

Хусниддин Косимович Олимов
Физико-технический институт АН РУз, профессор
Кахорова Азиза Нуридиновна
Самаркандский государственный университет им. Ш.Рашидова,
базовый докторант
azizakakhorova@gmail.com

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ $p+Pb$, $Xe+Xe$ И $Pb+Pb$ СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Аннотация. В данной работе были изучены зависимости коллективных параметров $p+Pb$ столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, $Xe+Xe$ столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ и в $Pb+Pb$ столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ и 2.76 ТэВ от центральности и энергии столкновений. Полученные значения коллективных параметров сталкивающихся систем показали выраженную зависимость от энергии столкновения и среднего числа нуклонов-участников столкновения, $\langle N_{part} \rangle$.

Ключевые слова: столкновения тяжелых ионов при высоких энергиях на БАК, кварк-глюонная плазма, распределение поперечного импульса, функция распределения Максвелла-Больцмана.

Olimov Xusniddin Kosimovich
O'zFA fizika-texnika instituti, professor
Kaxorova Aziza Nuridinovna
Sh. Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti, tayanch doktorant

KATTA ADRON KOLLAYDERIDA YUQORI ENERGIYALI $p+Pb$, $Xe+Xe$ VA $Pb+Pb$ TO'QNASHUVLARNING KOLLEKTIV PARAMETRLARI

Annotatsiya. Mazkur ishda $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV energiyadagi $p+Pb$, $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ TeV energiyadagi $Xe+Xe$ va $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ va 2.76 TeV energiyadagi $Pb+Pb$ to'qnashuvlarning kollektiv hossalari o'rganildi. To'qnashuvchi tizimlarning kollektiv parametrlarining olingan qiymatlari to'qnashuv energiyasiga va to'qnashuvda ishtirok etuvchi nuklonlarning o'rtacha soniga, $\langle N_{part} \rangle$, aniq bog'liqligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: yuqori energiyali og'ir ionlar to'qnashuvi, kvark-gluon plazma, ko'ndalang impuls taqsimoti, Maksvell-Boltsmann taqsimot funksiyasi.

Olimov Xusniddin Kosimovich
Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan
Kakhorova Aziza Nuridinovna
Samarkand State University named after Sh. Rashidov, PhD student

COLLECTIVE PARAMETERS IN HIGH ENERGY $p+Pb$, $Xe+Xe$ AND $Pb+Pb$ COLLISIONS AT THE LARGE HADRON COLLIDER

Abstract. In this paper, the dependences of the collective parameters in $p+Pb$ collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV, $Xe+Xe$ collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ TeV, and in $Pb+Pb$ collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV and 2.76 TeV on the centrality and energy of the collisions were studied. The obtained values of the collective parameters of the colliding systems demonstrated a clear dependence on the energy of the collision and the average number of participant nucleons involved in the collision, $\langle N_{part} \rangle$.

Keywords: heavy-ion collisions at the LHC, quark–gluon plasma, transverse momentum distribution, Maxwell–Boltzmann distribution function.

Введение

В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях в таких коллайдерах как Релятивистский коллайдер тяжелых ионов (РКТИ, Брукхейвенская национальная лаборатория, США) и Большой адронный коллайдер (БАК, Европейский совет ядерных исследований, Швейцария) образуется кварк-глюонная плазма (КГП) – особое состояние материи, состоящее из кварков и глюонов, находящихся в свободном состоянии.

Фитируя экспериментальные спектры поперечного импульса, p_T , частиц ($\pi^\pm$, $K^\pm$, p и $\bar{p}$) с помощью различных теоретических и феноменологических моделей, можно извлечь важные физические параметры системы, такие как температура (T_0) и средняя скорость поперечного потока ($\langle \beta_T \rangle$) на стадии кинетического вымораживания системы.

Данная работа посвящена изучению зависимости коллективных параметров столкновений тяжелых ионов на БАК от энергии и центральности столкновений.

