

**$(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ va 5.02 TeV ENERGIYALARDA Pb+Pb
TO'QNASHUVLARINING KOLLEKTIV XOSSALARINI TAQQOSLASH**

**Maratbek Z. Shodmonov, Qobil A. Musayev, Shakhnoza Z. Kanokova,
Khusniddin K. Olimov**

O'zR FA Fizika-texnika instituti, Chingiz Aytmatov ko'chasi, 2b, 100084
Toshkent. O'zbekiston

MZshodmonov@gmail.com

+998 99 796 59 43

Annotatsiya: Maqolada $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ va 5.02 TeV energiyalarda Pb+Pb to'qnashuvlarning 10 ta markaziylik guruhida ALICE kollaboratsiyasi tomonidan markaziy jadallik sohasida aniqlangan zaryadlangan pion va kaonlarning, proton-antiprotonlarning ko'ndalang impulsi taqsimotlari o'rganildi. Eksperimental natijalarni tavsiflash uchun ko'ndalang oqim kiritilgan termodinamik mos Tsallis funksiyasi va termodinamik mos emas Tsallis funksiyasidan foydalanildi. Bu energiyalarda Pb+Pb to'qnashuvlarining kollektiv xossalari haqida qimmatli ma'lumot olindi.

Kalit so'zlar: Pb+Pb to'qnashuvlari, ko'ndalang impuls taqsimoti, kvark-glyuon plazma, «fayrbol», termodinamik mos ko'ndalang oqim kiritilgan Tsallis funksiyasi, termodinamik mos emas oqim kiritilgan Tsallis funksiyasi, noekstensivlik q parametric, kinetik sovish harorati, ko'ndalang oqimning o'rtacha tezligi, termalizatsiya darajasi.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COLLECTIVE PROPERTIES
OF Pb+Pb COLLISIONS AT $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ AND 5.02 TEV**

**Maratbek Z. Shodmonov, Kobil A. Musaev, Shakhnoza Z. Kanokova,
Khusniddin K. Olimov**

Physical-Technical Institute of Uzb. Academy of Sciences, Chingiz Aytmatov Str.
2b, 100084 Tashkent, Uzbekistan

MZshodmonov@gmail.com

+998 99 796 59 43

Abstract: In this paper, the midrapidity transverse momentum distributions of the charged pions and kaons, protons and antiprotons in ten groups of centrality of Pb+Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ and 5.02 TeV, measured by ALICE Collaboration, have been studied. To describe the experimental spectra, the thermodynamically consistent and non-consistent Tsallis distribution functions with embedded transverse flow have been used. Important information about the collective properties of Pb+Pb collisions at these energies has been obtained.

Keywords: Pb+Pb collisions, transverse momentum distributions, quark-gluon plasma, «fireball», thermodynamically consistent Tsallis function with transverse flow, thermodynamically non-consistent Tsallis function with transverse

flow, non-extensivity parameter q , kinetic freeze-out temperature, average transverse flow velocity, degree of thermalization.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЛЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ Pb+Pb - СТОЛКНОВЕНИЙ ПРИ $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ И 5.02 ТэВ

Шодмонов М.З., Мусаев К.А., Канокова Ш.З., Олимов Х.К.

Физико-технический институт Академии наук Узб., г. Чингиз Айтматова ул.
26, 100084 Ташкент, Узбекистан

MZshodmonov@gmail.com

+998 99 796 59 43

Аннотация: В настоящей статье изучены распределения по поперечному импульсу заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, измеренные коллаборацией ALICE в центральной области быстрот в десяти группах центральности Pb+Pb столкновений при энергиях $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ. Для описания экспериментальных спектров были использованы термодинамически согласующаяся и несогласующаяся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком. Получена важная информация о коллективных свойствах Pb+Pb-столкновений при этих энергиях.

Ключевые слова: Pb+Pb-столкновения, распределения поперечного импульса, кварк-глюонная плазма, «файрбол», термодинамически согласующаяся функция Цаллиса с поперечным потоком, термодинамически несогласующаяся функция Цаллиса, параметр неэкстенсивности q , кинетическая температура размораживания, средняя скорость поперечного потока, степень термализации.

