begindocument/before

ОТНОШЕНИЯ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ φ, K и π-МЕЗОНОВ ДЛЯ $A + A$ СТОЛКНОВЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ $\sqrt{s_{NN}} = 39$ ГэВ — 5.44 ТэВ И ГИПОТЕЗА ОБ ОБЩЕМ ИСТОЧНИКЕ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ

©2026 Ольга Шапошникова,[1,*] Александра Марова,[2,†] и Григорий Феофилов[2,‡]

[1] *Московский государственный университет, Москва, Россия*

[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Мы приводим результаты анализа отношений значений средней плотности поперечной энергии $\langle dE_\perp/dy\rangle$ для идентифицированных мезонов (φ, K и π), образующихся в самых центральных Au + Au, Pb + Pb и Xe + Xe столкновениях в диапазоне энергий от $\sqrt{s_{NN}} = 39$ ГэВ до 5.44 ТэВ. Наблюдаемая независимость этих отношений от $\sqrt{s_{NN}}$ может свидетельствовать об универсальности механизмов рождения частиц. Полученные результаты обсуждаются в рамках обобщенной мультипомеронной модели слияния кварк-глюонных струн.

I. ВВЕДЕНИЕ

В наших предыдущих работах [1–3] мы начали анализ вкладов различных идентифицированных частиц в среднюю поперечную энергию $\langle dE_\perp/dy\rangle$ в центральных Au + Au и Pb + Pb столкновениях при энергиях от RHIC до LHC (до $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ). Было показано, что отношение поперечной энергии для φ-мезонов к аналогичной наблюдаемой для ряда других частиц с различным кварковым составом остается практически

*E-mail:shaposhnikova.om23@physics.msu.ru

†E-mail:aleksandra.marova@gmail.com

‡E-mail:g.feofilov@spbu.ru

постоянным в широком диапазоне энергий. В данной статье мы расширяем диапазон анализируемых данных вплоть до энергий LHC $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ, включая результаты по Xe + Xe столкновениям, и фокусируемся на проверке гипотезы об универсальном источнике рождения мезонов (π, K, φ). Ниже представлены результаты наших оценок средней плотности поперечной энергии для φ, K и π-мезонов, образующихся в самых центральных Au + Au, Pb + Pb и Xe + Xe столкновениях в диапазоне энергий от $\sqrt{s_{NN}}$ = 39 ГэВ до 5.44 ТэВ.

II. ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И КОНЦЕПЦИЯ КЛАСТЕРА КВАРК-ГЛЮОННЫХ СТРУН

Средняя плотность поперечной энергии для каждого типа идентифицированных частиц в центральной области быстрот ($|y| < 0.5$) вычисляется по формуле:

$$\left\langle \frac{dE_\perp}{dy} \right\rangle = \langle m_\perp \rangle \frac{dN}{dy}. \tag{1}$$

Здесь dN/dy — средний выход частиц (множественность), а $\langle m_\perp \rangle$ — средняя поперечная масса частицы, определяемая как $\langle m_\perp \rangle = \sqrt{m^2 + \langle p_\perp \rangle^2}$. Для анализа использовались опубликованные экспериментальные данные коллабораций ALICE, STAR и NA49 (из базы HEPData) для наиболее центральных (0–5%) столкновений Au + Au, Pb + Pb и Xe + Xe. В тех случаях, когда значения среднего поперечного импульса $\langle p_\perp \rangle$ не были доступны напрямую, мы проводили аппроксимацию экспериментальных спектров поперечного импульса [1]. Вычисленные значения $\langle dE_\perp/dy \rangle$ для π, K и φ-мезонов были проанализированы в зависимости от $\sqrt{s_{NN}}$ в диапазоне от 39 ГэВ до 5.44 ТэВ.

$$\left\langle \frac{dE_\perp}{dy} \right\rangle = Q \cdot (\sqrt{s_{NN}})^n. \tag{2}$$

