

Научная статья

УДК 539.125.4, 539.126.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19312>

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РОЖДЕНИЯ ИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АДРОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР КСЕНОНА И ВОЛЬФРАМА ПРИ ЭНЕРГИИ 2,5А ГЭВ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ BLAST-WAVE

Д. М. Ларионова , Я. А. Бердников, Д. О. Котов, Д. В. Неумин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

 dashalarior@gmail.com

Аннотация. Представлен метод анализа инвариантных спектров заряженных адронов в области больших барионных химических потенциалов, ориентированный на будущие измерения эксперимента MPD. В рамках модели blast-wave были проанализированы инвариантные спектры идентифицированных заряженных адронов $\pi^\pm$, $K^\pm$ и протонов p (данные опубликованы ранее), полученные в столкновениях Xe+W при энергии 2,5А ГэВ в пакете MPDroot с генератором UrQMD; также рассчитаны отношения выходов мезонов π^+/ π^- и K^+/ K^- . Рассмотрена применимость модели blast-wave для описания столкновений Xe+W при энергии 2,5А ГэВ. На основе интегральных отношений выходов частиц оценены значения химических потенциалов их заряда и странности. Полученные результаты свидетельствуют о наличии значительного барионного заряда в центральной области столкновения и, как следствие, о существенной барионной остановке.

Ключевые слова: заряженный адрон, инвариантный спектр, отношение выходов мезонов, химический потенциал, быстрота, барион

Финансирование: Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2025-0009).

Для цитирования: Ларионова Д. М., Бердников Я. А., Котов Д. О., Неумин Д. В. Анализ особенностей рождения идентифицированных заряженных адронов в столкновениях ядер ксенона и вольфрама при энергии 2,5А ГэВ с помощью модели blast-wave // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 3. С. 150–161. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19312>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19312>

AN ANALYSIS OF IDENTIFIED CHARGED HADRON PRODUCTION IN Xe + W COLLISIONS AT 2.5A GeV USING THE BLAST-WAVE MODEL

D. M. Larionova , Ya. A. Berdnikov, D. O. Kotov, D. V. Neumin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 dashalarior@gmail.com

Abstract. A method for analyzing invariant spectra of charged hadrons in the region of high baryon chemical potentials is presented, aimed at future measurements of the MPD experiment. Within the framework of the blast-wave model, previously published invariant spectra of identified charged hadrons ($\pi^\pm$, $K^\pm$, and p), obtained in Xe+W collisions at an energy of 2.5A GeV using the MPDroot package with the UrQMD generator, were analyzed, and the particle ratios π^+/ π^- and K^+/ K^- were calculated. The applicability of the blast-wave model to the



description of Xe+W collisions at the energy of 2.54 GeV was investigated. Chemical potentials were estimated from the integrated particle ratios. The obtained values indicated a substantial baryon density in the central region of the collision and, consequently, significant baryon stopping. The results are of a methodological nature and can be used to assess the applicability of standard approaches in the analysis of future MPD experimental data.

Keywords: MPD, NICA, STAR, QGP, blast-wave, phase diagram, nucleat matter, baryon stopping

Funding: The reported study was carried out within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (Subject Code FSEG-2025-0009).

For citation: Larionova D. M., Berdnikov Ya. A., Kotov D. O., Neumin D. V., An analysis of identified charged hadron production in Xe + W collisions at 2.54 GeV using the blast-wave model, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (3) (2026) 150–161. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19312>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Изучение фазовой диаграммы ядерной материи остается одной из ключевых задач современной физики высоких энергий. В области, соответствующей высоким температурам (порядка $T \approx 150 - 170$ МэВ) и малым значениям барионного химического потенциала ($\mu_B \approx 0$), переход адронной материи в кварк-глюонную плазму носит характер кроссовера, при котором термодинамические величины изменяются непрерывно [1, 2]. В этих условиях свойства системы надежно описываются расчетами квантовой хромодинамики (КХД) на решетке [2], а динамика образующейся среды в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов – релятивистской гидродинамикой с начальными условиями типа Бьёркена [3]. Экспериментально эта область подробно исследована в экспериментах PHENIX [4, 5] и STAR [6] при энергиях $\sqrt{s_{NN}} = 200$ ГэВ, а также в ALICE [7] при энергиях до нескольких ТэВ.

В противоположность этому, область фазовой диаграммы, которая характеризуется высокими значениями барионного химического потенциала ($\mu_B \approx 400$ МэВ) и умеренными температурами ($T \approx 100$ МэВ), остается существенно менее изученной. Теоретическое описание здесь затруднено из-за так называемой «знаковой проблемы» в решеточной КХД [8], а экспериментальные данные ограничены. Тем не менее именно в этой области ожидается фазовый переход первого рода между адронной материей и кварк-глюонной плазмой, который сопровождается скачкообразными изменениями наблюдаемых величин и восстановлением киральной симметрии [9]. Кроме того, предполагается существование критической точки, разделяющей области кроссовера и фазового перехода первого рода, однако вопрос о ее наличии и положении остается открытым [9].

