

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО ИМПУЛЬСА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В $p+Pb$ СТОЛКНОВЕНИЯХ ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ НА БАК

¹Х.К. Олимов, ²А.Н. Кахорова, ¹Ш.А. Худойбердиева

¹Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан,
профессор

²Самаркандский государственный университет им. Ш. Рашидова, PhD
докторант

¹Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан, PhD
докторант

azizakakhorova@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе с помощью термодинамически несогласованной и согласованной функций распределения Цаллиса проанализированы экспериментальные спектры поперечного импульса p_t заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в $p+Pb$ столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ на Большом Адронном Коллайдере (БАК, ЦЕРН, Швейцария) в семи классах центральностей. В работе определено граничное значение среднего числа нуклонов-участников $\langle N_{part} \rangle$, при котором возникает поперечный коллективный радиальный поток.
Ключевые слова: $p+Pb$ столкновения, Большой адронный коллайдер, ALICE, поперечный поток, коллективные свойства, кварк-глюонная плазма, функция распределения Цаллиса.

KAQDAGI $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV ENERGIYALI $p+Pb$ TO‘QNASHUVLARIDAGI ZARYADLANGAN ZARRACHALARNING KO‘NDALANG IMPULS SPEKTRLARINING TAHLILI

¹Х.К. Olimov, ²А.Н. Kakhorova, ¹Sh.A. Xudoyberdiyeva

¹O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi fizika-texnika instituti, professor

²Sh. Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti, PhD doktorant

¹O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi fizika-texnika instituti, PhD
doktorant

Annotatsiya. Mazkur ishda Katta Adron Kollayderda (KAK, SERN, Shveysariya) $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV energiyali $p+Pb$ to'qnashuvlarning yetti markaziylik sinflarda hosil bo'lgan zaryadlangan pionlar, kaonlar, protonlar va antiprotonlarning termodinamik jihatdan muvofiqlashtirilmagan va muvofiqlashtirilgan Tsallis taqsimot funksiyalari yordamida ko'ndalang impulsining eksperimental spektrlari tahlil qilindi. To'qnashuvlarda ko'ndalang kollektiv radial oqim paydo bo'ladigan ishtirokchi nuklonlar o'rtacha sonining chegaraviy miqdori aniqlandi.

Kalit so'zlar: $p+Pb$ to'qnashuvlar, Katta adron kollayder, ALICE, ko'ndalang oqim, kollektiv hossalari, kvark-glyuon plazma, Tsallis taqsimot funksiyasi.

**ANALYSIS OF THE TRANSVERSE MOMENTUM SPECTRA OF
CHARGED PARTICLES PRODUCED IN $p+Pb$ COLLISIONS AT $\sqrt{s_{nn}}=5.02$
TeV AT THE LHC**

¹Kh.K. Olimov, ²A.N. Kakhorova, ¹Sh.A. Khudoyberdieva

¹Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan, professor

²Samarkand State University named after Sh. Rashidov, PhD student

¹Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of
Uzbekistan, PhD student

azizakakhorova@gmail.com

Abstract. In this paper, the experimental transverse momentum spectra p_t of charged pions, kaons, protons and antiprotons in seven centrality classes of $p+Pb$ collisions at $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV at the Large Hadron Collider (LHC, CERN, Switzerland) have been analyzed using thermodynamically nonconsistent and consistent Tsallis distribution functions. In this work, the border value of the average number of participant nucleons at which a transverse radial flow occurs, was determined.

Keywords: $p+Pb$ collisions, Large Hadron Collider, ALICE, transverse flow, collective properties, quark-gluon plasma, Tsallis distribution function.

ВВЕДЕНИЕ.

Протон-ядерные ($p+A$) столкновения занимают промежуточное положение между протон-протонными ($p+p$) и ядро-ядерными столкновениями ($A+A$) с точки зрения размера системы и количества образующихся частиц. Результаты анализа протон-протонных и протон-ядерных столкновений используются в качестве базиса для анализа ядро-ядерных столкновений при одинаковых $\sqrt{s_{nn}}$ энергиях, и их сравнение позволяет различать эффекты начального состояния, связанные с использованием ядерных пучков и мишеней, от эффектов конечного состояния, в которых проявляется КГП. Тем не менее, согласно результатам работ [1, 2], в протон-протонных столкновениях было замечено возникновение значительных поперечных коллективных потоков, что является одним из свидетельств возможного образования КГП или КГП капли.

