ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

КАНОКОВА ШАХНОЗА ЗАКИРОВНА

$(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 ГэВ ЭНЕРГИЯ ОРАЛИҒИДА p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb ТЎҚНАШУВЛАРИНИНГ КОЛЛЕКТИВ ХОССАЛАРИ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи техника

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2021

УДК: 539.172.12, 539.172.17

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по физико-математических наукам

Contents of dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Канокова Шахноза Закировна
$(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 ГэВ энергия оралиғида p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb тўқнашувларининг коллектив хоссалари.....3

Канокова Шахноза Закировна
Коллективные свойства p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb соударений в интервале $(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 ГэВ…….....25

Kanokova Shakhnoza Zakirovna
Collective properties of p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 GeV range…….....49

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works..... 55

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

КАНОКОВА ШАХНОЗА ЗАКИРОВНА

$(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 ГэВ ЭНЕРГИЯ ОРАЛИҒИДА p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb ТЎҚНАШУВЛАРИНИНГ КОЛЛЕКТИВ ХОССАЛАРИ

01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи техника

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2018.2.PhD/FM251 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон миллий университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифасида (www.inp.uz) ва «Ziyonet» Ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	**Олимов Хусниддин Косимович** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Бозоров Эркин Хожиевич** физика-математика фанлари доктори, профессор
	Насиров Авазбек Каримович физика-математика фанлари доктори, катта илмий ходим
Етакчи ташкилот:	**Жиззах давлат педагогика институти**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил «_____» соат _____даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ. Тел: (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz)

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот–ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек қўрғони, ЯФИ. Тел: (+99871) 289-31-19)

Диссертация автореферати 2021 йил «____» _____куни тарқатилди.
(2021 йил «___» _____даги ____ рақамли реестр баённомаси)

М.Ю. Ташметов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

О.Р. Тожибоев
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф. PhD

И. Нуритдинов
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш ҳузуридаги илмий семинар раиси ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Бугунги кунда юқори энергияли ядро-ядро тўқнашувларини ўрганиш замонавий назарий ва экспериментал физиканинг долзарб вазифаларидан биридир. Релятивистик ядро тўқнашувларида пионлар, каонлар, протонлар ва антипротонлар бундай тўқнашувларда пайдо бўладиган зич материянинг фазовий ва вақтга боғлиқ бўлган хоссалари ҳақида муҳим маълумотларга эга. Заррачаларнинг кўндаланг импульс тақсимотлари ушбу материянинг кўндаланг кенгайиши ва кенгайиб борувчи «файрбол»дан адронларнинг ажралиб чиқиш ҳарорати тўғрисида бевосита маълумотларни беради. Турли марказийликларда юқори ва ўта юқори энергиядаги ядро-ядро тўқнашувларини ўрганиш, тўқнашув марказийлигининг ўзгариши билан зич материясининг коллектив хоссалари ва унинг эволюцияси тўғрисида янги маълумотлар олишга имкон беради.

Замонавий коллайдерларда юқори энергиялар физикасини ривожлантириш учун долзарб бўлган муҳим тадқиқотлар олиб борилмоқда. Бугунги кунда Оғир ионлар релятивистик коллайдерида (ОИРК, Брукхейвен миллий лабораторияси, АҚШ) ва Катта адрон коллайдерида (КАК, ЦЕРН, Швейцария) ўтказилаётган тажрибаларнинг устувор вазифаларидан бири кварк-глюон плазмаси деб аталадиган кварклар ва глюонларнинг плазма ҳолатини яратиш ва унинг турли хил хусусиятларини батафсил ўрганишдан иборат. Катта портлашдан кейинги илк микросонияларда Олам айнан шу ҳолатда бўлган деб ҳисобланади. Лаборатория шароитида модданинг бундай ҳолатига юқори ва ўта юқори энергияларда марказий ядро-ядро тўқнашувлари натижасида эришилади. Кварк-глюон плазмасини ўрганиш замонавий физиканинг долзарб вазифаларидан биридир.