Существенный вклад в экспериментальное изучение области высоких барионных плотностей внес эксперимент STAR в рамках программы Beam Energy Scan (BES I и BES II), в ходе которой были исследованы столкновения Au + Au в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}} \approx 3 - 60$ ГэВ. Одним из наиболее обсуждаемых результатов стало наблюдение немонотонного поведения отношения K^+/π^+ с максимумом («рогом») вблизи $\sqrt{s_{NN}} \approx 7 - 10$ ГэВ [10]. Кроме того, параметры кинетического вымораживания, извлекаемые из аппроксимации спектров адронов в гидродинамических моделях, демонстрируют поведение, которое согласуется с возможным наличием смешанной фазы: температура вымораживания выходит на плато в области низких энергий и затем возрастает с увеличением энергии столкновения. Такое поведение может интерпретироваться как косвенное указание на фазовый переход первого рода [10, 11].

В рамках программы BES коллаборации STAR интерпретация спектров частиц, как правило, опирается на предположение о приближенной инвариантности системы относительно продольных Лоренцевых преобразований. Такое поведение соответствует

продольному расширению системы, называемому буст-инвариантным (условия Бьёркена) [1, 3], который успешно применялся при анализе данных ультрарелятивистских столкновений при энергиях $\sqrt{s_{NN}} \approx 200$ ГэВ. Однако при низких энергиях применимость этого предположения может оказаться ограниченной вследствие существенной барионной остановки (baryon stopping) [12]: значительная часть барионного заряда остается в центральной области столкновения, а не уходит в область больших быстрот.

Дополнительно барионная остановка, приводящая к накоплению барионного заряда в центральной области, усиливает влияние изоспиновой асимметрии тяжелых ядер [12]. В условиях высокой барионной плотности это приводит к неравновесному распределению зарядов между различными типами адронов и, в частности, влияет на соотношение выходов заряженных частиц. Таким образом, изоспиновая асимметрия выступает дополнительным фактором, затрудняющим применение подходов, разработанных для высоких энергий. В совокупности с барионной остановкой эффекты изоспина указывают на возможное отклонение системы от буст-инвариантного режима и, следовательно, на ограниченную применимость моделей, основанных на условиях Бьёркена.

Таким образом, область больших значений барионных химических потенциалов представляет собой сложную задачу, в которой становятся значимыми эффекты, пренебрежимо малые при высоких энергиях, что подчеркивает необходимость получения новых экспериментальных данных.

Одним из ключевых проектов, нацеленных на изучение особенностей данной области, является эксперимент MPD (Multi-Purpose Detector) [13] по мегапроекту NICA (коллайдер в наукограде Дубне Московской области [14]). Он ориентирован на исследование столкновений тяжелых ионов в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}} \approx 3 - 11$ ГэВ, что соответствует области максимальных барионных плотностей [15]. На начальном этапе планируются эксперименты в режиме фиксированной мишени, в частности столкновения ядер ксенона и вольфрама ($\text{Xe} + \text{W}$) при энергии, соответствующей $\sqrt{s_{NN}} = 2,8$ ГэВ. Эти условия близки к параметрам столкновений ядер золота ($\text{Au} + \text{Au}$, симметричная система) при $\sqrt{s_{NN}} \approx 3$ ГэВ, исследованных в программе BES II (Beam Energy Scan II), однако использование несимметричной системы открывает дополнительные возможности для изучения влияния начальной геометрии столкновения на величину барионной остановки.

Предполагается, что степень барионной остановки чувствительна к геометрии сталкивающихся ядер. В этом контексте особый интерес представляет исследование несимметричных систем, таких как $\text{Xe} + \text{W}$. При этом близость отношений Z/A (Z, A – зарядовое и массовое числа, соответственно) в системах $\text{Xe} + \text{W}$ и $\text{Au} + \text{Au}$ позволяет минимизировать вклад изоспиновых эффектов и тем самым более надежно выделять влияние геометрии на динамику барионной остановки.

В настоящее время экспериментальные данные для установки MPD отсутствуют, и исследования проводятся на основе моделирования с использованием программного пакета MPDroot [13], включающего генератор UrQMD [16] и детальное воспроизведение отклика детекторной системы. Следует отметить, что большинство доступных вычислений выполнено в каскадном режиме UrQMD без учета гидродинамической эволюции, что обусловлено высокой вычислительной сложностью гидродинамических расчетов. В этой работе также используются данные статьи [17], полученные в каскадном режиме UrQMD.

В указанных условиях настоящее исследование направлено на разработку методики анализа спектров идентифицированных адронов в области низких энергий. В частности, спектры аппроксимируются в рамках стандартного гидродинамически мотивированного подхода (модель blast-wave [18]), что позволяет обеспечить сопоставимость с результатами программы BES эксперимента STAR (Solenoid Tracker at RHIC), который реализуется на ускорителе RHIC в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Одновременно проводится анализ отношений частиц и извлечение химических потенциалов, что дает возможность оценить применимость данного подхода в рассматриваемой области энергий.

Предлагаемый подход основан на анализе результатов моделирования и может быть в дальнейшем использован при обработке экспериментальных данных MPD.

Полученные результаты носят методический характер и не претендуют на непосредственную физическую интерпретацию. Вместе с тем их сопоставление с данными



программы BES позволяет оценить корректность работы генератора UrQMD и применимость используемых подходов моделирования в области низких энергий.

Модель blast-wave

Область применения. Поскольку в области высоких барионных плотностей применение расчетов квантовой хромодинамики на решетке существенно ограничено, для описания экспериментальных данных используются статистические (термодинамические) и гидродинамически мотивированные подходы [1]. Термодинамические модели основаны на предположении термодинамического равновесия и не требуют формирования кварк-глюонной плазмы, тогда как гидродинамически мотивированные подходы предполагают наличие коллективного расширения среды.

