

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

**АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ПОПЕРЕЧНОГО ИМПУЛЬСА p_T
ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ, КАОНОВ, ПРОТОНОВ И
АНТИПРОТОНОВ, ОБРАЗОВАННЫХ В $Pb+Pb$ СТОЛКНОВЕНИЯХ
ПРИ ЭНЕРГИИ $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОЙ
КОМБИНИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ЦАЛЛИСА-ХАГЕДОРНА С
ВНЕДРЁННЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ**

Аннотация. Данная работа посвящена анализу спектров поперечного импульса p_T частиц, образующихся в $Pb+Pb$ столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ на Большом Адронном Коллайдере (LHC, CERN, Швейцария) в десяти классах центральностей с помощью новой комбинированной функции Цаллиса-Хагедорна с внедрённым поперечным потоком. В работе проводится сравнение результатов фитирования с помощью функций распределения Цаллиса и новой комбинированной функции Цаллиса-Хагедорна.

Ключевые слова: $Pb+Pb$ столкновения, столкновение тяжёлых ионов, LHC, функция распределения Цаллиса, кварк-глюонная плазма, распределение поперечного импульса.

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

**YANGI KOMBINATSIYALANGAN KO'NDALANG OQIM KIRITILGAN
TSALLIS-XAGEDORN FUNKSIYASI YORDAMIDA $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV
ENERGIYADAGI $Pb+Pb$ TO'QNASHUVLARDA HOSIL BO'LGAN
ZARYADLANGAN PIONLAR, KAONLAR, PROTON VA
ANTIPROTONLAR KO'NDALANG IMPULSI SPEKTRLARINING
TAHLILI**

Annotatsiya. Mazkur ish yangi kombinatsiyalangan ko'ndalang oqim kiritilgan Tsallis-Xagedorn funksiyasi yordamida $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV energiyadagi $Pb+Pb$ to'qnashuvlarning 10ta markaziylik guruhlarida hosil bo'lgan zaryadlangan pionlar, kaonlar, proton va antiprotonlar ko'ndalang impulsining Katta adron kollayderida (LHC, CERN, Shveytsariya) ALICE kollaboratsiyasi o'lgan eksperimental spektrlari tahliliga bag'ishlangan. Natijalar termodinamik jihatidan muvofiqlashtirilgan Tsallis taqsimot funksiyasi yordamida olingan natijalar bilan taqqoslanadi.

Kalit so 'zlar: *Pb+Pb to'qnashuvlari, og'ir ionlar to'qnashuvi, LHC, Tsallis taqsimot funksiyasi, kvark-gluon plazma, ko'ndalang ompuls taqsimoti.*

Olimov Khusniddin 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

**ANALYSIS OF MIDRAPIDITY p_t DISTRIBUTIONS OF THE CHARGED
PIONS, KAONS, PROTONS AND ANTIPROTONS IN Pb+Pb COLLISIONS
AT $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV USING NEW COMBINED TSALLIS-HAGEDORN
FUNCTION WITH EMBEDDED TRANSVERSE FLOW**

Abstract. *In this paper the experimental midrapidity transverse momentum distributions of the charged pions, kaons, protons and antiprotons in ten groups of centrality of Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ TeV, measured by ALICE Collaboration (LHC, CERN, Switzerland), have been analyzed using simultaneous minimum χ^2 fits by the new Combined Tsallis-Hagedorn function with embedded transverse flow. The results were compared with the results of the fits performed using thermodynamically consistent Tsallis distribution function with embedded transverse flow.*

Keywords: *Pb+Pb collisions, heavy ion collision, LHC, Tsallis distribution function, quark-gluon plasma, transverse momentum distribution.*

Введение

В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях на Релятивистском коллайдере тяжёлых ионов (RHIC, Брукхейвенская национальная лаборатория, США), а также на Большом адронном коллайдере (LHC, CERN, Швейцария) при экстремальных значениях температуры и давления образуется уникальное состояние материи – кварк-глюонная плазма (КГП), состоящее из кварков и глюонов, находящихся в состоянии деконфайнмента.

Фитируя экспериментальные спектры поперечного импульса p_t частиц 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 выморазживания системы.

Данная работа посвящена изучению спектров поперечного импульса заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов, образованных в Pb+Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ в десяти классах центральностей, измеренных коллаборацией ALICE и приведенных в работе [1].