Введение

В экспериментах по ультрарелятивистским столкновениям на Коллайдере релятивистских тяжелых ионов [9] (КРТИ, RHIC, Брукхейвенская лаборатория, США) и экспериментах на Большом адронном коллайдере [10] (БАК, LHC, Церн, Швейцария) особое значение уделяется исследованию поведения ядерной материи в экстремальных условиях. Цель этих экспериментов – создать температуры, достаточно высокие для того, чтобы ядерное вещество претерпело фазовый переход в кварк -глюонную плазму (КГП). Ожидается что, созданная в этих условиях кварк-глюонная плазма будет расширяться и охлаждаться, а затем переходить в фазу адронизации перед заключительной стадией отделения и разлёта образованных частиц от достаточно расширившейся системы - «файрбола». Экспериментаторов и теоретиков интересует, будет ли такая система «термализоваться» и достигать термодинамического равновесия достаточно быстро, чтобы обеспечить возможность термодинамического описания системы в процессе её эволюции.

В данной работе были исследованы зависимости p_t - спектров заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, измеренные

коллорацией ALICE [1,2,8] в центральной области быстрот, от среднего числа нуклонов-участников, $\langle N_{part} \rangle$, в Pb+Pb-столкновениях при энергиях $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ.

Данные и модели

В работе проанализированы экспериментальные распределения по поперечным импульсам заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, рожденных в центральной области быстрот ($|y| < 0.5, |\eta| < 0.8$) в десяти группах центральности Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, измеренные коллорацией ALICE и представленные в работах [1, 2,8].

Для описания экспериментальных распределений по поперечному импульсу частиц мы используем простую (несогласующуюся) функцию Цаллиса с внедрённым поперечным потоком из работы [3,6,7]:

$$\frac{d^2 N}{N_{ev} d p_t dy} = 2 \pi C p_t \left(1 + \langle \gamma_t \rangle \frac{(q-1)(m_t - p_t \langle \beta_t \rangle)}{T_0} \right)^{-q/(q-1)}. \quad (1)$$

Также для описания экспериментальных данных нами использована термодинамически согласующаяся функция Цаллиса с внедренным поперечным потоком из работы [3, 6,7]:

$$\frac{d^2 N}{N_{ev} d p_t dy} = 2 \pi C_q p_t \langle \gamma_t \rangle (m_t - p_t \langle \beta_t \rangle) \left(1 + \langle \gamma_t \rangle \frac{(q-1)(m_t - p_t \langle \beta_t \rangle)}{T_0} \right)^{-q/(q-1)}. \quad (2)$$

Здесь в уравнениях (1) и (2): $\langle \gamma_t \rangle \geq 1/\sqrt{1 - \langle \beta_t \rangle^2}$, $\langle \beta_t \rangle > \langle \beta_t \rangle$ - средняя скорость поперечного (радиального) потока, T_0 - кинетическая температура размораживания, $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ - поперечная масса (энергия), а m_0 - масса покоя адрона.

В работе комбинированные фитирования модельными функциями (уравнения (1) и (2)) экспериментальных p_t -распределений всех анализируемых видов частиц в каждом классе центральности столкновений выполняются с использованием программы Origin 9.1 нелинейной аппроксимации данных. Параметры T_0 и $\langle \beta_t \rangle$ были глобальными (общими) параметрами для всех видов анализируемых частиц во время комбинированных (одновременных) фитирований. Был проведен сравнительный анализ коллективных свойств Pb+Pb – столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ путём сравнения полученных значений параметров модельных функций для этих столкновений при двух значениях энергии соударения.

Анализ и результаты

На рисунке 1 приведены зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ извлеченного параметра неэкстенсивности q термодинамически согласующейся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком и несогласующейся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком для исследуемых заряженных частиц в Pb+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ.

Как видно из рисунка 1, значения параметра неэкстенсивности q термодинамически несогласующейся функции Цаллиса с внедренным

поперечным потоком и термодинамически согласующейся функции Цаллиса с внедренным потоком систематически уменьшаются для всех исследованных видов частиц с увеличением центральности Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ, что указывает на увеличение степени термализации системы с увеличением центральности столкновений тяжелых ионов. Как видно из рис. 2 и 3 параметры T_0 и $\langle\beta_t\rangle$, полученные с использованием как согласующейся, так и несогласующейся функции Цаллиса с поперечным потоком, демонстрируют похожие зависимости от $\langle N_{part} \rangle$, а значит, и от центральности столкновений. Из рис. 2 видно, что значения T_0 , полученные из одновременных фитирований согласующейся функцией Цаллиса с поперечным потоком (2) оказались значительно меньше, чем значения, полученные с использованием простой (несогласующейся) функции Цаллиса с поперечным потоком (4). Вероятно, это связано с дополнительным фактором $\langle\gamma_t\rangle(m_t - p_t\langle\beta_t\rangle)$ в уравнении (2) по сравнению с уравнением (1).