Одной из наиболее распространенных моделей, основанных на релятивистской гидродинамике, является модель «взрывной волны» (blast-wave model) [18], применяемая для аппроксимации инвариантных спектров частиц по поперечному импульсу p_T или массе m_T и извлечения эффективных параметров системы (температуры кинетического вымораживания T и средней скорости коллективного расширения β_T). Она успешно воспроизводит форму p_T -спектров частиц в ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов при энергиях коллайдеров RHIC (*англ.* The Relativistic Heavy Ion Collider) на энергию 200 ГэВ и LHC (*англ.* Large Hadron Collider) на энергию порядка ТэВ. Несмотря на ограничения при низких энергиях, связанные с возможным нарушением условий Бьёркена, данный подход продолжают использовать и, в частности, его применяют при анализе данных программы BES коллаборации STAR [10, 11, 19].

Физическую картину, лежащую в основе модели, можно описать следующим образом. После столкновения ионов формируется горячая и плотная система, которая быстро достигает локального термодинамического равновесия и далее эволюционирует гидродинамически. Вследствие неоднородного распределения энергии и давления возникает градиент давления, максимальный в центральной области и уменьшающийся к периферии. Этот градиент приводит к коллективному радиальному расширению системы, интерпретируемому как «взрывная волна».

В модели blast-wave предполагается, что образование частиц происходит на некоторой гиперповерхности в пространстве-времени. Частицы покидают систему при фиксированной температуре T , а их импульсные распределения определяются коллективным движением среды, которое описывается четырехскоростью $u^\mu(x)$. Для расчета спектров частиц используется формула Купера – Фрая [20]:

$$E \frac{d^3 N}{dp^3} = \frac{g}{(2\pi)^3} \int \exp\left(-\frac{u^\nu p_\nu}{T}\right) p^\mu d\sigma_\mu, \quad (1)$$

где p^μ – четырехимпульс частицы, $u^\nu = (t/\tau, u_r, u_\phi, u_z)$ – четырехскорость среды, T – эффективная температура системы, $d\sigma_\mu$ – элемент гиперповерхности.

Коллективное движение и условия Бьёркена

Важным элементом гидродинамического описания столкновений тяжелых ионов является задание начальных условий, определяющих пространственно-временные распределения энергии, барионной плотности и коллективных скоростей на ранней стадии эволюции системы [1]. Эти условия существенно зависят от энергии столкновения и степени барионной остановки, т.е. от того, какая доля продольного импульса налетающих нуклонов теряется в центральной области взаимодействия.

При относительно низких энергиях, когда барионная остановка значительна, применима гидродинамическая модель Ландау [21]. В этом случае предполагается, что налетающие ядра практически полностью теряют продольный импульс, а энергия столкновения локализуется в области перекрытия ядер. Начальное состояние системы близко к покоящемуся в системе центра масс и характеризуется сильными продольными градиентами давления, что приводит к последующему интенсивному продольному расширению. В рамках этого подхода распределение частиц по быстройроте имеет форму, близкую к Гауссовой [1].

При высоких энергиях, напротив, барионная остановка существенно ослабляется, и значительная часть нуклонов сохраняет свою продольную быстроту, покидая центральную область. В этих условиях применим подход Бьёркена [3], в котором предполагается приближенная инвариантность системы относительно продольных Лоренцевых преобразований (буст-инвариантность): переход от одной области быстрот к другой эквивалентен смене системы отсчета и не приводит к изменению локальных характеристик среды. Это означает, что процессы рождения частиц протекают одинаково в широком интервале быстрот и не выделяют предпочтительной продольной области, т.е. кривая распределения частиц по скорости имеет плато. В этих условиях продольная скорость потока частиц

$$y_L = \frac{1}{2} \ln \frac{t + u_z}{t - u_z}$$

определяется пространственно-временной скоростью

$$\eta_s = \frac{1}{2} \ln \frac{t + z}{t - z},$$

что приводит к соотношению $y_L = \eta_s$.

Таким образом, модели Ландау и Бьёркена задают два качественно различных типа начальных условий, соответствующих сильной и слабой барионной остановкам, соответственно. В реальных столкновениях, особенно в области промежуточных энергий, реализуется ситуация с частичной остановкой нуклонов, при которой ни одно из этих приближений не относится к строго применимым, и требуется более общее описание начальной стадии.

В стандартной реализации blast-wave используется приближение Бьёркена. Дополнительно предполагается, что гиперповерхность задается условием $\tau = \sqrt{t^2 - z^2} = \text{const}$ (τ – собственное время). Именно эти два предположения – $y_L = \eta_s$ и $\tau = \text{const}$ – лежат в основе применения условий Бьёркена в модели blast-wave.

Подстановка условий $y_L = \eta_s$ и $\tau = \text{const}$ в формулу Купера – Фрая [20] и интегрирование по пространственно-временной скорости η_s приводит к стандартному аналитическому виду спектра:

$$\frac{dN}{m_T dm_T} = C \int_0^R r dr m_T I_0 \left(\frac{p_T \sinh \rho}{T_0} \right) K_1 \left(\frac{p_T \cosh \rho}{T_0} \right), \quad (2)$$

где m_T – поперечная масса, $m_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2}$; T – температура кинетического вымораживания; R – радиус области перекрытия ядер; I_0 , K_1 – модифицированные функции Бесселя; причем β_T – средняя скорость расширения радиального потока.