Литературный обзор

Экспериментальные спектры поперечного импульса частиц, образующихся при столкновениях тяжелых ядер при высоких энергиях, можно разделить на две области: область малых и больших значений p_t , в которых доминируют мягкие и жесткие процессы соответственно. Многие теоретические функции распределения, такие как функция распределения Больцмана-Гиббса, Цаллиса, Хагедорна, широко используются [2-7] при анализе экспериментальных спектров поперечного импульса адронов и дают хорошие результаты фитирования в областях малых и средних значений p_t до 5 ГэВ/с. Однако качественное фитирование полного спектра p_t до сих пор не осуществлено.

В данной работе проводится фитирование новой комбинированной функцией Цаллиса-Хагедорна с внедренным поперечным потоком, которая представляет собой комбинацию двух функций: функции распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком [3], которая успешно описывает малые и средние области спектра p_t [3, 5, 6], а также функции распределения Хагедорна [8], дающей хорошие результаты фитирования в области высоких значений спектра p_t . Функция распределения Цаллиса с внедренным поперечным потоком была впервые введена в работе [3], и, согласно результатам работ [3, 5, 6], показала хорошее качество фитирования спектров p_t адронов, образующихся при $p+Pb$, $Xe+Xe$, $Pb+Pb$ столкновениях на LHC, в областях значений $p_t < 5$ ГэВ/с и позволила получить значения коллективных параметров системы, а также параметра нетермализованности системы q , а также установить зависимость этих параметров от центральности и энергии столкновений.

Методология исследования

Впервые в работе [3] в функцию распределения Цаллиса был внедрен поперечный поток и была выведена термодинамически согласованная функция распределения Цаллиса с внедренным поперечным потоком:

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

где C_q – постоянная нормализации, $\langle \gamma_t \rangle \geq 1/\sqrt{1 - \langle \beta_t \rangle^2} > 1$, $\langle \beta_t \rangle$ – средняя скорость поперечного расширения системы, T_0 – температура кинетического вымораживания системы.

Экспериментальные спектры в работе [1] приведены в виде $\frac{d^2 N}{N_{ev} d p_T dy}$, с учетом этого ур.(1) имеет вид:

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

При фитировании области спектра с большими значениями поперечного импульса p_t частиц, образующихся при ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях, показала свою эффективность обратная степенная функция Хагедорна [8]:

$$\frac{d^2 N}{N_{ev} d p_t dy} = A p_T \left(1 + \frac{p_T}{p_0} \right)^{-n}, \quad (3)$$

где A – постоянная фитирования, n и p_0 – свободные параметры.

Экспериментальные спектры распределения поперечного импульса p_t частиц, образованных в столкновениях тяжелых ионов, можно разделить на область больших и малых значений p_t , в которых доминируют жесткие и мягкие процессы соответственно. Предполагая, что эти процессы являются независимыми, применим правило умножения вероятностей независимых событий и тем самым объединим функции (2) и (3):

$$\frac{d^2 N}{N_{ev} d p_t dy} = 2 \pi A_q p_t \langle \gamma_t \rangle (m_t - p_t \langle \beta_t \rangle) \left(1 + \langle \gamma_t \rangle \frac{(q-1)(m_t - p_t \langle \beta_t \rangle)}{T_0} \right)^{-q/(q-1)} \cdot \left(1 + \frac{p_T}{p_0} \right)^{-n}, \quad (4)$$

где A_q – новая постоянная фитирования, а ур. (4) – новая комбинированная функция Цаллиса-Хагедорна с внедренным поперечным потоком.

В данной работе было проведено одновременное фитирование экспериментальных спектров поперечного импульса заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов, измеренных в десяти классах центральностей Pb+Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ коллаборацией ALICE на LHC [1], с помощью новой комбинированной функции Цаллиса-Хагедорна, а также сравнение результатов с результатами фитирований, выполненных с помощью термодинамически согласованной функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком [5] для проверки эффективности новой функции. Фитирование проведено с использованием метода минимума χ^2 с помощью программы *Origin 9.1 Data Analysis and Graphing Software*. Исследование проведено при значениях p_t [0.5-8.0] ГэВ/с для $\pi^{+}\pi^{-}$, [0.2-8.0] ГэВ/с для $K^{+}K^{-}$ и [0.3-8.0] ГэВ/с для $p+\bar{p}$. Область спектра $p_T < 0.5$ ГэВ/с для пионов была вычтена, как и в работах [3-6], из-за значительного вклада распадов барионных резонансов в эту область спектра. Параметры T_0 и $\langle \beta_t \rangle$ были выбраны общими параметрами для всех типов частиц.