Настоящая работа посвящена анализу спектров поперечного импульса (p_t) заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в $p+Pb$ столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ в семи классах центральностей, измеренных коллаборацией ALICE и приведенных в работе [3]. Фитирование было произведено с помощью простой термодинамически несогласованной и термодинамически согласованной функций распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком. Спектры поперечного импульса всех анализируемых видов частиц были проанализированы комбинировано (одновременно), что позволило извлечь коллективные параметры системы и дать адекватную интерпретацию результатов анализа.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.

В работах [4, 5] приведены свидетельства обнаружения поперечного потока в $p+Pb$ столкновениях при $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ. Кроме того, согласно результатам работы [6], плотность по псевдобыстроте числа частиц, образованных в $p+A$ столкновениях на БАК сравнима с плотностями по псевдобыстроте числа частиц, образованных в полупериферических $Au+Au$

столкновениях при центральности $\sim 60\%$ и в более центральных Cu+Cu столкновениях при центральности $\sim 30\%$.

Функция распределения Цаллиса, полученная из неэкстенсивной статистики Цаллиса [7], успешно применяется для описания спектров поперечного импульса p_t частиц, образованных в протон-протонных столкновениях при высоких энергиях, вплоть до самых высоких значений $p_t \approx 200$ ГэВ/с, измеренных на БАК. С помощью функции распределения Цаллиса можно извлечь такие важные физические параметры системы как эффективная температура, T , степень неравновесности системы, q , отвечающая за степень отклонения распределения p_t от распределения Больцмана-Гиббса, а также среднюю скорость поперечного потока, $\langle \beta_T \rangle$.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В настоящей работе приведены результаты комбинированного анализа спектров поперечного импульса заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в p +Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}} = 5.02$ ТэВ в семи классах центральностей, измеренных коллаборацией ALICE и приведенных в работе [3]. Среднее число нуклонов-участников ($\langle N_{part} \rangle$), вычисленных в работе [8], в исследуемых классах центральностей p +Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{nn}} = 5.02$ ТэВ приведено в таблице 1.

Таблица 1. Среднее число нуклонов-участников [8] ($\langle N_{part} \rangle$) p +Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{nn}} = 5.02$ ТэВ в исследуемых классах центральностей.

Центральность, %	$\langle N_{part} \rangle$
0-5	15.10 ± 0.75
5-10	13.5 ± 0.7
10-20	12.2 ± 0.6
20-40	10.1 ± 0.5
40-60	7.4 ± 0.3
60-80	4.9 ± 0.1
80-100	2.99 ± 0.03

Функция распределения Цаллиса имеет множество вариаций, которые успешно применяются при анализе спектров распределения p_t частиц, образующихся в столкновениях при высоких энергиях. Простая функция распределения Цаллиса представляется в следующем виде:

$$\frac{d^2 N}{2\pi N_{\text{собр}} p_t d p_t dy} = C \left(1 + (q-1) \frac{m_t}{T} \right)^{-1/(q-1)}, \quad (1)$$

где C – постоянная фитирования (нормализации), $N_{\text{собр}}$ – общее количество неупругих соударений, $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ – поперечная масса (энергия), где m_0 – масса покоя адрона, T – эффективная температура, q – параметр неэкстенсивности, характеризующий степень отклонения распределения p_t от экспоненциального распределения Больцмана-Гиббса и определяющий степень неравновесности и нетермализованности системы. При $q=1$ функция распределения Цаллиса переходит в функцию распределения Больцмана-Гиббса. Чем ближе значение q к единице, тем более термализована и равновесна система.

Следующий вид функции распределения Цаллиса является термодинамически согласованным и химический потенциал μ приравнивается к нулю, что допустимо при высоких энергиях на БАК. Доказательства термодинамической согласованности нижеприведённой функции приведены в работе [9].

$$\frac{d^2 N}{2\pi N_{\text{собр}} p_t d p_t dy} = C_q m_t \left(1 + (q-1) \frac{m_t}{T} \right)^{-q/(q-1)}. \quad (2)$$

Функция (2) называется термодинамически согласованной функцией распределения Цаллиса.