Ограничения применимости модели при низких энергиях

Несмотря на успех модели при высоких значениях энергии, ее применение в области низких энергий требует осторожности. При энергиях коллайдеров RHIC и LHC в центральной области быстрот наблюдается приближенная буст-инвариантность, а барионный заряд в значительной степени уносится в области высоких значений их скорости. В результате в области центральных быстрот ($y \approx 0$) система оказывается почти барионно-симметричной и барионный химический потенциал μ_B мал. В этих условиях предположение $y_L = \eta_s$ служит хорошим приближением, а стандартная версия blast-wave дает корректное описание поперечных спектров.

Ситуация существенно меняется при понижении энергии столкновения. В этом случае возрастает эффект барионной остановки: значительная часть барионного заряда не уходит в область больших быстрот, а остается в центральной области столкновения. Это приводит к нижеперечисленным последствиям:

- нарушается буст-инвариантность продольного расширения;
- продольная скорость потока уже не совпадает с пространственно-временной скоростью ($y_L \neq \eta_s$);
- возникает существенная зависимость термодинамических параметров от скорости;
- барионный химический потенциал μ_B становится большим и существенно влияет на распределения частиц.



В таких условиях исходные предположения модели blast-wave перестают быть строго обоснованными. В частности, аналитическая форма спектра с функциями Бесселя (см. формулу (2)) уже не следует из корректного описания динамики, а становится лишь эффективной параметризацией.

Тем не менее, несмотря на эти ограничения, стандартный вариант blast-wave продолжает использоваться для аппроксимации экспериментальных данных, в том числе в экспериментах коллаборации STAR в рамках программ BES-I и BES-II [10, 11, 19]. Это связано с тем, что модель остается удобным инструментом для извлечения эффективных параметров, однако интерпретация этих параметров при низких энергиях требует особой осторожности.

Анализ инвариантных спектров заряженных адронов с помощью модели blast-wave

Инвариантные спектры по поперечному импульсу, полученные в работе [17] с использованием пакета MPDroot для идентифицированных заряженных адронов $\pi^\pm$, $K^\pm$ и p в столкновениях Xe + W при энергии 2,54 ГэВ в различных классах центральности, были аппроксимированы в рамках стандартной модели blast-wave. На основе проведенной аппроксимации сделана оценка параметров температуры кинетического вымораживания T и средней скорости радиального расширения β_T .

На рис. 1 представлены зависимости параметров T и β_T от центральности для различных типов частиц. Видно, что значения температуры кинетического вымораживания, полученные из спектров различных адронов, совпадают (в пределах статистических погрешностей) и составляют в среднем около 100 МэВ. Такой результат согласуется с предположением модели blast-wave о единой гиперповерхности вымораживания для всех типов частиц.

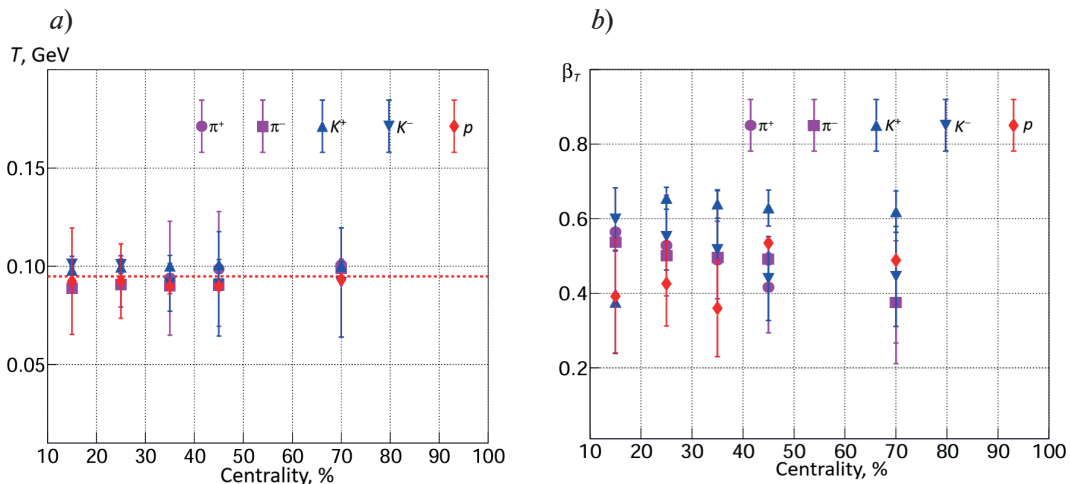


Рис. 1. Зависимости от центральности параметров модели blast-wave, извлеченных путем аппроксимации спектров идентифицированных заряженных адронов в столкновениях Xe + W.

T — температура кинетического вымораживания, красная точечная линия соответствует среднему значению $T \approx 94$ МэВ (a);
 β_T — средняя скорость радиального расширения (b)

В отличие от температуры T , значения скорости β_T демонстрируют более выраженный разброс. При этом значения параметров, полученных из спектров $\pi^\pm$, K^- и p , согласуются между собой в пределах погрешностей. Однако значения β_T , полученные для каонов K^+ , систематически превышают соответствующие значения для остальных частиц.

Наблюдаемое расхождение может указывать как на особенности описания процессов рождения K^+ в генераторе UrQMD при данной энергии, так и на возможные ограничения применимости стандартной модели blast-wave в рассматриваемых условиях. В этом смысле различие в результатах для K^+ представляет особый интерес как потенциальный индикатор отклонения системы от предположений, заложенных в модели.

