_{\text{part}}^{1/3}$ характеризует средний радиус области перекрытия ядер, который, как предполагается, пропорционален среднему радиусу КГП [5]. Это означает, что влияние начальных условий на эллиптический поток для ϕ -мезонов и тем самым на свойства КГП можно учитывать с помощью масштабного коэффициента $\epsilon N_{\text{part}}^{1/3}$. Масштабирование значений v_2 с формой и размером области перекрытия ядер предсказывается гидродинамическими расчетами эволюции КГП при низких значениях удельной сдвиговой вязкости (η/s) [A2].

Сравнение значений эллиптического потока v_2 и v_2/n_q , полученных для ϕ -мезонов в 0-20% и 20-60% Cu+Au столкновениях и 0-50% U+U столкновениях с соответствующими значениями v_2 и v_2/n_q для π^\pm -мезонов и (анти)протонов изображено на рисунках 6 - 7.

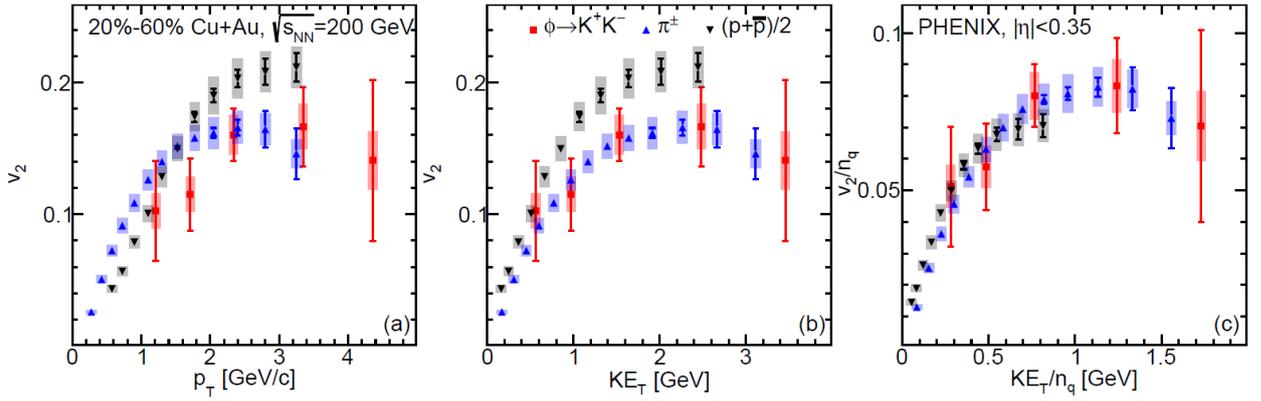


Рис. 6 — Сравнение эллиптического потока (а, б) v_2 и (в) v_2/n_q для ϕ -мезонов, измеренного в зависимости от (а) p_T , (б) KE_T и (в) KE_T/n_q в 20-60% Cu+Au столкновениях с соответствующими значениями v_2 и v_2/n_q для π^\pm -мезонов и (анти)протонов ($(p + \bar{p})/2$) [17].

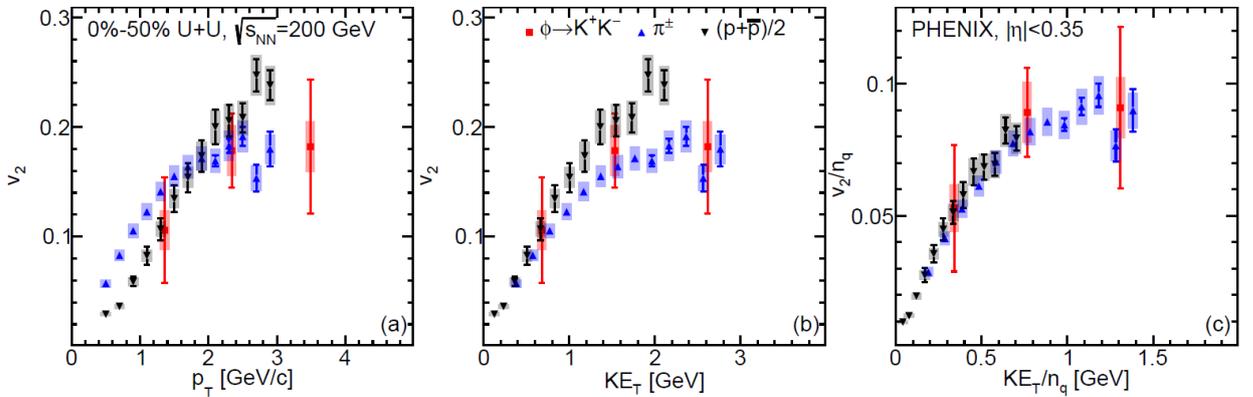


Рис. 7 — Сравнение эллиптического потока (а, б) v_2 и (в) v_2/n_q для ϕ -мезонов, измеренного в зависимости от (а) p_T , (б) KE_T и (в) KE_T/n_q в 0-50% U+U столкновениях с соответствующими значениями v_2 и v_2/n_q для π^\pm -мезонов и (анти)протонов ($(p + \bar{p})/2$) [18].