Литературный обзор

При анализе спектров поперечного импульса частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях, используются различные термодинамические и феноменологические функции, такие как термодинамически согласованная и несогласованная функция Цаллиса, функция Хагедорна [1,2]. Распределение поперечного импульса частиц, образующихся в столкновениях при высоких энергиях, можно разделить на две части: область низких и высоких значений p_T , в которых в основном доминируют мягкие и жесткие процессы соответственно.

Область низких значений $p_T \leq 1$ ГэВ/с образующихся частиц часто исследуется для изучения коллективного поведения сталкивающихся систем, поскольку частицы с таким низким значением p_T находятся под непосредственным воздействием созданной среды и обладают гидродинамическим течением, что приводит к экспоненциальному распределению p_T частиц в области низких p_T .

С другой стороны, область $p_T > 1$ ГэВ/с значительно «загрязнена» частицами, возникающими в результате процессов жесткого рассеяния (например, жесткого кварк-кваркового рассеяния), которые приводят к появлению степенных хвостов в p_T -спектрах частиц.

Методология исследования

В настоящей работе мы проводим одновременное фитирование с помощью распределения Максвелла-Больцмана с поперечным потоком, приведенного в уравнении (1), экспериментальных распределений поперечных импульсов изучаемых видов частиц, измеренных с помощью коллаборации ALICE в Pb+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ ТэВ [3], Pb+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ [4], Xe+Xe столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ [5], и в p+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ [6]:

$$\frac{1}{2\pi N_{ev} p_T} \frac{d^2 N}{dy d p_T} = C \langle \gamma_T \rangle \langle m_T - p_T \langle \beta_T \rangle \rangle \left[\exp \left(\frac{-\langle \gamma_T \rangle \langle m_T - p_T \langle \beta_T \rangle \rangle}{T_0} \right) \right], \quad (1)$$

где $C = \frac{gV}{N_{ev}(2\pi)^3}$ - нормировочный параметр, $\langle \gamma_T \rangle \geq 1/\sqrt{1 - \langle \beta_T^2 \rangle}$, $\langle \beta_T \rangle$ - средняя скорость поперечного потока, T_0 - температура кинетического вымораживания системы.

Фитирование проведено с использованием метода минимума χ^2 с помощью программы *Origin 9.1 Data Analysis and Graphing Software*. При комбинированных (одновременных) фитированиях параметры T_0 и $\langle \beta_T \rangle$ выбираются в качестве общих параметров для исследуемых видов частиц.

В данной работе были использованы следующие интервалы значений p_T : [0.5-1] ГэВ/с для $\pi^{+} + \pi^{-}$, [0.2-1] ГэВ/с для $K^{+} + K^{-}$, и [0.3-1] ГэВ/с для $p + \bar{p}$. Параметры T_0 и $\langle \beta_T \rangle$ были выбраны общими параметрами для всех типов частиц.

Экспериментальные результаты и их анализ

Рис. 1 и 2 демонстрируют зависимость средней скорости поперечного потока, $\langle \beta_T \rangle$, и температуры кинетического вымораживания, T_0 , от среднего числа нуклонов-участников, $\langle N_{part} \rangle$, для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ и p+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, полученную с помощью распределения Максвелла-Больцмана с внедренным поперечным потоком (ур. (1)) для значений интервалов p_T до 1 ГэВ/с.

Из рис. 1 видно, что значения $\langle \beta_T \rangle$ увеличиваются с увеличением $\langle N_{part} \rangle$ во всем диапазоне $\langle N_{part} \rangle$ (за исключением первого значения $\langle N_{part} \rangle$, соответствующего более периферийным столкновениям) для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, и Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ.

Как показано на рис. 1, средняя поперечная скорость потока, $\langle \beta_T \rangle$, демонстрирует аналогичные зависимости от среднего числа участвующих протонов, $\langle N_{part} \rangle$, для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, и Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ: сначала $\langle \beta_T \rangle$ увеличивается до высокой степени в нижнем диапазоне $\langle N_{part} \rangle$, затем рост $\langle \beta_T \rangle$ значительно уменьшается с увеличением $\langle N_{part} \rangle$, демонстрируя почти платоподобное поведение в диапазоне больших значений $\langle N_{part} \rangle$.