В значение эффективной температуры T в функциях (1) и (2) вносят вклад как тепловое движение частиц, так и коллективный поток, образующийся из-за начальных градиентов давления в сильновзаимодействующей системе. В работе [10] с помощью преобразования Лоренца $m_t \rightarrow \langle \gamma_t \rangle (m_t - p_t \langle \beta_t \rangle)$ средняя скорость поперечного потока была внедрена в функцию распределения Цаллиса. Функция

распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком, учитывающая эффекты поперечного потока, позволяет определить среднюю скорость поперечного потока системы $\langle \beta_T \rangle$ и среднюю температуру системы столкновения в момент кинетического вымораживания. В настоящей работе преобразование Лоренца проведено как для функции (1), так и для функции (2), что позволяет нам получить простую термодинамически несогласованную (3) и термодинамически согласованную (4) функцию распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком:

$$\frac{d^2 N}{2\pi N_{\text{собр}} p_t d p_t dy} = C \left(1 + \langle \gamma_t \rangle \frac{(q-1)(m_t - p_t \langle \beta_t \rangle)}{T_0} \right)^{-q/(q-1)}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 N}{2\pi N_{\text{собр}} p_t d p_t dy} = C_q \langle \gamma_t \rangle (m_t - p_t \langle \beta_t \rangle) \left(1 + \langle \gamma_t \rangle \frac{(q-1)(m_t - p_t \langle \beta_t \rangle)}{T_0} \right)^{-q/(q-1)}. \quad (4)$$

Диапазон фитирования спектра p_t следующий: [0.5-11.0] ГэВ/с для $\pi^{+/-}$ и $\pi^{+/-}$, [0.2-20.0] ГэВ/с для $K^{+/-} + K^{-/+}$ и [0.3-20.0] ГэВ/с для $p + \bar{p}$.

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

Результаты фитирования спектров поперечного импульса заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в $p+\text{Pb}$ столкновениях при энергии $\sqrt{s_{\text{мн}}} = 5.02$ ТэВ в семи классах центральностей, с помощью термодинамически согласованной и несогласованной функций Цаллиса (ур. (4) и (3)) представлены в таб. 2 и 3, соответственно. Кривые комбинированного фитирования для четырёх классов центральности столкновений представлены на рис. 1 и 2.

Как видно из таб. 2 и 3 и рис. 1 и 2, как термодинамически согласованная, так и несогласованная функции распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком показывают одинаково хорошее фитирование экспериментальных спектров поперечного импульса всех анализируемых видов частиц. Разница в значениях T_0 , получаемых из ур. (3) и (4) связана с дополнительным множителем $\langle \gamma_t \rangle > 1$ в ур. (4). Из-за термодинамической согласованности, предпочтительнее пользоваться функцией (4) – параметр T_0 , получаемый из этой функции, можно

рассматривать как истинную термодинамическую температуру анализируемых систем соударения.

Таблица 2. Результаты комбинированного фитирования с помощью термодинамически согласованной функции распределения Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур. 4) спектров p_t частиц, образованных в центральной области быстрот $p+Pb$ столкновений при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ.

Ч.с.с. означает количество степеней свободы.

Центр.	$q (\pi^{+\bar{u}\bar{u}} + \pi^{-\bar{u}\bar{u}})$	$q (K^{+\bar{u}\bar{u}} + K^{-\bar{u}\bar{u}})$	$q (p + \bar{p})$	T_0 (МэВ)	$\langle \beta_T \rangle$ (в ед. с)	$\chi^2/\text{ч.с.с.}$ (ч.с.с.)
0-5%	1.131±0.001	1.134±0.001	1.111±0.001	85±2	0.43±0.01	0.43(132)
5-10%	1.134±0.001	1.137±0.001	1.113±0.001	87±2	0.40±0.01	0.38(132)
10-20%	1.137±0.001	1.141±0.001	1.116±0.001	87±2	0.36±0.01	0.35(132)
20-40%	1.138±0.001	1.143±0.001	1.117±0.001	89±2	0.31±0.01	0.30(132)
40-60%	1.142±0.001	1.147±0.001	1.120±0.001	92±2	0.22±0.01	0.22(132)
60-80%	1.145±0.001	1.151±0.001	1.124±0.001	96±2	0.09±0.01	0.13(132)
80-100%	1.150±0.001	1.156±0.001	1.124±0.001	82±2	0	0.11(132)

Таблица 3. Результат комбинированного фитирования с помощью простой термодинамически несогласованной функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур. 3) спектров p_T частиц, образованных в центральной области быстрот $p+Pb$ столкновения при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ.