Анализ отношений выходов адронов и определение их химических потенциалов заряда и странности

Для дополнительной проверки применимости модели blast-wave и анализа эффектов, связанных с нарушением условий буст-инвариантности, были исследованы отношения выходов заряженных адронов. В частности, рассмотрены отношения π^+/π^- и K^+/K^- , чувствительные к зарядовому химическому потенциалу μ_Q и химическому потенциалу странности μ_S .

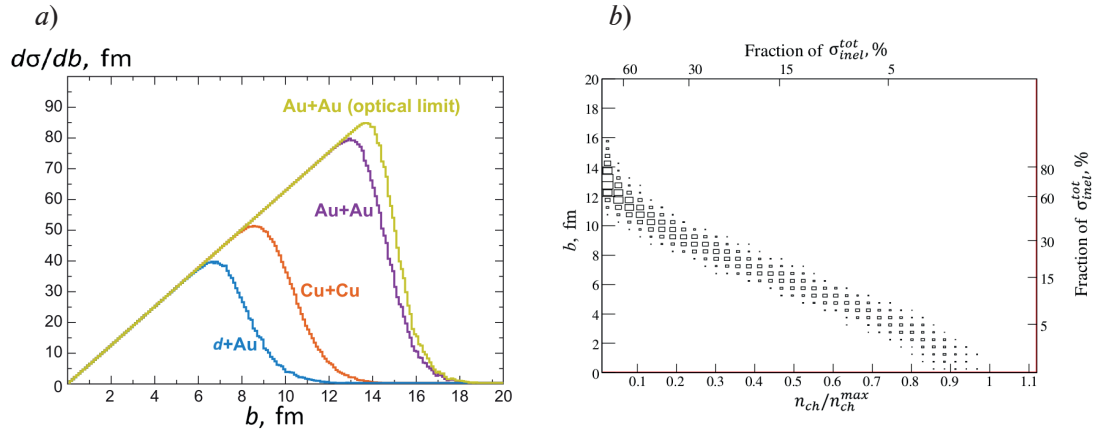


Рис. 2. Экспериментальные (черные звездочки), смоделированные (цветные символы) и аппроксимирующие (сплошная линия) зависимости отношений выходов мезонов π^+/π^- (a) и K^+/K^- (b) от поперечной массы $m_T - m_0$ для различных классов центральности. Представлены результаты моделирования столкновений Xe+W при $\sqrt{s_{NN}} = 2,87$ ГэВ [17] (a, b), результаты эксперимента STAR для системы Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 3,00$ ГэВ [10, 11] (b) и аппроксимация отношения π^+/π^- в рамках модели, учитывающей вклад кулоновского потенциала, обусловленного накоплением протонов в центральной области столкновения (a)

Полученные зависимости этих отношений от поперечной массы представлены на рис. 2 для различных классов центральности столкновений Xe + W, а также в сравнении с результатами для столкновений Au + Au при $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ, измеренными в эксперименте STAR [10, 11].

Анализ данных на рис. 2 показывает, что значения отношений π^+/π^- , полученные с помощью моделирования в MPDroot, систематически превышают единицу и демонстрирует зависимость от поперечной массы, тогда как значения отношений π^+/π^- , полученные в эксперименте STAR, ближе к единице и менее выражено зависят от кинематических переменных. Это может указывать на различия в моделировании зарядового состава системы и требует дополнительной проверки генератора UrQMD.

Отношение K^+/K^- демонстрирует сильную зависимость от поперечной массы, что нетипично для термодинамического описания и может свидетельствовать о сложной динамике рождения каонов при данной энергии. Важно отметить, что параметры β_T , извлеченные именно из спектров K^+ , существенно отличаются от таковых, полученных путем аппроксимации π^+ , K^- и p . Это может указывать на несогласованность формы спектра, относящегося к каонам K^+ , с описанием спектров других адронов в рамках параметризации с общими значениями температуры T и β_T ; это, в свою очередь, может свидетельствовать об особенностях моделирования с помощью UrQMD процессов рождения положительных каонов, а значит требует дополнительной проверки.

Значения отношения K^+/K^- , полученные через UrQMD, сопоставимы с экспериментальными данными STAR в области перекрытия по кинематике, однако этого недостаточно для надежной оценки воспроизведения зависимости от m_T , поскольку измерения в эксперименте выполнены в ограниченном диапазоне поперечной массы.

Для количественной оценки эффектов барионной остановки, на основе полученных отношений частиц были вычислены химические потенциалы заряда μ_Q и странности μ_S .



В предположении теплового равновесия отношения интегральных выходов частиц связаны с химическими потенциалами соотношениями следующего вида:

$$\frac{\pi^+}{\pi^-} \sim \exp\left(\frac{2\mu_Q}{T}\right), \quad \frac{K^+}{K^-} \sim \exp\left(\frac{2(\mu_Q - \mu_S)}{T}\right). \quad (3)$$

Установлено, что химические потенциалы демонстрируют систематическую зависимость от центральности: значения μ_Q изменяются в диапазоне от $-19,7$ до $-14,5$ МэВ, а μ_S – от $160,9$ до $175,5$ МэВ, достигая наибольших значений в периферических столкновениях. Отрицательные значения μ_Q (значительные по модулю) указывают на избыток положительного барионного заряда в центральной области столкновения. Это свидетельствует о том, что существенная часть протонов не смещается в область больших быстрот, а остается в зоне взаимодействия, что приводит к перераспределению заряда между адронами. В частности, отрицательно заряженные пионы оказываются более вероятными носителями заряда, чем положительные.