Республикамизда юқори энергияларда ядро-ядро тўқнашувлари физикасини ривожлантиришга ва бу соҳада жаҳон миқёсидаги фундаментал тадқиқотларга катта эътибор қаратилмоқда. Шунингдек, атом ядроси ва элементар заррачалар физикасида халқаро даражадаги тажриба ва назарий ишларни ўрганишга ҳам катта эътибор қаратилган. Фундаментал фанлар йўналишларини ўрганиш ва янада ривожлантиришга бўлган талаб 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида[1] ўз аксини топган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2018 йил 19 июлдаги ПФ-5484-сон «Ўзбекистон Республикасида атом энергетикасини ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2018 йил 21 сентябрдаги ПФ-5544-сон «2019-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини инновацион ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида» Фармонларида, 2017 йил 18 февралдаги ПҚ–2789-сон «Фанлар Академияси фаолияти, илмий-тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида», 2019 йил 16 октябрда ПҚ-

[1]Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги № ПФ-4947 сон Фармони «2017–2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини ривожлантиришнинг бешта устувор йўналиши бўйича Ҳаракатлар стратегияси»

4492-сон «Ўзбекистон Республикасининг ядро-энергетика дастури учун кадрлар салоҳиятини ривожлантириш стратегиясини тасдиқлаш тўғрисида» Қарорларида ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялар ривожланиши устувор йўналишларига боғлиқлиги. Диссертация тадқиқотлари республика фан ва технологияларни ривожлантиришнинг II. «Энергетика, энерготежамкорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Дунёнинг етакчи олимлари ва халқаро ҳамкорликлар томонидан юқори энергияларда оғир ионларнинг тўқнашуви натижасида ҳосил бўлган юқори зичликдаги ядро материянинг коллектив хоссалари ва эволюциясини ўрганишга бағишланган назарий ва тажрибавий тадқиқотлар, жумладан: ALICE, STAR ва BRAHMS каби халқаро коллаборацияларнинг америка ва европалик олимлари (B. Abelev, I. Arsene, J. Adams, ва б.), белгиялик (J. Cleymans, K. Redlich, A. Adronic) ва бошқа юқори энергия физикаси тадқиқотчилари томонидан олиб борилмоқда.

ALICE ҳамкорлигидаги америкалик ва европалик олимлар (B. Abelev ва бошқалар), BRAHMS ҳамкорлигидаги (I.Arsene ва бошқалар), шунингдек бошқа олимларнинг (J. Cleymans, K. Redlich, A. Adronic) ишларида гидродинамик моделлардан фойдаланилган ҳолда, $(s_{nn})^{1/2} = 2—200$ ГэВ энергия оралиғида оғир ионлар тўқнашувларидан сўнг заррачаларнинг чиқиши муваффақиятли тавсифланган. Шуни таъкидлаш керакки, гидродинамик моделлар марказий тўқнашувларга оид маълумотларни анча муваффақиятли тавсифлайди, аммо улар периферик тўқнашувлардаги маълумотларни нотўғри тавсифлайди ва бу гидродинамиканинг қўлланилиш чегарасини кўрсатади.