Наблюдается масштабирование адронного эллиптического потока с числом валентных кварков в адроне n_q и поперечной кинетической энергией, приходящейся на один кварк KE_T/n_q . Масштабирование с n_q объясняется с помощью моделей рекомбинации кварков, в которых партоны развивают эллиптический поток во время эволюции партонной материи, а поток адронов представляет собой сумму коллективных потоков составляющих его партонов [A1]. Меньшее сечение перерасеяния [б] для ϕ -мезонов, чем для π^\pm -мезонов и (анти)протонов, также свидетельствует в пользу развития эллиптического потока в КПП-фазе столкновения тяжелых ионов, а не в фазе адронного газа.

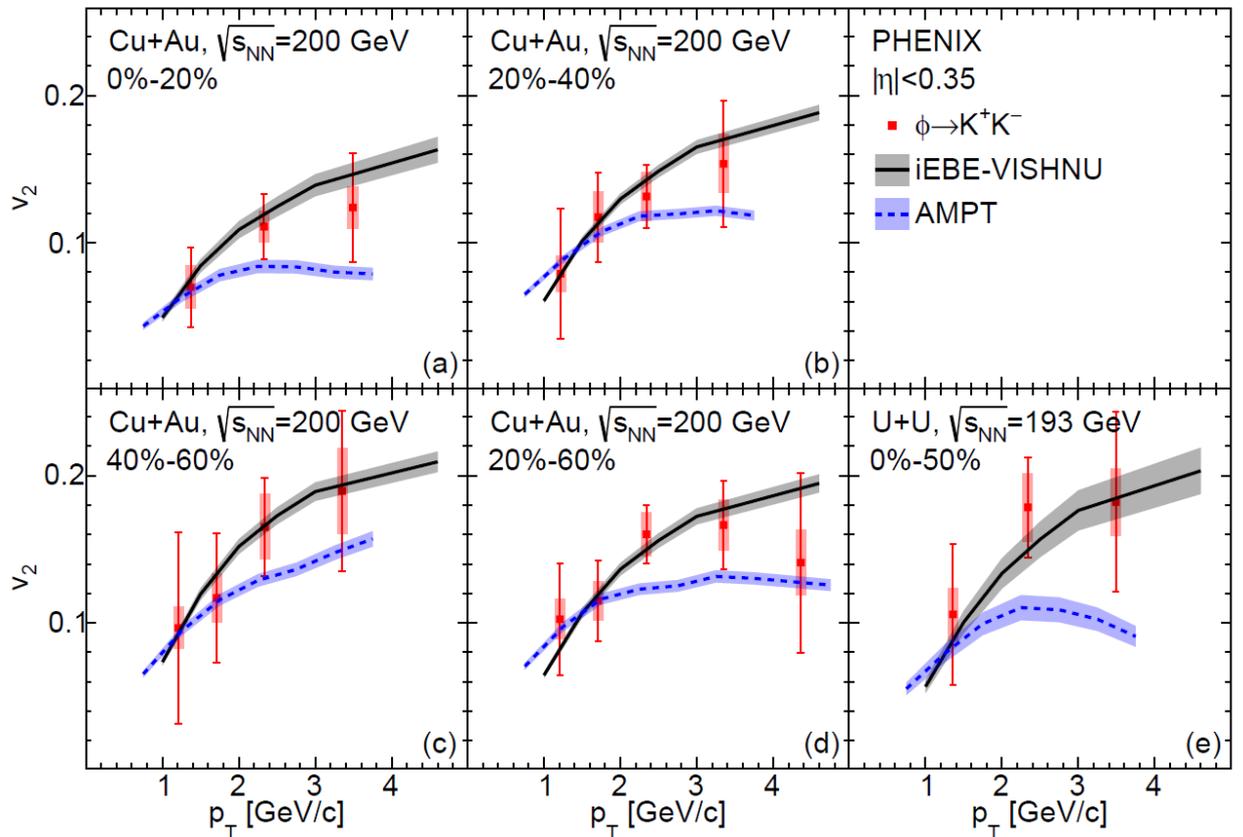


Рис. 8 — Сравнение эллиптического потока $v_2(p_T)$, измеренного для ϕ -мезонов в (а) 0-20%, (б) 20-40%, (в) 40-60%, и (д) 20-60% U+U столкновениях и в (е) 0-50% U+U столкновениях с предсказаниями гидродинамической модели iEBE-VISHNU с удельной вязкостью $\eta/s = 1/(4\pi)$ и предсказаниями модели AMPT.