Центр.	$q (\pi^{+\bar{u}\bar{u}} + \pi^{-\bar{u}\bar{u}})$	$q (K^{+\bar{u}\bar{u}} + K^{-\bar{u}\bar{u}})$	$q (p + \bar{p})$	T_0 (МэВ)	$\langle \beta_T \rangle$ (в ед. с)	$\chi^2/\text{к.с.с.}$ (ч.с.с.)
0-5%	1.145±0.00	1.150±0.001	1.116±0.001	132±3	0.41±0.0	0.38(132)
5-10%	1.148±0.00	1.154±0.001	1.118±0.001	135±3	0.38±0.0	0.33(132)
10-20%	1.15	1.158±0.001	1.123±0.001	135±3	0.34±0.0	0.32(132)
20-40%	1.154±0.00	1.163±0.001	1.124±0.001	139±3	0	0.25(132)
40-60%	1.160±0.00	1.168±0.001	1.129±0.001	142±3	0.21±0.0	0.21(132)
60-80%	1.	1.175±0.001	1.133±0.001	148±3	0.08±0.0	0.13(132)
80-100%	1.1	1.181±0.001	1.133±0.001	125±1	0	0.15(132)

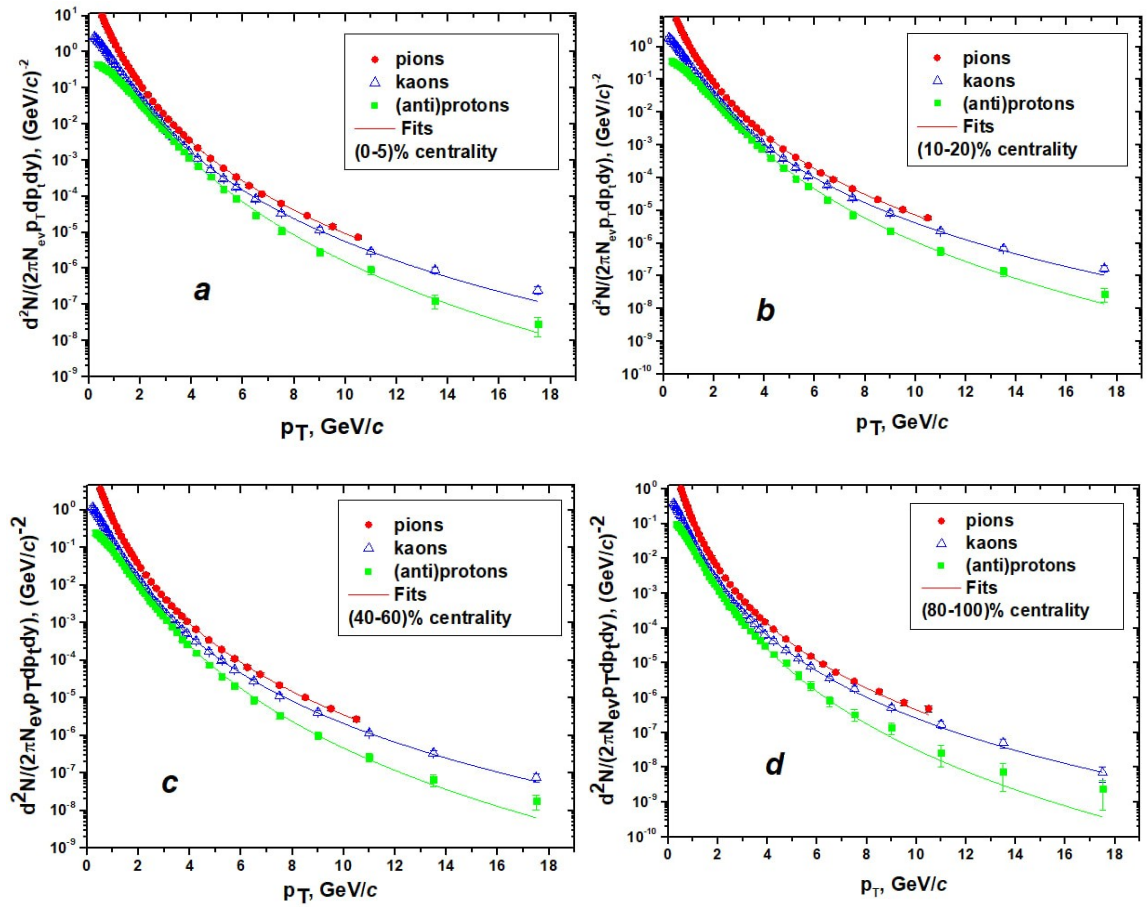
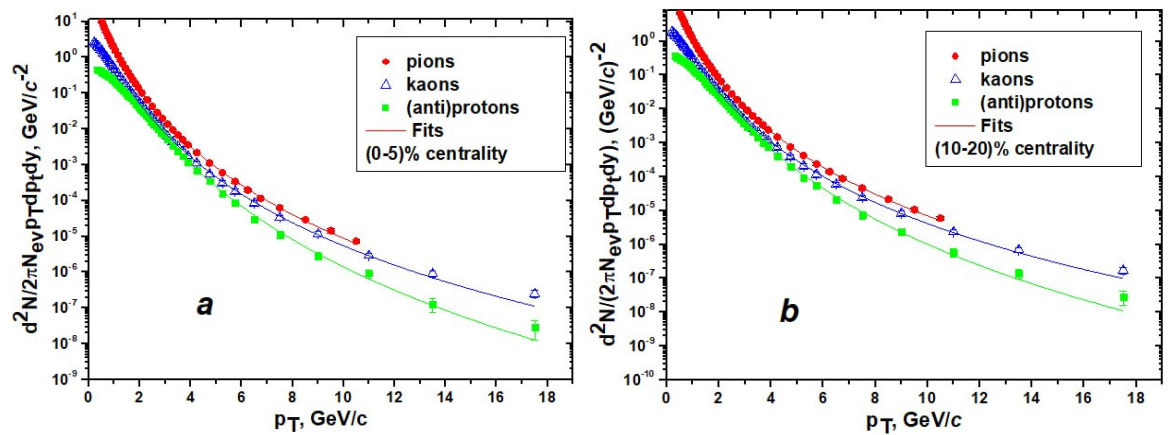