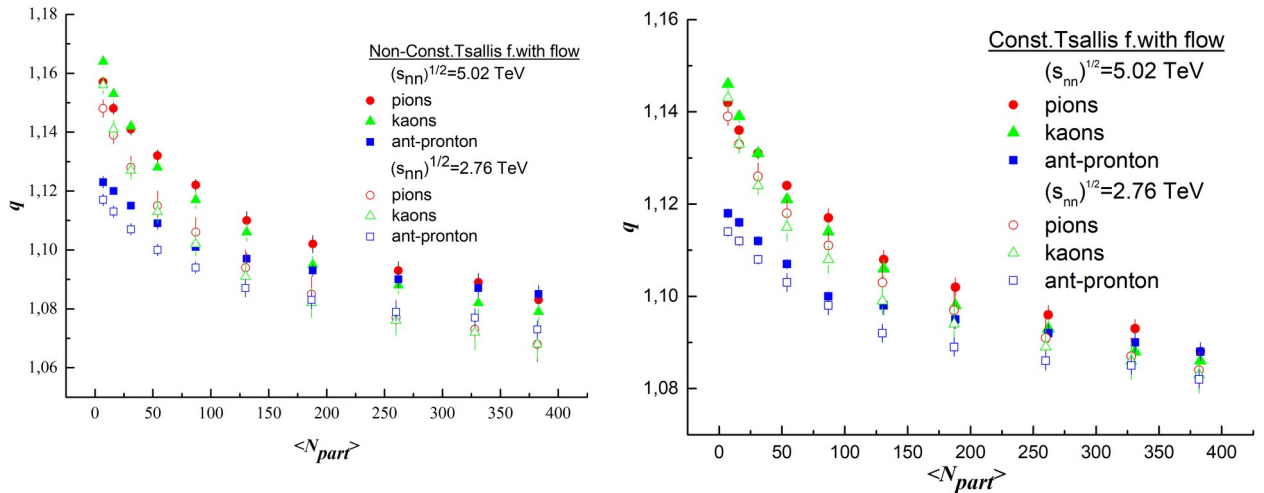


Рисунок 1. Зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ извлеченных значений q в работах [4,5] термодинамически согласующейся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком и термодинамически несогласующейся функции Цаллиса с внедренным потоком для заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в Pb+Pb-столкновениях при $(s_{nn})^{1/2}=2.76$ и 5.02 ТэВ.

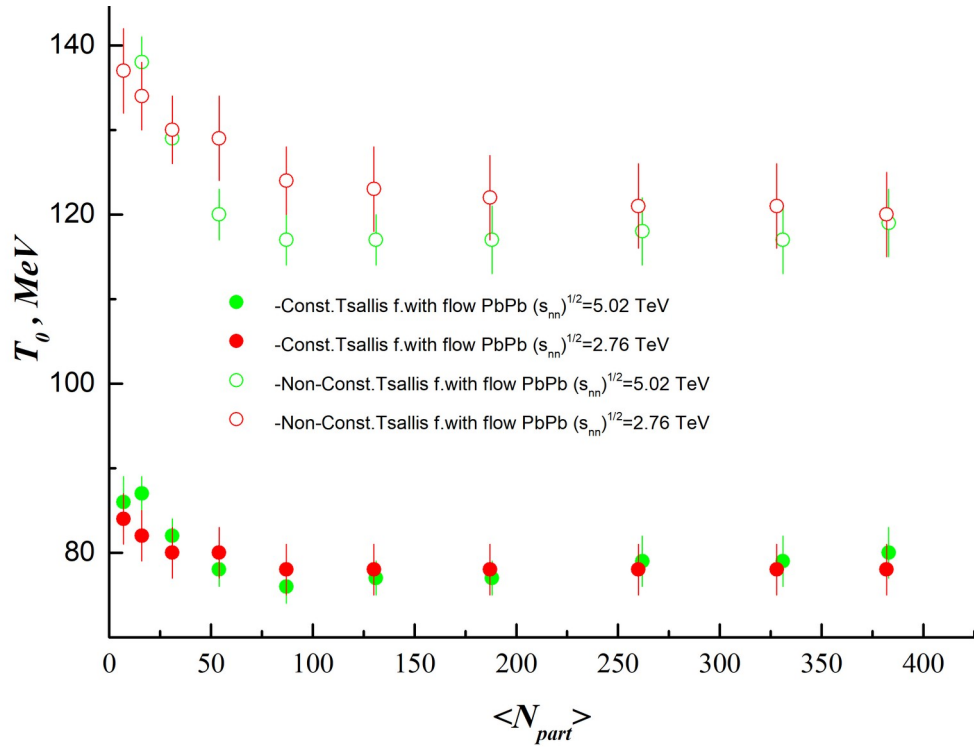


Рисунок 2. Зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ извлеченного параметра T_0 [4,5] согласующейся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур.2) и несогласующейся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур.1).