На рисунке 8 представлено сравнение значений эллиптического потока, измеренных для ϕ -мезонов в зависимости от p_T , с расчетами, выполненными с помощью модели вязкой гидродинамики iEBE-VISHNU [19] (2+1)D с удельной вязкостью $\eta/s = 1/(4\pi)$ и генератора AMPT. Эллиптические потоки для ϕ -мезонов, полученные с помощью модели AMPT, согласуются в пределах погрешностей со значениями v_2 , измеренными для ϕ -мезонов в Cu+Au-столкновениях. Рассчитанные с помощью генератора AMPT значения v_2 для ϕ -мезонов в столкновениях U+U имеют меньшие значения, чем экспериментальные. С другой стороны, выполненные с помощью модели iEBE-VISHNU расчеты воспроизводят эллиптический поток, измеренный для ϕ -мезонов как в Cu+Au, так и в U+U столкновениях с высокой точностью.

Заключение

Впервые измеренные инвариантные спектры по поперечному импульсу рождения φ -мезонов, факторы ядерной модификации для φ -мезонов и коэффициенты азимутальной анизотропии второго порядка образования φ -мезонов в Cu+Au и U+U взаимодействиях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ и $\sqrt{s_{NN}} = 193$ ГэВ соответственно. Особенности рождения φ -мезонов, измеренные в столкновениях тяжелых ионов в эксперименте PHENIX, не зависят от геометрии столкновения и симметрии области ядерного перекрытия:

1. Усредненное по азимутальному углу относительно плоскости реакции рождение φ -мезонов зависит только от размера области перекрытия, в то время как эллиптический поток для φ -мезонов масштабируется с эксцентриситетом второго порядка раненых нуклонов и радиусом области ядерного перекрытия.
2. В области промежуточных p_T рождение φ -мезонов, измеренное в Cu+Au и U+U столкновениях, согласуется с предсказаниями модели рекомбинации, тогда как при больших p_T может быть объяснено потерями энергии родительских партонов в среде перед их фрагментацией.
3. Эллиптический поток, измеренный для φ -мезонов в столкновениях Cu+Au и U+U, хорошо описывается моделью (2+1)D вязкой гидродинамики с удельной сдвиговой вязкостью $\eta/s = 1/(4\pi)$.

Список литературы

1. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus–nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration [текст] / К. Adcox [и др.] // Nuclear Physics A. — 2005. — авг. — т. 757, № 1/2. — с. 184—283. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.03.086>.
2. Mitrankov, Iurii. ϕ -meson production in Cu+Au and U+U collisions [текст] / Mitrankov, Iurii, PHENIX collaboration // Phys. Rev. C. (arXiv:2207.10745). — 2022. — Vol. 1. — P. 100.
3. Enterria, D. d'. 6.4 Jet quenching [текст] / D. d'Enterria // Landolt-Börnstein - Group I Elementary Particles, Nuclei and Atoms. — 2010. — с. 471—520. URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-01539-7_16.
4. Koch, P. Strangeness in Relativistic Heavy Ion Collisions [текст] / P. Koch, B. Muller, J. Rafelski // Phys. Rept. — 1986. — т. 142. — с. 167—262.
5. Hwa, R. C. Production of strange particles at intermediate pT in central Au+Au collisions at high energies [текст] / R. C. Hwa, C. B. Yang // Physical Review C. — 2007. — май. — т. 75, № 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.75.054904>.
6. Systematic Study of Azimuthal Anisotropy in Cu+Cu and Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV [текст] / A. Adare [и др.] // Phys. Rev. C. — 2015. — т. 92, № 3. — с. 034913. — arXiv: 1412.1043 [nucl-ex].
7. Shor, A. ϕ -meson production as a probe of the Quark-Gluon Plasma [текст] / A. Shor // Phys. Rev. Lett. — 1985. — т. 54. — с. 1122—1125.
8. ϕ -meson photoproduction from nuclei [текст] / A. Sibirtsev [и др.] // Eur. Phys. J. A. — 2006. — т. 29. — с. 209—220. — arXiv: nucl-th/0606044.
9. Nuclear modification factors of ϕ mesons in d +Au, Cu+Cu, and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV [текст] / A. Adare [и др.] // Physical Review C. — 2011. — февр. — т. 83, № 2. — с. 024909. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.83.024909>.
10. The ϕ meson production from small to large systems of ion collisions 200 GeV and 193 GeV [текст] / I. M. Mitrankov [et al.] // Physica Scripta. — 2022. — Vol. 197, no. 5. — P. 054012.
11. PHENIX detector overview [текст] / К. Adcox [и др.] // Nucl. Instrum. Meth. A. — 2003. — т. 499. — с. 469—479.

12. Hooft, G. Renormalizable Lagrangians for massive Yang-Mills fields [текст]
/G. Hooft // Nuclear Physics B. — 1971. — Т. 35, № 1. — с. 167—188. URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0550321371901398>.
13. T. Muta. Foundations of Quantum Chromodynamics. World Scientific, River Edge, NJ, USA, 1998. [текст]
14. J. Bartke. Introduction to Relativistic Heavy Ion Physics. World Scientific, Hackensack, NJ, USA, 2009. [текст].