В случае p+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, как следует из рис. 1(b), $\langle\beta_T\rangle$ также увеличивается с увеличением значений $\langle N_{part}\rangle$. Однако, платоподобное поведение для p+Pb столкновений на рис. 1(a) не обнаружено, что скорее всего связано с малыми значениями $\langle N_{part}\rangle$ по сравнению со значениями $\langle N_{part}\rangle$ на рис. 1(a) для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, и Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ.

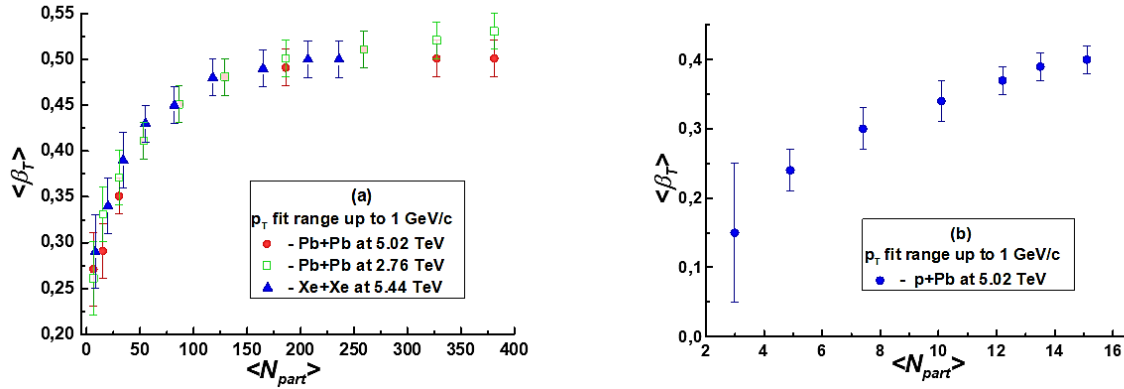


Рисунок 1. Зависимость средней скорости поперечного потока, $\langle\beta_T\rangle$, от числа нуклонов-участников $\langle N_{part}\rangle$ для (a) Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ и Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ и для (b) p+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, полученная с помощью функции распределения Максвелла-Больцмана с внедрённым поперечным потоком для диапазона $p_T < 1$ ГэВ/с.

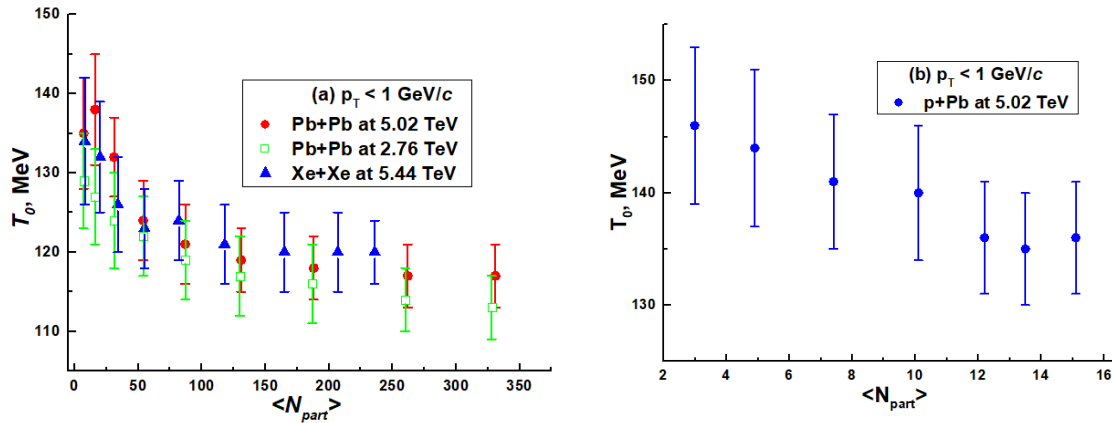


Рисунок 2. Зависимость температуры кинетического вымораживания, T_0 , от числа нуклонов-участников $\langle N_{part}\rangle$ для (a) Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ и Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ и для (b) p+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, полученная с помощью функции распределения Максвелла-Больцмана с внедрённым поперечным потоком для диапазона $p_T < 1$ ГэВ/с.