Такой результат соответствует эффекту барионной остановки, характерному для низких энергий, и указывает на отклонение системы от условий Бьёркена, предполагающих отсутствие значительной барионной плотности в центральной области быстрот.

Дополнительный вклад в наблюдаемые отношения частиц вносит изоспиновая асимметрия ядер, влияние которой усиливается вследствие накопления барионного заряда в центральной области быстрот. Для тяжелых ядер ксенона и вольфрама, в которых число нейтронов превышает число протонов, характерно преобладание d -кварков над u -кварками, что приводит к повышенной вероятности рождения отрицательно заряженных пионов π^- , по сравнению с положительно заряженными π^+ . Сравнение с системой столкновения ядер золота ($\text{Au} + \text{Au}$), исследованной в эксперименте STAR, представляет особый интерес, поскольку близость отношения Z/A в этих системах позволяет минимизировать вклад изоспиновых эффектов и выделить влияние геометрии столкновения на барионную остановку.

Таким образом, анализ отношений частиц и полученных значений химических потенциалов демонстрирует чувствительность предложенной методики к эффектам барионной остановки и изоспиновой асимметрии. Полученные результаты указывают на отклонение системы от предположений буст-инвариантности, лежащих в основе стандартной модели blast-wave, и подтверждают необходимость проверки ее применимости в области низких энергий.

Распределения по быстроте

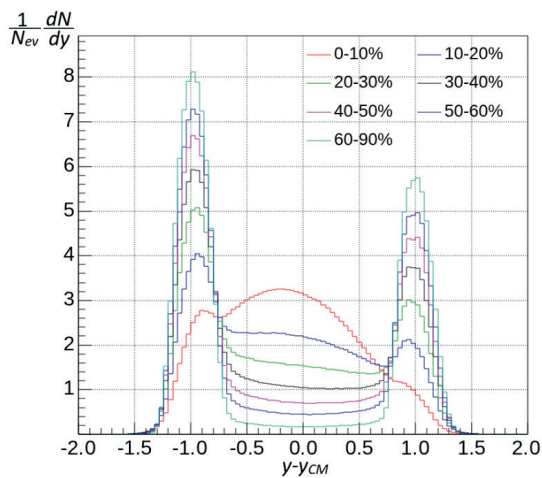


Рис. 3. Распределения частиц по быстроте, нормированные на число событий, полученные для различных центральностей столкновений $\text{Xe} + \text{W}$ при $\sqrt{s_{NN}} = 2,87$ ГэВ (получены в пакете MPDroot с генератором UrQMD)

В качестве дополнительной характеристики величины барионной остановки были построены распределения протонов, образовавшихся в столкновении, по величине $y - y_{CM}$, где y – быстрота протонов в лабораторной системе, а y_{CM} – быстрота пучка в системе центра масс (рис. 3). Поскольку рассматриваемая система является несимметричной, анализ проводился в области положительных значений быстроты ($y - y_{CM} > 0$), соответствующей направлению движения налетающего ядра.

На основе полученных распределений были вычислены значения средней быстроты протонов $\langle y \rangle_{proj}$ и средней потери быстроты

$$\langle \delta y \rangle_{proj} = y_{beam} - \langle y \rangle_{proj},$$

где y_{beam} – быстрота сталкивающихся ядер в системе центра масс, $y_{beam} = 0,99$.

Низкое значение $\langle y \rangle_{proj}$ и, соответственно, высокое значение $\langle \delta y \rangle_{proj}$ указывают на сосредоточение значительной части частиц в области малых быстрот. Это свидетельствует о сильной барионной остановке, при которой налетающие нуклоны существенно теряют продольный импульс. Напротив, значения $\langle y \rangle_{proj} \approx y_{beam}$ и $\langle \delta y \rangle_{proj} \approx 0$ соответствуют ситуации, когда барионы сохраняют значительную часть своей начальной быстроты и смещаются в область больших быстрот, что приближает систему к условиям Бьёркена.

Для центральных столкновений (0 – 10%) получены значения $\langle y \rangle_{proj} = 0,43$, $\langle \delta y \rangle_{proj} = 0,56$. Полученные результаты указывают на существенную барионную остановку в столкновениях Xe + W. Такой вывод согласуется с экспериментальными результатами STAR Collaboration, где в столкновениях Au + Au при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ получены значения $\langle \delta y \rangle = 0,71$, интерпретируемые как проявление сильной барионной остановки [11].

Заключение

В работе представлен метод анализа инвариантных спектров заряженных адронов в области больших барионных химических потенциалов. Проведен анализ в рамках стандартной модели blast-wave спектров частиц $\pi^\pm$, $K^\pm$ и p , полученных в работе [17] для столкновений Xe + W с использованием пакета MPDroot с генератором UrQMD. Путем аппроксимации спектров извлечены значения температуры кинетического вымораживания T и средней скорости радиального расширения системы частиц β_T . Показано, что значения температуры T , полученные для различных типов адронов, совпадают (в пределах погрешностей), тогда как значения β_T согласуются для частиц $\pi^\pm$, K^- и p , но существенно различаются для положительных каонов K^+ .