Рисунок 1. Кривые фитирования термодинамически согласованной функцией распределения Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур. 4) экспериментальных спектров p_T заряженных пионов ($\bullet$), каонов (Δ), протонов и антипротонов ($\blacksquare$), образованных в p +Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ в различных группах центральностей столкновения: (0–5)% (a), (10–20)% (b), (40–60)% (c) и (80–100)% (d).



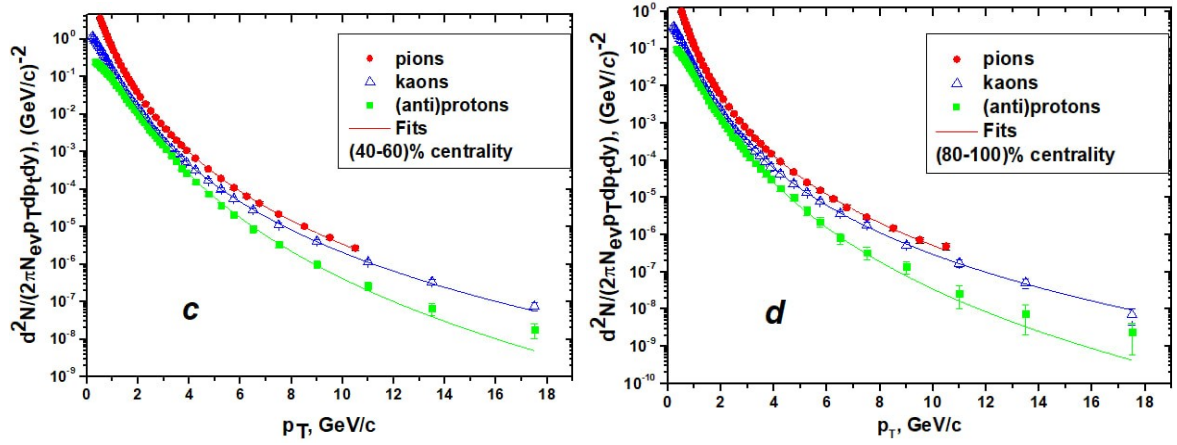


Рисунок 2. Кривые фитирования термодинамически несогласованной функцией распределения Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур. 3) экспериментальных спектров p_T заряженных пионов (●), каонов (Δ), протонов и антипротонов (■), образованных в p +Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ в различных группах центральностей столкновения: (0–5)% (a), (10–20)% (b), (40–60)% (c) и (80–100)% (d).