В работах [7, 8] было показано, что количественно параметр $\langle\beta_T\rangle$ демонстрирует достаточно высокие темпы роста в диапазоне $\langle N_{part}\rangle < 71 \pm 7$ и значительно низкие темпы роста при $\langle N_{part}\rangle > 71 \pm 7$ в Pb+Pb столкновениях

при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ. В работах [7, 8] было приведено, что разные темпы роста $\langle\beta_T\rangle$ при изменении $\langle N_{part}\rangle$ в диапазонах $\langle N_{part}\rangle < 71$ и $\langle N_{part}\rangle > 71$ и платоподобное поведение температуры кинетического вымораживания, T_0 , в диапазоне $\langle N_{part}\rangle > 71$ может означать, что $\langle N_{part}\rangle = 71 \pm 7$ является граничным значением центральности столкновений для фазового перехода от плотной адронной материи к состоянию КГП (или смешанному состоянию КГП и адронов) в Pb+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ.

Следует отметить, что граничное значение для центральности столкновения между двумя диапазонами $\langle N_{part}\rangle$ с различными темпами роста значений параметров кинетического вымораживания $\langle\beta_T\rangle$ и T_0 , было определено между 50-60% и 40-50% как для столкновений Xe+Xe при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ [9], так и для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ ТэВ [8] и $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ [7].

Граничное значение $\langle N_{part}\rangle$ для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ ($\langle N_{part}\rangle = 71 \pm 7$) имеет достаточно большое значение по сравнению с граничным значением ($\langle N_{part}\rangle = 44 \pm 5$) для Xe+Xe столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ. Это объясняется [7, 8] различием масс ядер Pb и Xe, и, следовательно, большим числом нуклонов-участников взаимодействий в Pb+Pb столкновениях по сравнению с Xe+Xe столкновениями для тех же значений центральности (между 50-60% и 40-50%). Совпадение граничных значений $\langle N_{part}\rangle$ для Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ и 5.02 ТэВ следует из идентичности сталкивающихся систем и одинаковой геометрии на предполагаемой границы центральности между 50-60% и 40-50% классами центральности [7, 8].

Как следует из рис. 2(a) и 2(b), температура кинетического вымораживания, T_0 , демонстрирует одинаковую зависимость от среднего числа нуклонов-участников, $\langle N_{part}\rangle$, в Pb+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, и в Xe+Xe столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ: сначала T_0 резко уменьшается в диапазоне малых значений $\langle N_{part}\rangle$, затем, с ростом $\langle N_{part}\rangle$ темп спада уменьшается, показывая почти платоподобное поведение в диапазоне больших значений $\langle N_{part}\rangle$. В случае p+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, как видно на рис. 2 (b), T_0 также уменьшается с ростом $\langle N_{part}\rangle$, однако, платоподобная область отсутствует, что скорее всего связано с малыми значениями $\langle N_{part}\rangle$ в p+Pb столкновениях по сравнению со значительно высокими значениями $\langle N_{part}\rangle$ в Xe+Xe и Pb+Pb столкновениях.

Из рис. 2 видно, что центральные Pb+Pb, Xe+Xe и p+Pb столкновения (большие значения $\langle N_{part}\rangle$) на БАК характеризуются значительно малыми значениями температуры кинетического вымораживания, T_0 , по сравнению со значительно высокими значениями T_0 для периферических столкновений (малые значения $\langle N_{part}\rangle$). Значения температуры кинетического вымораживания, T_0 , в более периферийных столкновениях, как следует из рис. 2, очень близки к значениям температуры химического вымораживания, T_{ch} , что составляет 150-160 МэВ, как это было вычислено в работах [10, 11] для этих столкновений на БАК. Однако при центральных Pb+Pb, Xe+Xe и

p+Pb столкновениях значения T_0 значительно ниже, чем T_{ch} . Из этого можно сделать вывод, что фэйрбол, образованный при центральных столкновениях тяжелых ионов на БАК живет значительно дольше и распадается при значительно низких температурах, T_0 , по сравнению с фэйрболом, образованным при периферийных столкновениях.