На рис. 1 приведены значения плотности поперечных энергий $\langle dE_\perp/dy \rangle$, нормированные на соответствующее среднее число пар нуклонов-участников N_{part} в самых центральных классах Au + Au, Pb + Pb и Xe + Xe столкновений. Аппроксимация экспериментальных точек рис. 1 дает следующие значения показателя степени n для случая π, K и φ-мезонов соответственно: $n(\pi) = 0.34 \pm 0.01$, $n(K) = 0.35 \pm 0.002$, $n(\varphi) = 0.34 \pm 0.01$. Для этих экспериментальных средних значений плотности поперечных энергий $< dE_\perp/dy >$ φ-мезонов и величин $< dE_\perp/dy >$ частиц ν, можно определить

соответствующие отношения:

$$R_{exp}^{\varphi\nu} = < dE_\perp/dy >_\varphi \, / \, < dE_\perp/dy >_\nu \tag{3}$$

В рамках обобщенной модели мультипомеронного обмена с учетом эффектов коллективности [4] ранее было получено качественное описание экспериментальных результатов ALICE [6] по выходам мультистранных адронов в центральной области быстрот в pp, p + Pb и Pb + Pb столкновениях при энергии 2.76 ТэВ на LHC. В рамках модели предполагается, что в $A + A$ столкновениях при высоких энергиях, в результате сильного взаимодействия между партонами, формируются кварк-глюонные струны, которые в случае большой плотности сливаются [5] и образуют кластеры. Последние характеризуются повышенной интенсивностью цветового поля, что ведет к увеличению выхода частиц, содержащих странные кварки. Для анализа полученных нами результатов по отношениям поперечных энергий в области центральных быстрот для частиц с различным кварковым составом, мы используем концепцию их рождения из одного такого кластера струн, образовавшегося в центральных (0-5%) ядро-ядерных столкновениях. При этом, согласно модифицированному механизму Швингера [7], [8], выход частиц типа ν с массой m_ν и поперечным импульсом $p_\perp$ из одного кластера с эффективным коэффициентом натяжения t_{eff}. можно определить как:

$$dN_\nu/dy \sim (2S_\nu + 1) \cdot \exp\left(-\frac{\pi(p_t^2 + m_\nu^2)}{t_{\rm eff}}\right) \tag{4}$$

где S_ν — спин частицы.

Ранее, в рамках обобщенной модели мультипомеронного обмена, в анализе данных [6] при энергии столкновений на пару нуклонов $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ было получено для класса самых центральных столкновений значение коэффициента эффективного натяжения струнного кластера $t_{eff} = 1.92 \pm 0.05$ (см. рис. 15 в работе [4]). Независимую оценку коэффициента t_{eff}^ν можно получить[2] для частиц сорта ν из выражения (4) и (5), используя значения отношений средних поперечных энергий φ-мезонов к значениям $< dE_\perp/dy >$ для π и K-мезонов:

$$t_{eff}^\nu = \frac{\pi(< m_\perp >_\nu^2 - < m_\perp >_\varphi^2)}{\ln\left(R_{\rm exp}^{\varphi\nu} \cdot \left(\frac{(2S_\nu+1)\cdot<m_\perp>_\nu}{(2S_\varphi+1)\cdot<m_\perp>_\varphi}\right)\right)}. \tag{5}$$

Как видно из рис. 2, значения t_{eff}, извлеченные по ф.(5) из отношений $< dE_\perp^\varphi/dy >/< dE_\perp^\nu/dy >$ для двух различных типов частиц (K- и π- мезонов), совпадают в пределах погрешностей и имеют одинаковую тенденцию к возрастанию с величиной $\sqrt{s_{NN}}$.