Экспериментальные результаты и их анализ

Результаты одновременного минимума χ^2 фитирования экспериментальных спектров поперечного импульса заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов, образованных в Pb+Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{nn}}=5.02$ ТэВ, с использованием новой комбинированной функции Цаллиса-Хагедорна с внедренным поперечным потоком (ур. (4)), а также с помощью термодинамически согласованной функции Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур. (2)) для десяти классов центральностей приведены в таб. 1. Соответствующие им кривые фитирования для двух классов центральностей Pb+Pb столкновений приведены на рис. 1 и 2.

Как видно из рис. 1 и 2, а также из значений $\chi^2/\text{ч.с.с.}$ в таб. 1, одновременно выполненные фитирования экспериментальных распределений поперечного импульса заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов в Pb+Pb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ в интервале $p_t < 8$ ГэВ/с демонстрируют хорошее согласие с данными при всех центральностях как в случае комбинированной функции Цаллиса-Хагедорна с поперечным потоком (ур. (4)), так и при использовании термодинамически

согласованного распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком (ур. (2)). Фитирование комбинированной функцией Цаллиса-Хагедорна предоставляет чуть более низкие значения температуры кинетического вымораживания, T_0 , и чуть более высокие значения средней скорости поперечного потока, $\langle \beta_t \rangle$, по сравнению со значениями, полученными с помощью термодинамически согласованной функции Цаллиса с внедрённым поперечным потоком. Однако, изменение значений этих коллективных параметров с изменением центральности столкновения совпадает для обеих функций.

Таблица 1.

Результат комбинированного минимум χ^2 фитирования с помощью комбинированной функции Цаллиса-Хагедорна с внедрённым поперечным потоком (ур. (4)) и термодинамически согласованной функции Цаллиса с внедрённым поперечным потоком (ур. (2)) экспериментальных спектров поперечного импульса p_t частиц, образованных в Pb+Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ. Ч.с.с. означает число степеней свободы. Интервалы спектров p_t следующие: [0.5-8.0] ГэВ/с для $\pi^{+}\pi^{-}$, [0.2-8.0] ГэВ/с для $K^{+}K^{-}$ и [0.3-8.0] для $p+\bar{p}$.

Центр.	Комбинированная функция Цаллиса-Хагедорна с внедрённым поперечным потоком (ур. (4))			Термодинамически согласованная функция Цаллиса с внедрённым поперечным потоком (ур. (2))		
	T_0 (МэВ)	$\langle \beta_t \rangle$	$\chi^2/\text{ч.с.с.}$	T_0 (МэВ)	$\langle \beta_t \rangle$	$\chi^2/\text{ч.с.с.}$
0-5%	63±2	0.65±0.01	6.17/109	61±2	0.64±0.01	6.27/113
5-10%	62±2	0.63±0.01	6.54/109	60±2	0.63±0.01	6.40/113
10-20%	62±2	0.62±0.01	5.62/109	61±2	0.62±0.01	5.61/113
20-30%	71±3	0.57±0.01	5.09/109	61±2	0.61±0.01	4.39/113
30-40%	66±2	0.56±0.01	3.35/109	63±2	0.57±0.01	3.21/113
40-50%	67±2	0.51±0.01	2.14/109	63±2	0.53±0.01	1.99/113
50-60%	69±2	0.45±0.01	1.19/109	67±2	0.46±0.01	1.13/113
60-70%	71±2	0.37±0.02	0.47/109	73±2	0.36±0.01	0.45/113
70-80%	79±4	0.26±0.03	0.24/109	81±2	0.25±0.01	0.24/113
80-90%	89±4	0.15±0.02	0.20/109	85±2	0.15±0.02	0.19/113

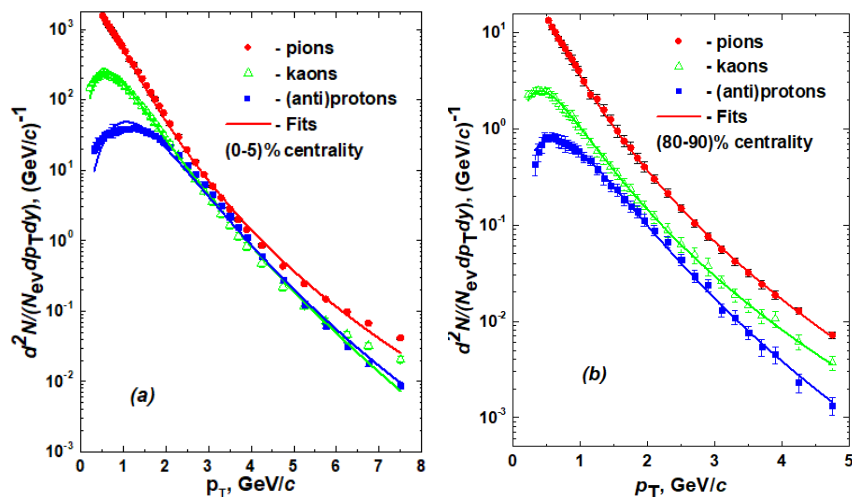


Рисунок 1. Кривые фитирования экспериментальных спектров поперечного импульса p_t заряженных пионов (●), каонов (△), протонов и антипротонов (■), образованных в Pb+Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ комбинированной функцией Цаллиса-Хагедорна с внедренным поперечным потоком (ур. (4)) при следующих центральностях: 0-5% (а), 80-90% (б).

