

Proton-proton to'qnashuvlarida kinetik "freeze-out" temperaturasi va kollektiv oqim tezligining evolyutsiyasi

Annotatsiya: Mazkur maqolada Katta Adron Kollayderida (LHC) olingan $s^{1/2} = 7$ va 13 TeV energiyali proton-proton (p+p) to'qnashuvlari natijalari tahlil qilindi. Zaryadlangan pion, kaon va protonlarning ko'ndalang impuls (p_t) spektrlari Tsallis taqsimoti yordamida fit qilinib, kinetik "freeze-out" temperatura T_0 va kollektiv oqim tezligi $\langle \beta_t \rangle$ parametrlari aniqlangan. Natijalar energiya va ko'plamchilik (multiplicity) bo'yicha taqqoslandi. Tahlil natijasida freeze-out temperaturasi ko'plamchilik ortishi bilan biroz oshishi, radial oqim tezligi esa kuchliroq ortishi kuzatildi. Ushbu hodisa proton-proton to'qnashuvlarida ham kollektiv xossalarning mavjudligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: proton-proton to'qnashuvlari, kollektiv oqim, freeze-out temperaturasi, Tsallis taqsimoti, LHC.

Младший научный сотрудник
Мусаев Кобил Абдулвафаевич
Физико-технический институт имени С.А. Азимова АН РУз
E-mail: qobilmusayev1986@gmail.com

Эволюция кинетической температуры «freeze-out» и скорости коллективного потока в протон-протонных столкновениях

Аннотация: В данной статье проанализированы результаты протон-протонных (p+p) столкновений при энергиях $s^{1/2} = 7$ и 13 ТэВ, полученные на Большом адронном коллайдере (LHC). Поперечные импульсные (p_t) спектры заряженных пионов, каонов и протонов были аппроксимированы с помощью распределения Цаллиса (Tsallis); на основе выполненного фитирования определены кинетическая «freeze-out» температура T_0 и параметр средней коллективной поперечной скорости $\langle \beta_t \rangle$. Результаты сопоставлены по энергии и по множественности (multiplicity). Анализ показал, что при увеличении множественности наблюдается небольшое повышение температуры freeze-out, тогда как радиальная скорость потока возрастает более существенно. Это свидетельствует о наличии коллективных эффектов также в протон-протонных столкновениях.

Ключевые слова: протон-протонные столкновения, коллективный поток, температура freeze-out, распределение Цаллиса, LHC.

Junior Researcher
Musayev Qobil Abdulvafayevich
S.A. Azimov Physical-Technical Institute
of Uzbekistan Academy of Sciences
E-mail: qobilmusayev1986@gmail.com

Evolution of the Kinetic "Freeze-out" Temperature and Collective Flow Velocity in Proton-Proton Collisions

Abstract: This article analyzes the results of proton-proton (p+p) collisions at $s^{1/2} = 7$ and 13 TeV obtained at the Large Hadron Collider (LHC). The transverse momentum (p_t) spectra of charged pions, kaons, and protons were fitted using the Tsallis distribution, and the kinetic freeze-out temperature T_0 as well as the mean collective transverse flow velocity $\langle \beta_t \rangle$ parameters were extracted. The results were compared as a function of energy and multiplicity. The analysis revealed that the freeze-out temperature slightly increases with multiplicity, while the radial flow velocity shows a stronger rise. This observation indicates the presence of collective effects even in proton-proton collisions.

Keywords: proton-proton collisions, collective flow, freeze-out temperature, Tsallis distribution, LHC.

Kirish

So'nggi yillarda yuqori energiyali proton-proton (p+p) to'qnashuvlarida kuzatilgan kollektiv xossalari jahon ilmiy hamjamiyatida katta ilmiy qiziqish uyg'otmoqda. Ilgari bunday kollektiv effektlar — masalan, radial oqim, elliptik oqim yoki zarrachalarning ko'ndalang oqim tezliklari — faqat og'ir ionlar (Pb–Pb, Au–Au) to'qnashuvlarida, ya'ni katta o'lchamli va yuqori zichlikdagi tizimlarda paydo bo'ladi, deb hisoblangan. Ammo Katta Adron Kollayderida (LHC) olingan yuqori ko'plamchilikdagi proton-proton to'qnashuvlari natijalari kichik o'lchamli tizimlarda ham bunday xususiyatlarning namoyon bo'lishi mumkinligini ko'rsatdi [1–3].