STAR, ALICE ва BRAHMS ҳалқаро ҳамкорликларидаги америкалик ва европалик олимлари ((J. Adams, B. Abelev, I. Arsene ва бошқ.) ўзларининг илмий ишларида зарба тўлқинининг гидродинамик модель функциялари билан Оғир ионлар релятивистик коллайдери (ОИРК, Брукхейвен миллий лабораторияси, АҚШ) ва Катта адрон коллайдеридаги (КАК, ЦЕРН, Швейцария) оғир ионлар тўқнашувларида ҳосил бўлган заррачаларнинг кўндаланг импульс моментлари (p_t) тақсимотларини тавсифлаш бўйича ишлар олиб боришган. Бироқ, Оғир ионлар релятивистик коллайдери (ОИРК, Брукхейвен миллий лабораторияси, АҚШ) ва Катта адрон коллайдери (КАК, ЦЕРН, Швейцария) экспериментал маълумотларининг модель функциялар билан тавсифлаш учун мўлжалланган кўндаланг импульс (p_t) оралиғлари ҳар хиллиги туфайли, кенгаяётган материянинг ($<\beta_t>$) кўндаланг кенгайиш тезлигини ва (T_{fo}) кинетик «совиш» ҳароратини тўғридан-тўғри таққослаш мумкин эмас, чунки бу параметрлар фойдаланилган кўндаланг импульс бўйича тавсифлаш интервалини ўзгариши ҳисобига фарқ қилиши мумкин.

Белгиялик олимлар (J. Cleymans ва бошқ.) Цаллис тақсимотидан фойдаланиб, Катта адрон коллайдерида (КАК, ЦЕРН, Швейцария) $(s)^{1/2} = 7$ ТэВ энергияли p+p тўқнашувларида заррачаларнинг 200 ГэВ/*c* гача

бўлган кўндаланг импульс тақсимотларини муваффақиятли тавсифлашдилар. Шунга қарамай, уларнинг ишларида кўндаланг импульс тақсимоти кичик интервалда (p_t<3 ГэВ/c) тавсифланганда олинган Цаллис тақсимотининг параметрларида ноаниқликлар қайд этилди.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Ўзбекистон Миллий университетининг илмий тадқиқот институтлари (ЎзР ФА Физика-техника институти «Физика-қуёш» ИИЧБ) билан илмий-педагогик малакали кадрлар тайёрлаш бўйича 2018 йилнинг 25 январида тузилган илмий ҳамкорлик шартномаси доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади юқори энергияли Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb ва p+p тўқнашувларида ҳосил бўлган зич ва иссиқ материянинг коллектив хоссалари тўғрисида янги маълумотлар олишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

$(s_{nn})^{1/2}$= 62.4—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар экспериментал кўндаланг импульс тақсимотларини феноменологик таҳлил қилиш;

$(s_{nn})^{1/2}$= 62.4—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар кўндаланг импульс спектрларининг назарий модель функциялари ёрдамида тавсифлаш учун оптимал кўндаланг импульс интерваллларини танлаш;

марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зич материянинг коллектив параметрлари (материя кўндаланг кенгайишининг ўртача тезлиги ($<\beta_t>$) ва адронларнинг «файрболдан» ажралиб бориш кинетик ҳарорати (глобал кинетик «совиш» ҳарорати T_{fo})) қийматларини олиш ва ушбу параметрларнинг тўқнашувларда иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони $<N_{part}>$ ва $(s_{nn})^{1/2}$ энергияга боғлиқлигини ўрнатиш;

$(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ва 5.02 ТэВли турли марказийликлардаги p+p ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар экспериментал кўндаланг импульс тақсимотларини таҳлил қилиш;

$(s_{nn})^{1/2}$ =2.76 ва 5.02 ТэВли турли марказийликлардаги p+p ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонларнинг кўндаланг импульс спектрларининг назарий модель функциялари ёрдамида тавсифлаш учун оптимал кўндаланг импульс интерваллларини танлаш;

$(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ва 5.02 ТэВли турли марказийликлардаги Pb+Pb тўқнашувларида материянинг кўндаланг кенгайиш ўртача тезлиги ($<\beta_t>$) ва T глобал ҳарорати қийматларини ҳисоблаб олиш ва бу параметрларнинг тўқнашувлар марказийлиги даражасига ва $(s_{nn})^{1/2}$ энергияга боғлиқлигини аниқлаш;

$(s)^{1/2}$ =2.76 ва 5.02 ТэВли p+p тўқнашувлардаги Цаллис тақсимот функциясининг q мувозанатсизлик (ноэкстенсивлик) даражаси ва T ҳарорат қийматларини ҳисоблаб олиш ва бу параметрларнинг заррачалар тури ва

$(s)^{1/2}$ энергияга боғлиқлигини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объектини юқори энергияли оғир ионлар (Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb) ва p+p тўқнашувлари ташкил этади.