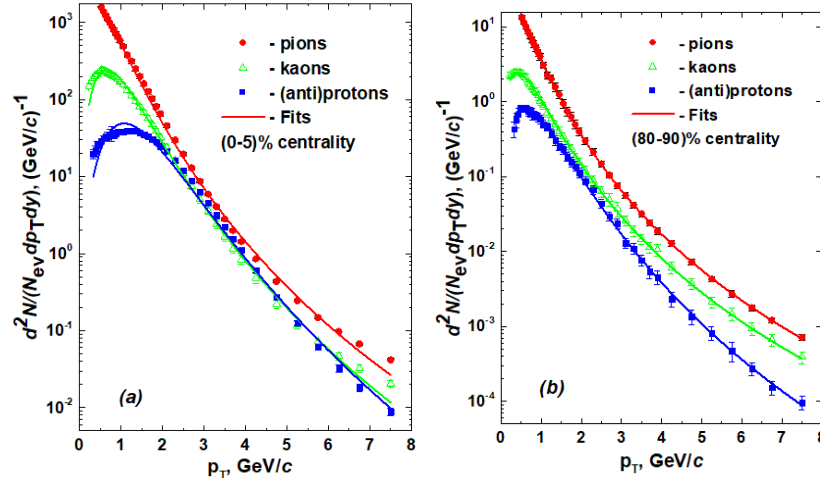


Рисунок 2. Кривые фитирования экспериментальных спектров поперечного импульса p_t заряженных пионов (●), каонов (△), протонов и антипротонов (■), образованных в Pb+Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ термодинамически согласованной функцией Цаллиса с внедренным поперечным потоком (ур. (2)) при следующих центральностях: 0-5% (а), 80-90% (б).

Вывод

В данной работе представлена новая комбинированная функция Цаллиса–Хагедорна с внедренным поперечным потоком, полученная путём объединения термодинамически согласованного распределения Цаллиса с внедрённым поперечным потоком, хорошо описывающего область низких и средних значений p_t спектров, и функции Хагедорна, эффективной при описании области спектра с высокими значениями p_t .

Полученные результаты подтверждают применимость комбинированной функции Цаллиса–Хагедорна с поперечным потоком для описания спектров поперечного импульса адронов в широком диапазоне p_t и позволяют использовать её в дальнейшем для комплексного анализа коллективных параметров столкновений тяжелых ионов на коллайдерах высокой энергии.

Литература.

1. ALICE Collaboration (S. Acharya et al.), Production of charged pions, kaons and (anti-)protons in Pb-Pb and inelastic pp collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. Phys. Rev. C 101, 044907 (2020). arXiv:1910.07678v1.
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. Kh.K. Olimov et al., Study of midrapidity p_t distributions of identified charged particles in Xe+Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.44$ TeV using non-extensive Tsallis statistics with transverse flow. Mod. Phys. Lett. A 37, 2250095 (2022).

4. Kh.K. Olimov et al., Combined analysis of midrapidity transverse momentum spectra of the charged pions and kaons, protons and antiprotons in p+p and Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV at the LHC. Mod. Phys. Lett. A 35, 2050237 (2020).
5. Kh.K. Olimov et al., Analysis of Midrapidity pT Distributions of Identified Charged Particles in Pb + Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV Using Tsallis Distribution with Embedded Transverse Flow. Universe 8, 401 (2022).
6. Kh.K. Olimov et al., Combined analysis of midrapidity transverse momentum distributions of the charged pions and kaons, protons and antiprotons in p + Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV at the LHC, Eur. Phys. J. Plus 139, 457 (2024).
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05271-3>
7. Hai Ling Lao et al., Extracting kinetic freeze-out temperature and radial flow velocity from an improved Tsallis distribution, Eur. Phys. J. A 53, 44 (2017).
8. R. Hagedorn, Multiplicities, pT Distributions and the Expected Hadron $\rightarrow$ Quark-Gluon Phase Transition, Riv. Nuovo Cim. 6 (10), 1 (1983).