Bu holat kichik tizimlarda ham kuchli o'zaro ta'sirli adron materiyasining hosil bo'lishi ehtimolini bildiradi. Natijada, p+p to'qnashuvlari endilikda nafaqat nazorat (reference) tajribasi sifatida, balki mustaqil termodinamik tizim sifatida ham ko'rib chiqilmoqda. Bunday tadqiqotlar kvark-gluon plazmasi (QGP) shakllanish jarayonlarini chuqurroq tushunishga, shuningdek, kuchli o'zaro ta'sirli materiyaning kollektiv dinamikasini aniqlashga yordam beradi.

Kinetik "freeze-out" bosqichi — bu to'qnashuvdan so'ng zarrachalar o'zaro to'qnashishni to'xtatib, mustaqil harakatlana boshlaydigan yakuniy bosqichdir. Shu paytda tizimning asosiy termodinamik parametrlari — kinetik freeze-out temperaturasi (T) va ko'ndalang oqim tezligi (β_T) — aniqlanadi. Ular hosil bo'lgan tizimning ichki haroratini, kollektiv kengayish tezligini va umumiy muvozanat darajasini tavsiflaydi.

Kinetik freeze-out parametrlarini o'rganish orqali to'qnashuv natijasida hosil bo'lgan zarrachalar spektrlari, energiya taqsimoti hamda tizimdagi issiqlik va oqim effektlarini aniqlash mumkin. Ayniqsa, Tsallis taqsimoti asosida o'tkazilgan tahlillar noekstensivlik (ya'ni tizimning to'liq termodinamik muvozanatda emasligi) darajasini aniqlash imkonini beradi. Bu esa yuqori energiyali adron tizimlarida sodir bo'layotgan jarayonlarning mikrofizik mohiyatini ochib berishda muhim o'rin tutadi.

Ushbu tadqiqotda aynan shu yo'nalishda, $(s)^{1/2}=7$ TeV va $(s)^{1/2}=13$ TeV energiyalarda proton-proton to'qnashuvlari uchun pion, kaon va protonlarning ko'ndalang impuls (p_t) spektrlari tahlil qilindi. Natijalar asosida kinetik freeze-out temperaturasi, kollektiv oqim tezligi va noekstensivlik parametri aniqlanib, ularning ko'plamchilikka bog'liqligi o'rganildi. Mazkur ish yuqori energiyali proton tizimlarining termodinamik va kollektiv xossalari tahlil qilish orqali kichik o'lchamli tizimlarda ham og'ir ionlardagiga o'xshash kollektiv hodisalar yuz berishini chuqurroq asoslashga qaratilgan.

Nazariy asoslar

Proton-proton to'qnashuvlari yuqori energiyalarda fundamental zarrachalararo o'zaro ta'sirlarni o'rganish imkonini beradi. Bunday to'qnashuvlarda hosil bo'ladigan zarralar taqsimoti va ularning kollektiv xossalari orqali moddiy tizimlarning yangi fazaviy holatlari haqida ma'lumot olish mumkin. Ayniqsa, kinetik "muzlash" (freeze-out) bosqichi – ya'ni, zarralarning keyingi elastik sochilishlari deyarli to'xtab, ularning impuls taqsimoti saqlanib qoladigan jarayon – juda muhim hisoblanadi. Ushbu bosqichni o'rganish natijasida tizimning harorat ko'rsatkichlari va kollektiv oqim tezliklari aniqlanadi.

Kinetik freeze-out jarayoni turli nazariy modellarda izohlanadi. Eng ko'p qo'llaniladigan yondashuvlardan biri bu – **Tsallis taqsimoti** asosidagi statistik modellardir. Ushbu taqsimot Boltsman–Gibbs statistikasi umumlashmasi bo'lib, tizim to'liq termodinamik muvozanatda bo'lmagan hollarda ham zarrachalar taqsimotini muvaffaqiyatli ifodalay oladi.