Дополнительно проанализировано поведение отношений π^+/π^- и K^+/K^- в зависимости от поперечного импульса и центральности столкновений, а также проведено сравнение с результатами эксперимента STAR. Полученные результаты указывают на возможные особенности моделирования положительных каонов в UrQMD, которые проявляются как в форме спектров, так и в поведении отношения K^+/K^- . Ограниченный диапазон измерений в эксперименте STAR не позволяет сделать однозначные выводы о корректности воспроизведения указанной зависимости от m_T .

При дальнейшем анализе на основе интегральных значений отношений частиц были оценены химические потенциалы заряда и странности. Полученные значения свидетельствуют о наличии значительного барионного заряда в центральной области столкновения, что указывает на существенный эффект барионной остановки. Этот вывод согласуется с результатами анализа распределений по быстройте.

Следует отметить, что в данной работе используются результаты моделирования в каскадном режиме UrQMD без учета гидродинамической эволюции, что ограничивает физическую интерпретацию полученных значений параметров и объясняет возможные отклонения от гидродинамически мотивированных моделей, таких как blast-wave. В этом смысле полученные результаты носят скорее методический характер.

Тем не менее, предложенный подход к анализу спектров и отношений частиц можно рекомендовать для использования при обработке экспериментальных данных установки MPD и служить инструментом для проверки применимости стандартных методов описания в области низких энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vogt R. Ultrarelativistic heavy-ion collisions. Amsterdam: Elsevier, 2007. 469 p.
2. Karsch F. Lattice QCD at high temperature and density (Chapter) // Plessas W., Mathelitsch L. (Eds.) Lectures on quark matter (Book Series “Lecture Notes in Physics”, Vol. 583). Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. Pp. 209–249.
3. Bjorken J. D. Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region // Physical Review D. 1983. Vol. 27. No. 1. Pp. 140–151.
4. Adcox K., Adler S. S., Aizama M. et al. (PHENIX Collaboration). PHENIX detector overview // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 469–479.



5. Adcox K., Adler S.S., Afanasyev S. et al. (PHENIX Collaboration). Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC // *Nuclear Physics A*. 2005. Vol. 757. No. 1–2. Pp. 184–283.
6. Ackermann K. H., Adams N., Adler C. et al. (STAR Collaboration). STAR detector overview // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2003. Vol. 499. No. 2–3. Pp. 624–632.
7. Acharya S., Adamová D., Adler A. et al. (ALICE Collaboration). The ALICE experiment: A journey through QCD // *The European Physical Journal C*. 2024. Vol. 84. 14 August. P. 813.
8. De Forcrand P. Simulating QCD at finite density // *Proceedings of Science. The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory – Plenary (LAT2009)*. July 26–31, 2009. Peking University, Beijing, China. 2009. Vol. 091. P. 010.
9. Stephanov M. A. QCD phase diagram and the critical point // *International Journal of Modern Physics A*. 2005. Vol. 20. No. 19. Pp. 4387–4392.
10. Adamczyk L., Adkins J. K., Agakishiev G., et al. (STAR Collaboration). Bulk properties of the medium produced in relativistic heavy-ion collisions from the Beam Energy Scan program // *Physical Review C*. 2017. Vol. 96. No. 4. P. 044904.
11. Kumar L. (for the STAR Collaboration). Systematics of kinetic freeze-out properties in high energy collisions from STAR // *Nuclear Physics A*. 2014. Vol. 931. November. Pp. 1114–1119.
12. Kimelman B. Baryon stopping and associated production of mesons in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV at STAR // *Acta Physica Polonica B. Proceeding Supplement*. 2023. Vol. 16. No. 1. P. 1-A49.
13. Abraamyan K. U., Afanasyev S. V., Alfeev V. S., et al. (MPD Collaboration). The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2011. Vol. 628. No. 1. Pp. 99–102.
14. Kekelidze V. D., Lednicky R., Matveev V. A., Meshkov I. N., Sorin A. S., Trubnikov G. V. Three stages of the NICA accelerator complex // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 668. P. 012023.
15. Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afanasyev S. V., et al. (MPD Collaboration). Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA // *The European Physical Journal A*. 2022. Vol. 58. No. 7. P. 140.
16. Petersen H., Steinheimer J., Burau G., et al. Fully integrated transport approach to heavy-ion reactions with an intermediate hydrodynamic stage // *Physical Review C*. 2008. Vol. 78. No. 4. P. 044901.
17. Бердников Я. А., Иванищев Д. А., Котов Д. О., Малаев М. В. Возможности измерения свойств идентифицированных заряженных адронов в столкновениях ядер ксенона с неподвижной вольфрамовой мишенью при энергии 2,54 ГэВ в детекторе MPD на ускорителе NICA // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2025. Т. 18. № 4. С. 177–189.
18. Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U. W. Thermal phenomenology of hadrons from 200A GeV S + S collisions // Gutbrod H. H., Rafelski J. (Eds.) *Particle production in highly excited matter*. Boston: Springer, 1993. Pp. 175–206.
19. Adam J., Adamczyk L., Adams J. R., et al. (STAR Collaboration). Strange hadron production in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27, \text{ and } 39$ GeV // *Physical Review C*. 2020. Vol. 102. No. 3. P. 034909.
20. Cooper F., Frye G. Single-particle distribution in the hydrodynamic and statistical thermodynamic models of multiparticle production // *Physical Review D*. 1974. Vol. 10. No. 1. Pp. 186–189.
21. Belenkij S. Z., Landau L. D. Hydrodynamic theory of multiple production of particles // *Il Nuovo Cimento*. 1956. Vol. 3. No. 1 supplement. Pp. 15–31.