Как было установлено ранее в экспериментах с тяжёлыми ионами на RHIC, при переходе от периферийных к центральным Xe+Xe столкновениям на БАК [9, 10] наблюдается увеличение скорости радиального потока и снижение температуры кинетического вымораживания, что также следует из рис. 1 и 2.

Выводы

В данной работе был проведён анализ спектров поперечного импульса заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов, измеренных коллаборацией ALICE в столкновениях Pb+Pb при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, Xe+Xe столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ ТэВ и в p+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ, а также в p+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ ТэВ в области низких значений $p_T \leq 1$ ГэВ/с с использованием термодинамической функции распределения Максвелла–Больцмана с внедренным поперечным потоком. Показано, что средняя скорость поперечного потока $\langle \beta_T \rangle$ демонстрирует одинаковую зависимость от $\langle N_{part} \rangle$, с платоподобным поведением в центральных Pb+Pb и Xe+Xe столкновениях, которое отсутствует в p+Pb столкновениях. Температура кинетического вымораживания T_0 существенно ниже температуры химического вымораживания T_{ch} в центральных Pb+Pb и Xe+Xe столкновениях, что указывает на более длительное существование фэйрбола, тогда как в p+Pb столкновениях T_0 ближе к T_{ch} , что свидетельствует о более коротком времени жизни системы.

Литература

1. Z.B. Tang et al., Spectra and radial flow in relativistic heavy ion collisions with Tsallis statistics in a blast-wave description. Phys. Rev. C 79, 051901 (2009).
2. H.L. Lao et al., Extracting kinetic freeze-out temperature and radial flow velocity from an improved Tsallis distribution. Eur. Phys. J. A 53, 44 (2017).
3. ALICE Collaboration, Acharya, S. et al. Production of charged pions, kaons and (anti-)protons in Pb-Pb and inelastic pp collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV, Phys. Rev. C 101, 044907 (2020).
4. ALICE Collaboration, S. Acharya et al., Production of pions, kaons, (anti-)protons and ϕ mesons in Xe–Xe collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ TeV, Eur. Phys. J. C 81, 584 (2021).
5. ALICE Collaboration, Multiplicity dependence of charged pion, kaon, and (anti)proton production at large transverse momentum in p–Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV, Phys. Lett. B 760, 720 (2016).
6. ALICE Collab. Centrality determination in heavy ion collisions. ALICE-PUBLIC 2018, 011 (2018).

7. K.K. Olimov, F.-H. Liu, A.I. Fedosimova, I.A. Lebedev, A. Deppman, K.A. Musaev, M.Z. Shodmonov, B.J. Tukhtaev, Analysis of Midrapidity pT distributions of identified charged particles in Pb + Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV using Tsallis distribution with embedded transverse flow. Universe 8, 401 (2022).
8. K.K. Olimov et al., Simultaneous analysis of midrapidity pT Spectra of identified particle species in Pb+Pb Collisions at $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ TeV using Tsallis distribution with transverse flow. Universe 8, 655 (2022).
9. K.K. Olimov et al., Study of midrapidity pt distributions of identified charged particles in Xe+Xe collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ TeV using non-extensive Tsallis statistics with transverse flow. Mod. Phys. Lett. A 37, 2250095 (2022).
10. R. Rath et al., Identified particle production in Xe+Xe collisions at $(s_{nn})^{1/2}=5.44$ TeV using a multiphase transport model. Phys. Rev. C 99, 064903 (2019).
11. A. Motornenko et al., Kinetic freeze-out temperature from yields of short-lived resonances. Phys. Rev. C 102, 024909 (2020).