Последнее может быть связано с увеличением числа морских струн и формированием кластеров с более сильным цветовым полем.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было получено, что для частиц (π, K, φ) с различным кварковым составом с увеличением $\sqrt{s_{NN}}$ для значений $< dE_{\perp}/dy >$ выполняется рост по единому степенному закону ($n \approx 0.34$). Соответственно, постоянство отношений $< dE_{\perp}/dy >$ для этих частиц может указывать на универсальность механизма их рождения в центральных ядро-ядерных столкновениях Установлено, что восстановленные в рамках модели мультпомеронного обмена значения эффективных коэффициентов натяжения (t_{eff}) для струнного кластера практически совпадают для случаев рождения π, K и φ-мезонов, что не противоречит гипотезе универсального механизма их рождения в интенсивных цветовых полях образующих струнных кластеров. Также обнаружен рост t_{eff} с энергией столкновения $\sqrt{s_{NN}}$, что может быть связано с увеличением числа морских струн и формированием кластеров с более сильным цветовым полем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В. Коваленко за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта ID: 153212394.

---

1. O. Shaposhnikova, A. Marova, and G. Feofilov, Phys. Part. Nucl. **55**, 1134 (2024).
2. O. Shaposhnikova, A. Marova, and G. Feofilov, Phys. At. Nucl. **88**, Suppl. 4, 830 (2025).
3. O. Shaposhnikova, A. Marova, and G. Feofilov, Physics of Particles and Nuclei, **57**, No. 3, pp. 332–337(2026).
4. V. Kovalenko, G. Feofilov, A. Puchkov, and F. Valiev, Universe **8**, 246 (2022).
5. M. A. Braun, J. Dias De Deus, A. S. Hirsch et al., Phys. Rep. **599**, 1 (2015).
6. ALICE Collaboration. Nature Phys **13**, 535–539 (2017).
7. N. Armesto, D. A. Derkach and G. A. Feofilov. Phys. Atom. Nucl.**71**, 2087–2095 (2008).
8. J. S. Schwinger. Phys. Rev.**82**, 664–679 (1951).

RATIO OF THE AVERAGE TRANSVERSE ENERGY DENSITY OF π, K AND φ-MESONS FOR A + A COLLISIONS IN THE RANGE $\sqrt{s_{NN}}$ = 39 GeV - 5.44 TeV AND THE HYPOTHESIS OF A COMMON SOURCE OF PARTICLE PRODUCTION

O.Shaposhnikova, A.Marova, G. Feofilov

We present the results of an analysis of the ratios of the average transverse energy density values $\langle dE_{\perp}/dy \rangle$ for the identified mesons (φ, K, and π) produced in the most central Au + Au, Pb + Pb, and Xe + Xe collisions in the energy range from $\sqrt{s_{NN}}$ = 39 GeV to 5.44 TeV. The observed similarity in the behavior of the ratios (independence on $\sqrt{s_{NN}}$) may indicate the universality of the particle production mechanisms. The results obtained are discussed within the framework of the generalized multipomeron model of quark-gluon string fusion.

Рис. 1. Зависимость от $\sqrt{s_{NN}}$ величин $\langle dE_{\perp}/dy \rangle$, полученных для φ, π и K-мезонов в области средних быстрот ($|y| < 0.5$) для класса центральных (0-5%) Au + Au, Pb + Pb, Xe + Xe столкновений. Здесь и на рис. 2 мы приводим только статистические неопределенности, систематические оцениваются как не превышающие 10%.

Рис. 2. Значения эффективного коэффициента натяжения (t_{eff}) струнного кластера, образованного в центральных (0–5%) Au + Au, Pb + Pb, Xe + Xe столкновениях при энергиях от $\sqrt{s_{NN}} = 39$ ГэВ до 5.44 ТэВ. Значения t_{eff} получены по ф.(5) для случая двух различных типов частиц (K- и π- мезонов).