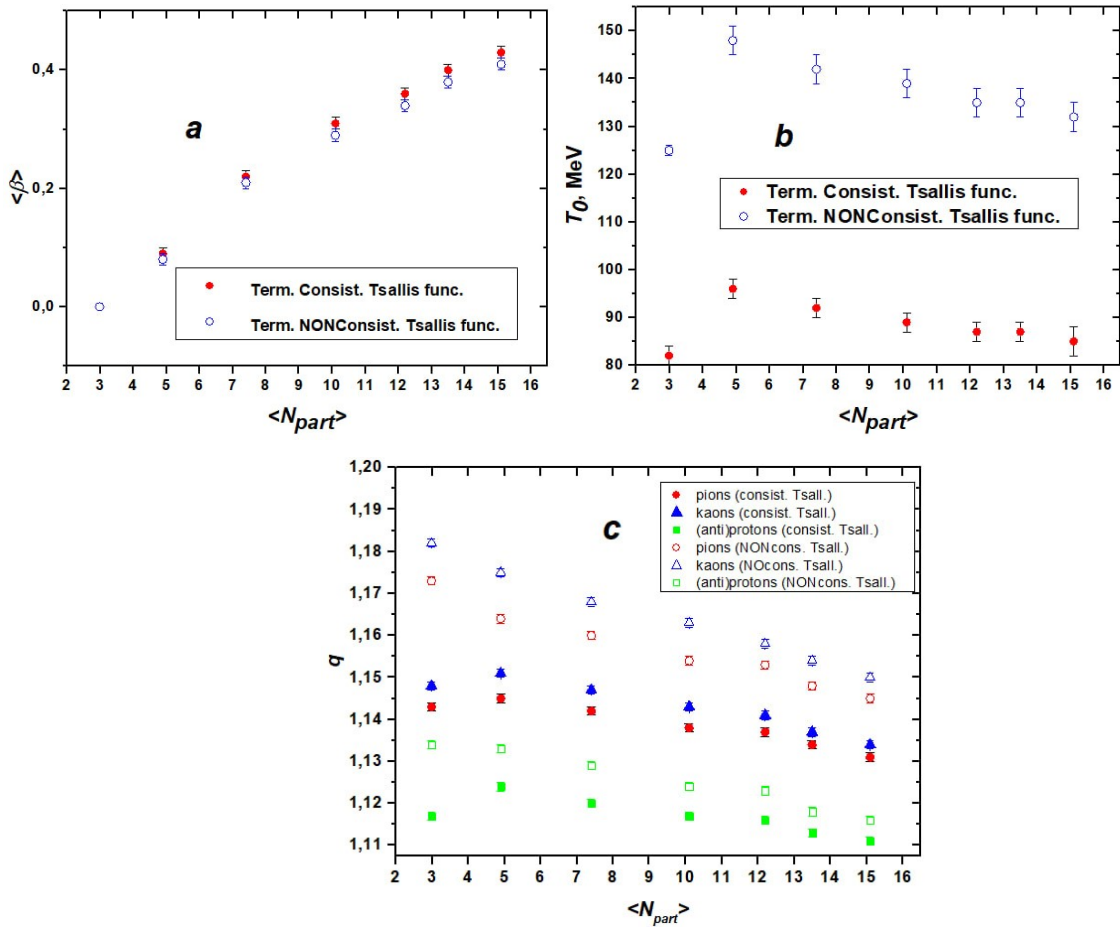


Рисунок 3. Зависимости от $\langle N_{part} \rangle$ параметров $\langle \beta_T \rangle$ (a) и T_0 (b) (●) в p +Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ, полученные из ур. (4) и данные в

таб. (2); (с) – зависимость от $\langle N_{part} \rangle$ значений параметра q , приведенных в таб. 2 для заряженных пионов (●), каонов (▲), протонов и антипротонов (■). Результаты, полученные из ур. (3) и приведенные в таб. 3 представлены соответствующими открытыми символами.