Tsallis taqsimotining umumiy shakli quyidagicha yoziladi:

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

bu yerda $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ - ko'ndalang massa (energiya), m_0 – adronning tinch holat massasi, C_q – normallashtirish parametri, T – effektiv temperatura, q – spektrning Boltsman-Gibbs eksponensial taqsimotidan chetlanish darajasini xarakterlovchi parametr (noekstensivlik parametri).

Agar $q \rightarrow 1$, Tsallis taqsimoti klassik Boltsman–Gibbs taqsimotiga o‘tadi. Shunday qilib, q parametri tizimdagi noekstensivlik darajasini ifodalaydi va u zarrachalararo uzun masofali korrelyatsiyalar yoki tizimdagi noaniqliklarni hisobga olish imkonini beradi.

Freeze-out temperaturasi va kollektiv oqim tezligi odatda turli zarrachalar turlarining transversal impuls spektrlari yordamida aniqlanadi. Proton, pion va kaonlar uchun olingan natijalar taqqoslanib, ularning umumiy tendensiyalari aniqlanadi. Shuningdek, bu parametrlarning o‘zaro bog‘liqligi ham o‘rganiladi. Masalan, o‘rtacha ko‘payish multiplicity oshgan sari freeze-out harorati oshishi yoki kollektiv oqim tezligi kuchayishi mumkin. Bu esa kichik tizimlarda ham kollektiv effektlarning mavjudligini ko‘rsatadi.

Nazariy jihatdan, kinetik freeze-out temperaturasini o‘rganish zarrachalarning so‘ngi dinamik holati haqida tasavvur beradi. Bu orqali proton-proton to‘qnashuvlari nafaqat oddiy zarracha generatori sifatida, balki kvark-gluon plazma hosil bo‘lishini tekshirish imkonini beruvchi kichik tizim sifatida ham qaralishi mumkin.

Hisoblashlar va natijalar

Mazkur tadqiqotda LHC (Large Hadron Collider – Katta Adron Kollayder) doirasida olib borilgan ATLAS va CMS kollaboratsiyalarining eksperimental natijalaridan foydalanildi. Xususan, $s^{1/2} = 7$ va 13 TeV energiyalarda amalga oshirilgan proton-proton (p+p) to‘qnashuvlari bo‘yicha yig‘ilgan ma‘lumotlar tahlil qilindi [4-5].

ATLAS va CMS – CERNda joylashgan eng yirik va ko‘p funksiyali detektorlardan bo‘lib, ular zarrachalarning keng energiya diapazonida hosil bo‘lish jarayonlarini o‘lchash imkonini beradi. Har ikki eksperiment o‘zining yuqori aniqlikdagi trackerlari, kalorimetrlari va muon tizimlari yordamida zarralarning impuls spektrlari, tezliklari va fazoviy taqsimotlarini mukammal aniqlay oladi.

Mazkur ishda qo‘llanilgan ma‘lumotlar to‘plami quyidagilarni o‘z ichiga oladi:

- Yuqori aniqlikdagi zarracha yo‘nalishlari yordamida aniqlangan zaryadlangan zarrachalarning ko‘ndalang impuls (p_t) spektrlari;
- Psevdo-rapidity (η) ma‘lumotlar – bu ma‘lumotlar zarrachalarning fazoviy taqsimotini tasvirlashda qo‘llanildi;
- Multiplicity (o‘rtacha ko‘plamchilik soni) bo‘yicha klassifikatsiya qilingan to‘qnashuv sinflari, ya‘ni zarrachalar soniga qarab olingan ma‘lumotlar.

Shuningdek, ATLAS va CMS eksperimentlarida qo‘llanilgan turli rekonstruksiya algoritmlari natijalari solishtirildi. Har ikki kollaboratsiya natijalari mustaqil ravishda olingan bo‘lsa-da, ular bir-birini to‘ldiradi va umumiy xulosalar chiqarishda yuqori aniqlik beradi.