REFERENCES

1. Vogt R., *Ultrarelativistic heavy-ion collisions*, Elsevier, Amsterdam, 2007.
2. Karsch F., Lattice QCD at high temperature and density (Ch.), In book: Plessas W., Mathelitsch L. (Eds.) *Lectures on quark matter* (Book Series “Lecture Notes in Physics”, Vol. 583), Springer, Berlin, Heidelberg (2002) 209–249.
3. Bjorken J. D., Highly relativistic nucleus-nucleus collisions: The central rapidity region, *Phys. Rev. D*. 27 (1) (1983) 140–151.

4. Adcox K., Adler S. S., Aizama M., et al. (PHENIX Collaboration), PHENIX detector overview, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 499 (2–3) (2003) 469–479.
5. Adcox K., Adler S. S., Afanasyev S. et al. (PHENIX Collaboration), Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC, Nucl. Phys. A. 757 (1–2) (2005) 184–283.
6. Ackermann K. H., Adams N., Adler C., et al. (STAR Collaboration), STAR detector overview, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 499 (2–3) (2003) 624–632.
7. Acharya S., Adamová D., Adler A., et al. (ALICE Collaboration), The ALICE experiment: A journey through QCD, Eur. Phys. J. C. 2024. Vol. 84. P. 813.
8. De Forcrand P., Simulating QCD at finite density, Proc. Sci.: The XXVII Int. Symp. on Lattice Field Theory – Plenary (LAT2009). July 26–31, 2009. Peking University, Beijing, China. 091 (2009) 010.
9. Stephanov M. A., QCD phase diagram and the critical point, Int. J. Mod. Phys. A. 20 (19) (2005) 4387–4392.
10. Adamczyk L., Adkins J. K., Agakishiev G., et al. (STAR Collaboration), Bulk properties of the medium produced in relativistic heavy-ion collisions from the Beam Energy Scan program, Phys. Rev. C. 96 (4) (2017) 044904.
11. Kumar L. (for the STAR Collaboration), Systematics of kinetic freeze-out properties in high energy collisions from STAR, Nucl. Phys. A. 931 (Nov) (2014) 1114–1119.
12. Kimelman B., Baryon stopping and associated production of mesons in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 3.0$ GeV at STAR, Acta Phys. Pol. B – Proc. Suppl. 16 (1) (2023) 1-A49.
13. Abraamyan K. U., Afanasyev S. V., Alfeev V. S., et al. (MPD Collaboration), The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 628 (1) (2011) 99–102.
14. Kekelidze V. D., Lednicky R., Matveev V. A., et al., Three stages of the NICA accelerator complex, J. Phys. Conf. Ser. 52 (2016) 012023.
15. Abgaryan V., Acevedo Kado R., Afanasyev S. V., et al. (MPD Collaboration), Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA, Eur. Phys. J. A. 58 (7) (2022) 140.
16. Petersen H., Steinheimer J., Burau G., et al., Fully integrated transport approach to heavy-ion reactions with an intermediate hydrodynamic stage, Phys. Rev. C. 78 (4) (2008) 044901.
17. Berdnikov Ya. A., Ivanishchev D. A., Kotov D. O., Malaev M. V., Feasibility to measure the properties of identified charged hadrons in collisions of xenon nuclei with a fixed tungsten target at an energy of 2.5A GeV in the MPD detector at the NICA collider, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (4) (2025) 177–189 (in Russian).
18. Schnedermann E., Sollfrank J., Heinz U. W., Thermal phenomenology of hadrons from 200A GeV S + S collisions, In book: Gutbrod H. H., Rafelski J. (Eds.) Particle production in highly excited matter, Springer, Boston (1993) 175–206.
19. Adam J., Adamczyk L., Adams J. R., et al. (STAR Collaboration), Strange hadron production in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27, \text{ and } 39$ GeV, Phys. Rev. C. 102 (3) (2020) 034909.
20. Cooper F., Frye G., Single-particle distribution in the hydrodynamic and statistical thermodynamic models of multiparticle production, Phys. Rev. D. 10 (1) (1974) 186–189.
21. Belenkij S. Z., Landau L. D., Hydrodynamic theory of multiple production of particles, Nuovo Cim. 3 (Suppl. 1) (1956) 15–31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛАРИОНОВА Дарья Максимовна — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

dlar@bk.ru

ORCID: 0009-0007-7019-5586



БЕРДНИКОВ Ярослав Александрович — доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

berdnikov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-0309-5917

КОТОВ Дмитрий Олегович — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

dmitriy.kotov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3395-0454

НЕУМИН Дмитрий Власович — студент Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

neumin.dv@mail.ru

THE AUTHORS

LARIONOVA Daria M.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

dlar@bk.ru

ORCID: 0009-0007-7019-5586

BERDNIKOV Yaroslav A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

berdnikov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0003-0309-5917

KOTOV Dmitry O.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

dmitriy.kotov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3395-0454

NEUMIN Dmitry V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

neumin.dv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20.04.2026. Одобрена после рецензирования 19.05.2026. Принята 19.05.2026.

Received 20.04.2026. Approved after reviewing 19.05.2026. Accepted 19.05.2026.