Из рис. 3 (b) следует, что значение параметра T_0 растет с ростом числа нуклонов-участников столкновений $\langle N_{part} \rangle$ до значения $\langle N_{part} \rangle \approx 4$ и становится постоянным с небольшими отклонениями при значениях $\langle N_{part} \rangle > 4$.

На рис. 3 (a) видно, что поперечная скорость $\langle \beta_T \rangle$ равна нулю в первой точке ($\langle N_{part} \rangle = 2.99$), соответствующей (80-100)% центральности, затем $\langle \beta_T \rangle$ появляется ($\langle \beta_T \rangle \approx 0.1$ с) во второй точке ($\langle N_{part} \rangle = 4.9$) и начинает расти с увеличением центральности столкновения (числа нуклонов-участников $\langle N_{part} \rangle$). Граничное (пороговое) значение $\langle N_{part} \rangle = 4.0 \pm 0.5$, при котором начинает появляться поперечный поток, было оценено как усредненное значение $\langle N_{part} \rangle$ между первой и второй точками на рис. 3 (a), соответствующими классам центральности (80-100)% и (60-80)%. Как следует из результатов этой работы, а также работы [10], полученное из одновременного анализа зависимостей $\langle \beta_T \rangle$ от $\langle N_{part} \rangle$, T_0 от $\langle N_{part} \rangle$, а также q от $\langle N_{part} \rangle$, граничное значение $\langle N_{part} \rangle$ оценивает не только центральность столкновений, при которых возникает поперечный поток, но и пороговое значение $\langle N_{part} \rangle$ для фазового перехода из плотного адронного состояния в состояние КГП.

Как следует из рис. 3 (с), параметр неэкстенсивности q постепенно уменьшается для всех типов частиц с увеличением центральности $p+Pb$ столкновений (или $\langle N_{part} \rangle$) при энергии $\sqrt{s_{nn}} = 5.02$ ТэВ. Это означает, что степень термализации и равновесности системы увеличивается с увеличением центральности столкновений. Из соотношения $q(\text{каонов}) > q(\text{пионов}) > q((\text{анти})\text{протонов})$ следует то, что более массивные адроны меньше отклоняются от экспоненциального распределения Больцмана-Гиббса.

ВЫВОДЫ.

Экспериментальные спектры поперечного импульса заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в семи классах центральностей $p+\text{Pb}$ столкновений при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ, измеренные коллаборацией ALICE на БАК, были успешно профитированы с помощью термодинамически несогласованной и согласованной функций распределения Цаллиса с внедренным поперечным потоком. Комбинированные фитирования с использованием метода минимума χ^2 позволили определить температуру кинематического вымораживания системы, среднюю скорость поперечного расширения системы, а также параметр неэкстенсивности q . Была изучена зависимость этих параметров от центральности столкновений (или от числа нуклонов-участников $\langle N_{part} \rangle$).

ЛИТЕРАТУРА.

1. Kh.K. Olimov et al., Universe 8, 174 (2022). <https://doi.org/10.3390/universe8030174>
2. Kh.K. Olimov et al., Int. J. Mod. Phys. A 36, 2150149 (2021)
3. ALICE Collaboration, Phys. Lett. B 760, 720 (2016).
4. CMS Collaboration, S. Chatrchyan et al., Eur. Phys. J. C 74 (no. 6), 2847 (2014), arXiv:1307.3442 [hep-ex].
5. ALICE Collaboration, B. Abelev et al., Phys. Lett. B 719, 29–41 (2013), arXiv:1212.2001 [nucl-ex].
6. PHOBOS Collaboration, B. Alver et al., Phys. Rev. C 83, 024913 (2011)
7. C. Tsallis, J. Statist. Phys. 52, 479 (1988)
8. ALICE Collaboration, CERN Preprint ALICE-PUBLIC-2018-011.
9. J. Cleymans and D. Worku, J. Phys. G 39, 025006 (2012).
10. Kh.K. Olimov et al. Modern Physics Letters A 37, 2250095 (2022).