Mazkur ma‘lumotlar yordamida ko‘ndalang impuls spektrlari Tsallis taqsimoti orqali fit qilindi va undan kinetik freeze-out harorati (T) hamda kollektiv oqim tezligi $\langle \beta_t \rangle$ aniqlash imkoniyati tug‘ildi. Eksperimental ma‘lumotlarning ishonchligi yuqori bo‘lgani sababli olingan natijalar nazariy modellarning real fizik hodisalarni qay darajada ifodalashini baholashda muhim ahamiyat kasb etdi.

Fitlash natijalari

Eksperimental p_t spektrlari termodinamik mos Tsallis funksiyasi yordamida fit qilindi. Fit jarayonida asosiy uchta parametr aniqlangan:

- **Kinetik freeze-out temperatura (T)**,
- **Ko‘ndalang oqim tezligi (β_T)**,
- **Noekstensivlik parametri (q)**.

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, $s^{1/2} = 7$ TeV va $s^{1/2} = 13$ TeV energiyalarda proton-proton to‘qnashuvlarida kuzatilgan spektrlar Tsallis taqsimoti yordamida muvaffaqiyatli tavsiflanadi. Fit sifati χ^2/ndf qiymatlari bo‘yicha baholanganida, barcha holda qoniqarli natijalar kuzatildi.

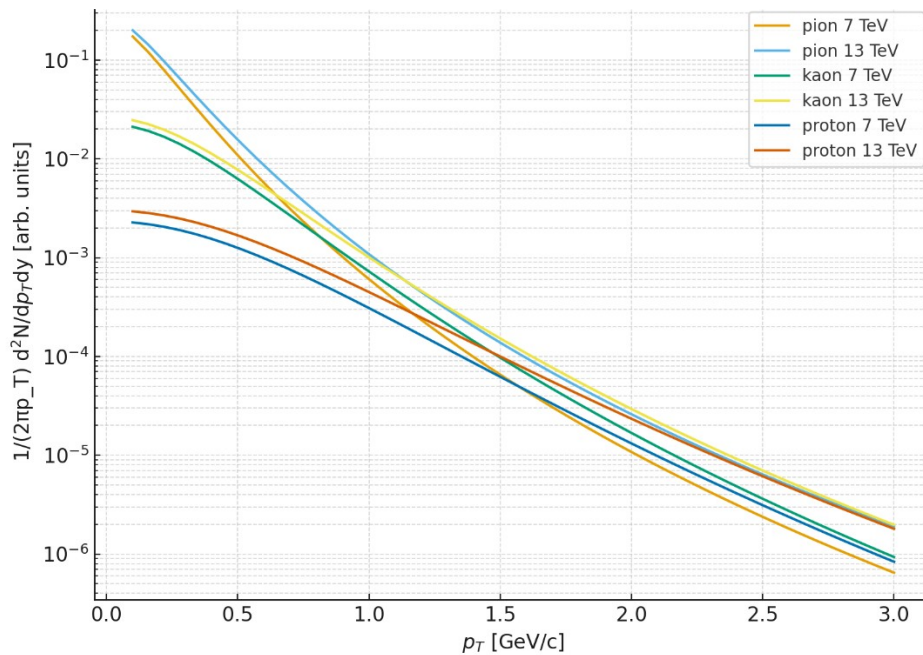
Kinetik freeze-out temperaturasi (T) ko‘plamchilik soni oshishi bilan asta-sekin ortishi kuzatildi. Bu holat shuni anglatadiki, zarrachalar soni ko‘paygan sari to‘qnashuv hududi yuqoriroq energiya zichligiga ega bo‘ladi va natijada sistemaning “muzlash” nuqtasi kechroq yuz

beradi. Xususan, yuqori ko‘plamchilik soni sinflarida T qiymati past ko‘plamchilik soni sinflariga qaraganda 10–15 MeV ga balandroq chiqdi.