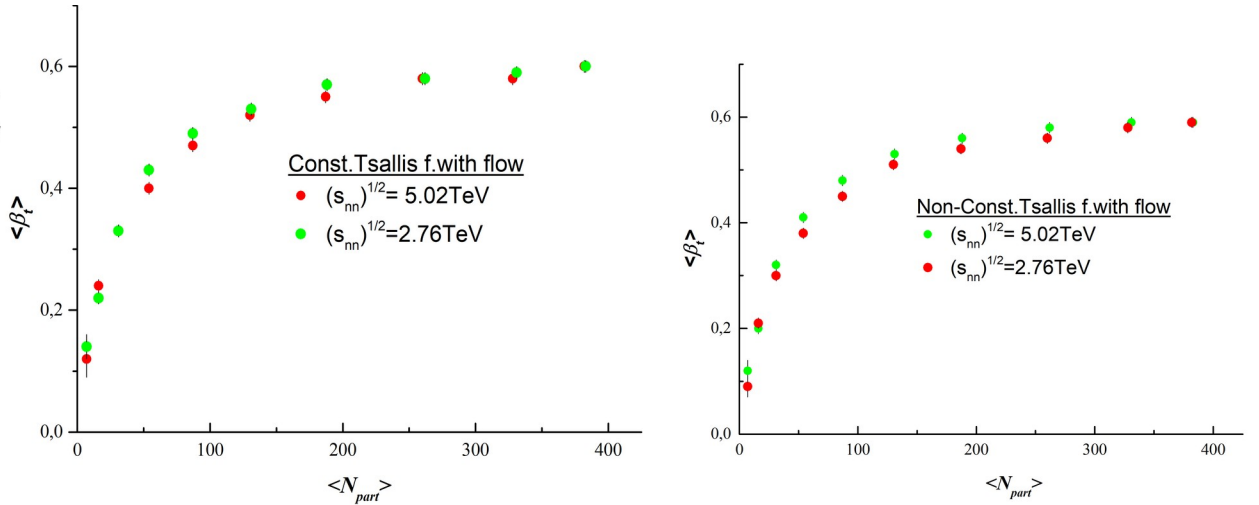


Рисунок 3. Зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ извлеченного параметра $\langle \beta_t \rangle$ [4,5] термодинамически несогласующейся функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком и термодинамически согласующейся функции Цаллиса с внедренным потоком

Как видно из рис. 2 и 3 полученные существенно разные темпы роста скорости поперечного потока $\langle \beta_t \rangle$ в областях $\langle N_{part} \rangle < 71 \pm 7$ и $\langle N_{part} \rangle > 71 \pm 7$ при неизменности температурного параметра T_0 в пределах ошибок в области $\langle N_{part} \rangle > 71$, вероятно, могут свидетельствовать о том, что окрестность точки $\langle N_{part} \rangle \approx 71$ является пороговым граничным значением $\langle N_{part} \rangle$ для кроссоверного перехода из плотного адронного состояния в фазу КГП (или смешанную фазу КГП и адронов) в Pb+Pb-столкновениях при $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ и 5.02 ТэВ.

Заклучения

Мы успешно проанализировали [4, 5] распределения по поперечным импульсам заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в десяти группах центральности в центральной области быстрот Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ и 5.02 ТэВ, измеренных коллаборацией ALICE, используя как термодинамически согласующуюся, так и несогласующуюся функции распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком. Мы выполнили комбинированные минимум χ^2 фитирования с помощью приведенных выше модельных функций экспериментальных p_t – спектров анализируемых видов частиц в центральной области быстрот в каждом классе центральности Pb+Pb столкновений для получения глобальных параметров T_0 и $\langle\beta_T\rangle$ системы, а также параметра неэкстенсивности q для каждого типа частиц. Мы изучили зависимости полученных параметров от центральности Pb+Pb столкновений.