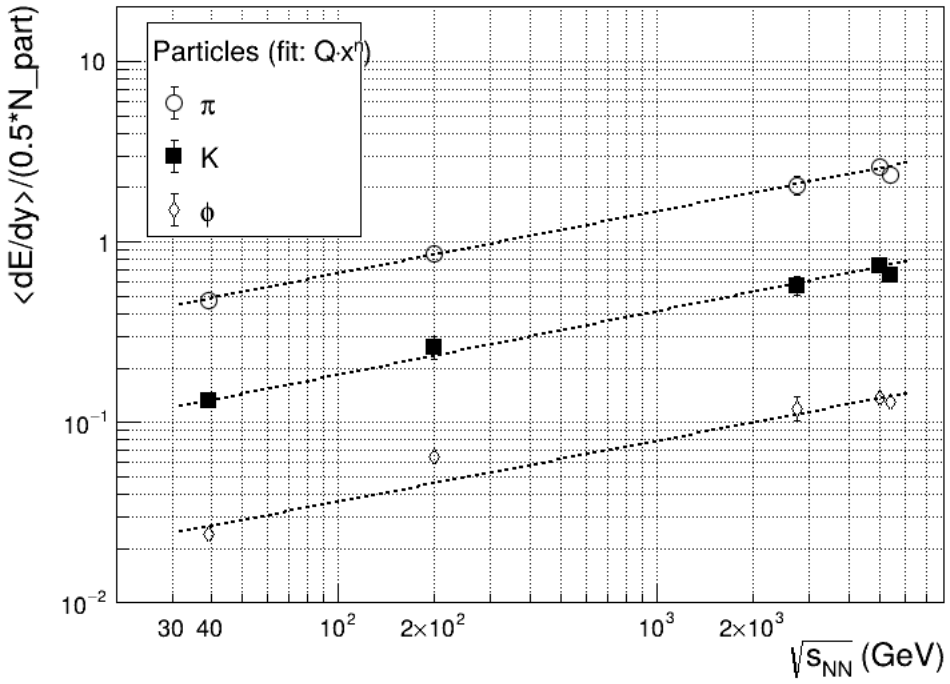


Рис. 1: Зависимость от $\sqrt{s_{NN}}$ величин $\langle dE_\perp/dy\rangle$, полученных для φ, π и K-мезонов в области средних быстрот ($|y| < 0.5$) для класса центральных (0-5%) Au + Au, Pb + Pb, Xe + Xe столкновений. Здесь и на рис. 2 мы приводим только статистические неопределенности, систематические оцениваются как не превышающие 10%.

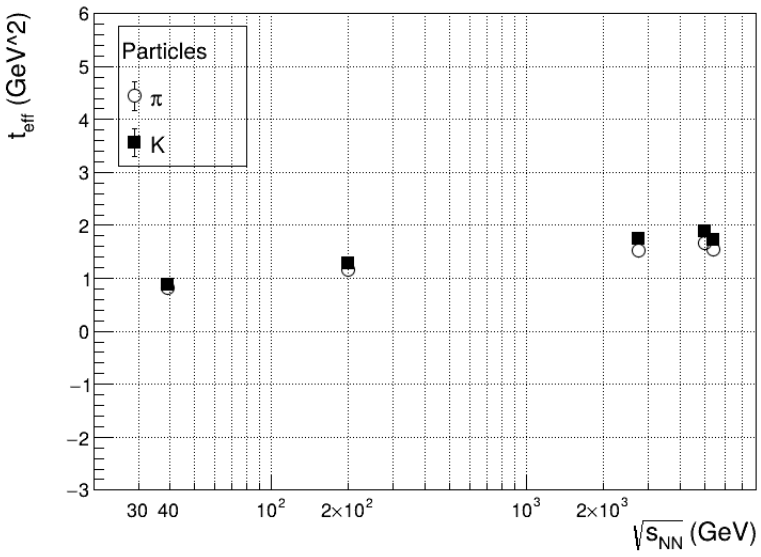


Рис. 2: Значения эффективного коэффициента натяжения (t_{eff}) струнного кластера, образованного в центральных (0–5%) Au + Au, Pb + Pb, Xe + Xe столкновениях при энергиях от $\sqrt{s_{NN}}$ = 39 ГэВ до 5.44 ТэВ. Значения t_{eff} получены по ф.(5) для случая двух различных типов частиц (K- и π- мезонов).

.