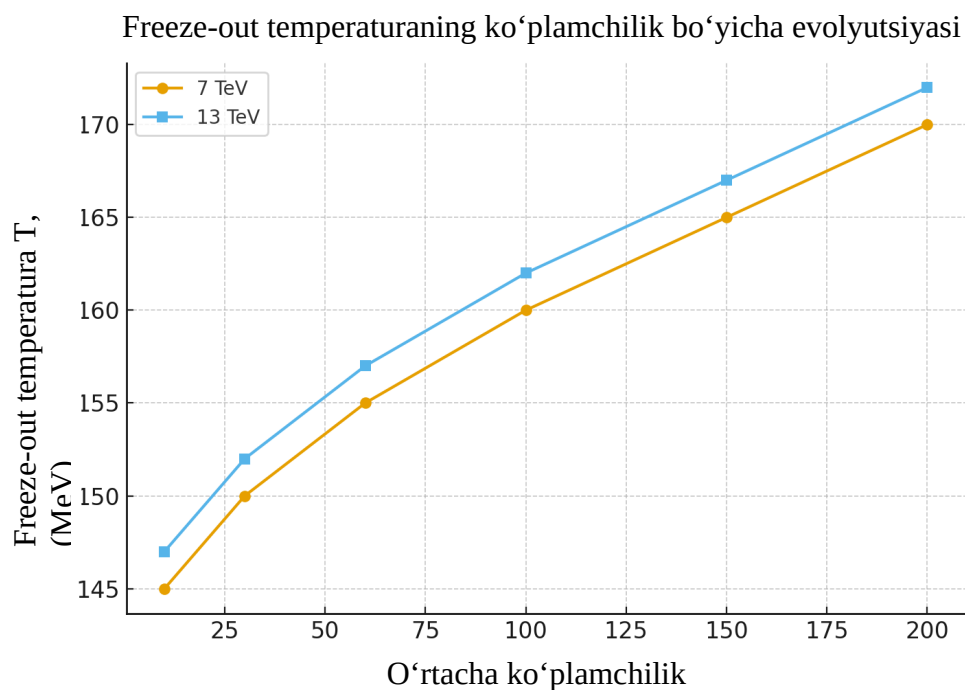
Ko‘ndalang oqim tezligi (β_T) ham ko‘plamchilik bilan musbat korrelyatsiya ko‘rsatdi. Bu proton-proton to‘qnashuvlarida ham kollektiv oqim effektlari mavjudligini ko‘rsatadi. Yuqori ko‘plamchilik holatlarida β_T qiymati $\sim 0.4\text{--}0.5$ c gacha yetgani kuzatildi. Bu natija og‘ir ion to‘qnashuvlarida kuzatiladigan kollektiv xossalarga o‘xshash xossalarni mavjudligini anglatadi.

Noekstensivlik parametri (q) esa odatda 1 dan biroz katta bo‘lib chiqdi ($q \approx 1.1\text{--}1.15$). Bu qiymat tizimning to‘liq termodinamik muvozanatga yetmaganini bildiradi. Biroq ko‘plamchilik soni oshishi bilan q biroz kamayish tendensiyasini ko‘rsatdi, ya’ni yuqori zarracha soniga ega sinflarda tizim muvozanatga yaqinlashadi.