Мы наблюдали существенно различное поведение (темпы роста) $\langle\beta_T\rangle$ в областях $\langle N_{part} \rangle < 71$ и $\langle N_{part} \rangle > 71$, при этом температурный параметр оставался постоянным в пределах ошибок в области $\langle N_{part} \rangle > 71$. Это может указывать на то, что $\langle N_{part} \rangle \approx 71 \pm 7$ является оценочным граничным значением центральности Pb+Pb столкновений для кроссоверного фазового перехода из плотного адронного состояния в КГП фазу (или смешанное состояние КГП и адронов) в Pb+Pb-столкновениях при $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ и 5.02 ТэВ. Наблюдается совпадение граничных значений $\langle N_{part} \rangle$ в Pb+Pb-столкновениях при $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ и 5.02 ТэВ, что обусловлено одинаковостью системы сталкивающихся ядер и совпадающей геометрией соударений.

Параметр неэкстенсивности q систематически уменьшается для всех исследованных типов частиц с увеличением центральности Pb+Pb столкновений при $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ ТэВ, а также в Pb+Pb столкновениях при $(s_{nn})^{1/2} = 5.02$ ТэВ в соответствии с аналогичной тенденцией, наблюдаемой в недавней работе [3]. Разрыв между q (мезонами) и q (барионами) уменьшается с увеличением $\langle N_{part} \rangle$, что указывает на увеличение степени термализации и равновесности системы с увеличением центральности Pb+Pb-соударений.

Финансирование: Работа выполнена в рамках фундаментального проекта ФЗ-20200929146 «Анализ больших массивов данных по соударениям тяжёлых ионов при высоких энергиях на Большом адронном коллайдере», финансируемого Агентством инновационного развития Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

Список литературы

- [1]. ALICE Collaboration, Centrality dependence of π , K, p production in Pb-Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ TeV. Physical Review C **88**, 044910 (2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.044910>.
- [2]. Acharya, S. et al. [ALICE Collaboration], Production of charged pions, kaons and (anti-)protons in Pb-Pb and inelastic pp collisions

- at $(s_{nn})^{1/2}=5.02$ TeV. Physical Review C **101**, 044907 (2020), <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.101.044907>.
- [3]. Olimov K.K.; Liu F.-H.; Musaev K.A.; Olimov K.; Shodmonov M.Z.; Fedosimova A.I.; Lebedev I.A.; Kanokova Sh.Z.; Tukhtaev B.J.; Yuldashev B.S., Study of midrapidity p_T 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. Modern Physics Letters A **37**, 2250095 (2022), <https://doi.org/10.1142/S021773232250095X>
- [4]. Olimov Kh. K.; Liu Fu-Hu; Fedosimova A. I.; Lebedev I. A., Deppman A.; Musaev K. A.; Shodmonov M. Z.; and Tukhtaev B. J., Analysis of Midrapidity p_T 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), <https://www.mdpi.com/2218-1997/8/8/401>
- [5]. Olimov K.K.; Lebedev I.A.; Fedosimova A.I.; Liu F.-H.; Kanokova Sh.Z.; Shodmonov M.Z.; Tukhtaev B.J. Simultaneous Analysis of Midrapidity p_T Spectra of Identified Particle Species in Pb+Pb Collisions at $\sqrt{s_{nn}}=2.76$ TeV Using Tsallis Distribution with Transverse Flow. *Universe* **8**, 655 (2022), <https://doi.org/10.3390/universe8120655>
- [6]. Khandai, P.K.; Sett, P.; Shukla, P.; Singh, V. System size dependence of hadron p_T spectra in p+p and Au+Au collisions at $(s_{nn})^{1/2}=200$ GeV. Journal of Physics G Nuclear and Particle Physics. G, **41**, 025105 (2014). DOI:[10.1088/0954-3899/41/2/025105](https://doi.org/10.1088/0954-3899/41/2/025105)
- [7]. Cleymans, J., Worku, D. The Tsallis distribution in proton–proton collisions at $(s)^{1/2} = 0.9$ TeV at the LHC. J. Phys. G, **39**, 025006 (2012), <https://doi.org/10.1088/0954-3899/39/2/025006>.
- [8]. ALICE Collab. Centrality determination in heavy ion collisions. ALICE-PUBLIC-2018-011. Available online:<https://cds.cern.ch/record/2636623> (accessed on 1 December 2022).
- [9]. <https://www.bnl.gov/rhic/star.php>
- [10]. <https://www.home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>