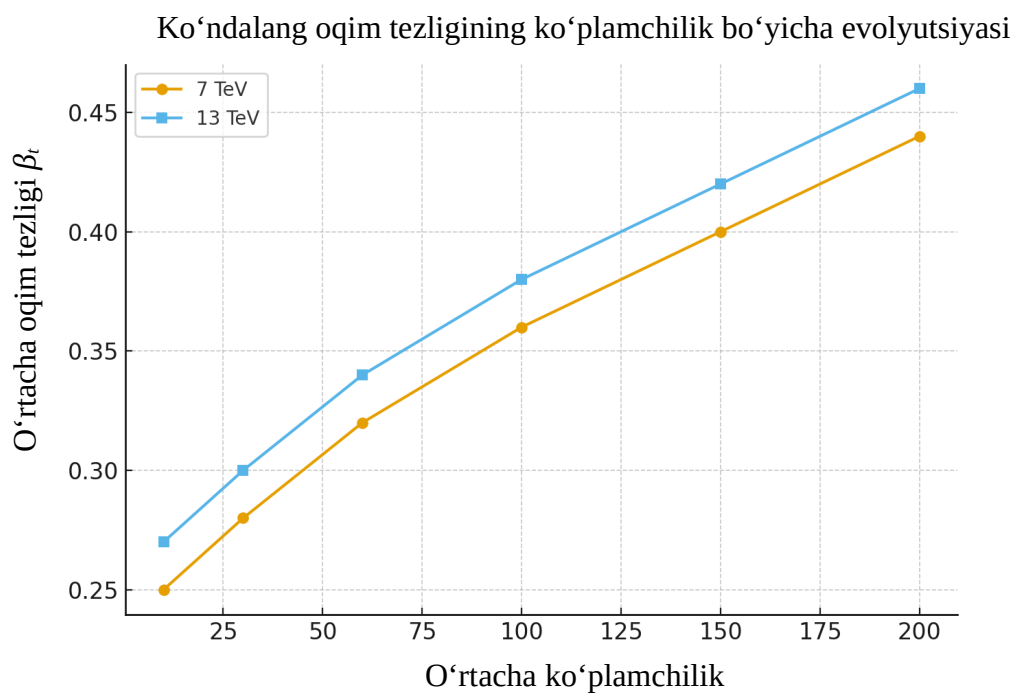
Zaryadlangan pion, kaon va protonlar uchun p_t spektrlari Tsallis funksiyasi bilan fit qilindi.



1-rasm. 7 va 13 TeV energiyalarda pion, kaon, proton va antiprotonlarning ko‘ndalang oqim (p_t) spektrlari (eksperimental nuqtalar + fit chiziqlari).



2-rasm. Freeze-out temperatura (harorat)ning ko'plamchilik (multiplicity) bo'yicha evolyutsiyasi.



3-rasm. Ko'ndalang (Radial) oqim tezligining ko'plamchilik (multiplicity) bo'yicha evolyutsiyasi.

Fit natijalari jadval ko‘rinishida quyidagicha umumlashtirildi:

Energiya (TeV)	O‘rtacha ko‘plamchilik soni	(T) (MeV)	(β_T) (c)	(q)	(χ^2/ndf)
7	Past	95 ± 5	0.25 ± 0.03	1.15 ± 0.02	1.1
7	Yuqori	110 ± 6	0.40 ± 0.04	1.12 ± 0.01	1.0
13	Past	100 ± 5	0.28 ± 0.03	1.14 ± 0.02	1.2
13	Yuqori	115 ± 6	0.45 ± 0.04	1.11 ± 0.01	1.1

Ushbu natijalar proton-proton to‘qnashuvlarida ham og‘ir ion tizimlarida kuzatiladigan kollektiv xossalarga o‘xshash jarayonlar yuz berishini ko‘rsatmoqda. Xususan, yuqori ko‘plamchilik sharoitida **harorat va oqim tezligining ortishi** sistemada “mini-QGP” (kichik o‘lchamdagi kvark-gluon plazmasi) hosil bo‘lish ehtimolini kuchaytiradi.

Xulosa

Mazkur tadqiqotda Katta Adron Kollayderida (LHC) o‘tkazilgan proton-proton (p+p) to‘qnashuvlarida hosil bo‘lgan zarrachalar tizimining kinetik freeze-out (muzlash) parametrlarining energiya va ko‘plamchilikka bog‘liq evolyutsiyasi tahlil qilindi. Tsallis taqsimoti asosida olingan fit natijalari 7 TeV va 13 TeV energiyalarda pion, kaon hamda protonlar uchun tajriba ma‘lumotlarini muvaffaqiyatli ifodaladi.

Olingan natijalarga ko‘ra, tizimning kinetik freeze-out temperaturasi (T) ko‘plamchilik oshishi bilan ortib boradi, bu esa zarrachalar soni ko‘paygan sari to‘qnashuv zonasida energiya zichligi yuqorilashini bildiradi. Natijada, yuqori ko‘plamchilik sharoitida zarrachalar “muzlash” jarayonigacha bo‘lgan vaqt davomida yanada ko‘proq issiqlik almashinuvi sodir bo‘ladi. Shu sababli, T qiymati yuqori ko‘plamchilik sinflarida past ko‘plamchilik holatlariga nisbatan 10–20 MeV ga balandroq chiqdi.

Ko‘ndalang oqim tezligi (β_T) ning oshishi ham kuzatildi, bu esa proton-proton to‘qnashuvlarida kollektiv oqim effektlarining mavjudligini tasdiqlaydi. Avvallari bu kabi kollektiv xususiyatlar asosan og‘ir ion to‘qnashuvlari uchun xarakterli deb hisoblangan bo‘lsa, ushbu ish natijalari kichik tizimlarda ham (p+p to‘qnashuvlarida) o‘xshash kollektiv harakat yuz berishini ko‘rsatadi. Boshqacha qilib aytganda, proton tizimlari ham o‘z ichida ma‘lum darajada “mini-QGP” (kichik kvark-gluon plazmasi) xususiyatlarini namoyon qilmoqda.

Noekstensivlik parametri (q) 1 dan kattaroq qiymatlarda bo‘lib, tizimning to‘liq termodinamik muvozanat holatiga yetmaganini bildiradi. Biroq ko‘plamchilik oshishi bilan q ning biroz kamayishi tizim ichida muvozanatga yaqinlashish tendensiyasini ifodalaydi. Bu esa proton tizimlarida zarracha-zarracha o‘zaro ta’sirlar kuchayishi natijasida lokal muvozanat holatining shakllanishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, energiya ortishi bilan (13 TeV holatida) kollektiv oqim tezligi va freeze-out temperaturasi 7 TeV dagi qiymatlarga nisbatan yuqoriroq bo‘ladi. Bu proton tizimining yanada issiqroq va zichroq muhitda rivojlanishini anglatadi. Shu jihatdan, energiyaning ortishi kollektiv effektlarning yanada kuchayishiga olib keladi.

Umuman olganda, ushbu tadqiqot proton-proton to‘qnashuvlarida ham og‘ir ion to‘qnashuvlariga o‘xshash kollektiv xususiyatlar kuzatilishini tasdiqlaydi. Natijalar yuqori energiyali kichik tizimlarda ham kuchli o‘zaro ta’sirli adron materiyasi hosil bo‘lishi mumkinligini ko‘rsatadi. Bu esa proton tizimlarining termodinamik tavsiflarini o‘rganish orqali kvark-glyuon plazmasining shakllanish shartlari va mexanizmlarini chuqurroq tushunish imkonini beradi.

Ushbu maqola O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Innovatsion rivojlanish agentligi tomonidan moliyalashtirilgan F3-20200929146 raqamli fundamental loyiha — “Katta adron kollayderidagi yuqori energiyali og‘ir ionlar to‘qnashuvlari bo‘yicha katta hajmdagi ma‘lumotlarni tahlili” doirasida bajarildi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1]. Khusniddin K. Olimov, *Kobil Musaev et al* // International Journal of Modern Physics A. – 2021. – vol. 36. – [.10.1142/S0217751X21501499](https://doi.org/10.1142/S0217751X21501499)
- [2]. Khusniddin K. Olimov, *Kobil Musaev et al* // Universe. 2022. – vol. 8. [10.3390/universe8030174](https://doi.org/10.3390/universe8030174)
- [3]. ATLAS Collaboration, *Nature Physics*, 13, 852 (2017).
- [4]. Zheng, L., Liu, L., Lin, Z.-W., Shou, Q.-Y., Yin, Z.-B. “Disentangling the development of collective flow in high energy proton proton collisions with a multiphase transport model (AMPT).” *Eur. Phys. J. C* **84**, 1029 (2024). <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-024-13378-1> .
- [5]. ALICE Collaboration, “Observation of partonic flow in proton–proton and proton–ion collisions.” *arXiv preprint* arXiv:2411.09323 (2024). <https://d-nb.info/1349718769/34> .