Тадқиқотнинг предметини юқори энергияли p+p, Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар экспериментал кўндаланг импульс спектрлари ташкил этади.

Тадқиқот усуллари. Экспериментал маълумотларни таҳлил қилишнинг мавжуд математик статистика аппарати, аналитик тахминлар ва экспериментал маълумотларни назарий ҳамда феноменологик моделлаштириш усулларидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидаги натижалардан иборат:

$(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларда ҳосил бўлган материянинг кўндаланг (радиал) оқим ўртача тезлиги ($<\beta_t>$) ва иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони $<N_{part}>$ ўртасида тўғри боғлиқлик ўрнатилган;

$(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида олинган глобал кинетик «совиш» ҳарорати T_{fo} тўқнашувларда иштирок этган нуклонларнинг ўртача сонига $<N_{part}>$ боғлиқ эмаслиги кўрсатилган;

ўртача кинетик «совиш» ҳароратининг қиймати $<T_{fo}>$ энергия $(s_{nn})^{1/2}$ ошиши билан ортиши ва энергия қиймати $(s_{nn})^{1/2} \geq 200$ ГэВ бўлганида $<T_{fo}>$ ўзининг чегаравий қийматига етиши, $(s_{nn})^{1/2}$ = 200—5020 ГэВ энергия оралиғида эса ўзгаришсиз қолиши ўрнатилган;

$(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ва 5.02 ТэВ энергияларда Pb+Pb тўқнашувлар марказийлиги ортиб бориши билан Pb+Pb тўқнашувлар тизимининг термализация даражаси ортиб бориши ва мувозанатсизлик (ноэкстенсивлик) даражаси эса аксинча камайиб бориши кўрсатилган;

Цаллис тақсимот функциясининг T ҳарорати ва q мувозанатсизлик (ноэкстенсивлик) даражасининг p+p туқнашувлар энергияси $(s_{nn})^{1/2}$ 2.76 дан 5.02 ТэВгача ортиши билан (заррачаларнинг барча турлари учун) ошиб бориши аниқланган;

хато чегараларида мос келадиган $(s)^{1/2}$= 2.76 ва 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида коллектив кўндаланг оқим тезлигининг нол қиймати аниқланган, бу эса p+p тўқнашувларининг тўлиқ ансамблида кварк-глюон плазма шаклланиши бўйича сигнал мавжуд эмаслигини кўрсатади.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

$(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғидаги марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зич материя коллектив оқимининг ўртача тезлик қийматлари олинган;

$(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар ҳосил бўлишининг (глобал) ўртача кинетик ҳарорати баҳоланган;

$(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ва 5.02 ТэВли турли марказийликлардаги Pb+Pb тўқнашувларида зич материя коллектив оқимининг ўртача тезлиги ва

зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар ҳосил бўлишининг (глобал) ўртача кинетик ҳарорати баҳоланган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги ушбу ишда математик статистиканинг стандарт аппарати, шу жумладан χ^2 минимумининг умумий қабул қилинган усули, аналитик яқинлашувлардан фойдаланилганлиги, ОИРК ва КАК тажрибаларида олинган катта ҳажмли экспериментал натижаларни назарий ва феноменологик моделлаштирилганлиги (статистик ва ядро физикаси, термо- ва гидродинамика қонунлари асосида), шунингдек бошқа муаллифлар олган натижаларга мослиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти зич материянинг коллектив оқимининг ўртача тезлиги, шунингдек $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғида бўлган марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар ҳосил бўлишининг ўртача кинетик ҳарорати қийматлари олинганлиги хамда оғир ионларнинг марказий тўқнашувларида ҳосил бўлган зич материянинг коллектив хоссалари бўйича олинган янги фундаментал натижалари дунё маълумотлар базасини тўлдириши билан белгиланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, ушбу ишда қўлланилган усул зич материянинг коллектив оқими ўртача тезлигини ва юқори энергияли ядро-ядро тўқнашувларида заррачалар ҳосил бўлишининг ўртача кинетик ҳароратини аниқлашда қўлланиши мумкин. Олинган натижалар эса юқори энергияли оғир ионлар тўқнашувларини тавсифлаш учун ишлатиладиган янги назарий моделлар ва ёндашувларнинг мувофиқлигини синовдан ўтказиш ва замонавий оғир ионлар тезлатгичларда, яъни Оғир ионлар релятивистик коллайдери (ОИРК, Брукхейвен миллий лабораторияси, АҚШ) ва Катта адрон коллайдери (КАК, ЦЕРН, Швейцария)да янги тажрибаларни режалаштириш учун қўлланиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—5020 ГэВ энергия оралиғида p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb тўқнашувларидаги коллектив хоссаларини ўрганиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

материянинг кўндаланг (радиал) оқим ўртача тезлиги ($<\beta_t>$) ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони $<N_{part}>$ ўртасидаги тўғри боғлиқлик № 11575103-сон Хитой миллий табиий фанлар жамғармаси ва № 201901D111043-сон Шанси вилоят илмий жамғармаси грантлари доирасида фойдаланилган (Шанси университети Назарий физика институтининг 2021 йил 24 майдаги маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши материя кўндаланг оқими тезлигининг оғир ионлар тўқнашувларининг энергиясига $(s_{nn})^{1/2}$ ва тўқнашувларда иштирок этган нуклонларнинг ўртача сонига $<N_{part}>$ боғлиқлигини ўрнатишга имкон берган;

ўртача кинетик «совиш» ҳарорати қийматининг $<T_{fo}>$ $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони $<N_{part}>$ ва энергия $(s_{nn})^{1/2}$ ўртасидаги боғлиқликлари № 11575103-сон Хитой миллий табиий фанлар жамғармаси ва № 201901D111043-сон Шанси вилоят илмий жамғармаси

грантлари доирасида (Шанси университети Назарий физика институтининг 2021 йил 24 майдаги маълумотномаси) ҳамда чет эл олимларининг илмий ишларида (халқаро журналлардаги ҳаволалар: International Journal of Modern Physics A 35, 2050167, 2020; Euro-Asia Conferences, 2021; Advances in High Energy Physics 2021, 6677885, 2021; International Journal of Modern Physics A 36, 2150149, 2021) фойдаланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши заррачалар ҳосил бўлиши кинетик ҳароратининг оғир ионлар тўқнашувларининг энергиясига $(s_{nn})^{1/2}$ боғлиқлигини аниқлашга, шунингдек, зич материянинг коллектив хоссалари ҳақидаги дунё маълумотлар базасини тўлдиришга имкон берган;

термализация ва мувозанатсизлик (ноэкстенсивлик) даражаларининг Pb+Pb тўқнашув марказийлигига боғлиқлиги, Цаллис тақсимотининг T ҳарорати ва ноэкстенсивлик параметри q (мувозанатсизлик даражаси) p+p тўқнашувларининг энергиясига боғлиқлиги ва $(s)^{1/2}$= 2.76 ва 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида коллектив кўндаланг оқимнинг деярли мавжуд эмаслиги Банну Фан ва технологиялар университетининг физика факультети ва ЎзФА Физика-техника институтининг Юқори энергиялар лабораторияси ўртасида илмий ҳамкорлик доирасида (Банну Фан ва технологиялар университетининг 2021 йил 25 майдаги маълумотномаси) протон-протон тўқнашувларида олинган экспериментал натижаларни феноменологик таҳлил қилиш учун ҳамда чет эл олимларининг илмий ишларида (халқаро журналлардаги ҳаволалар: International Journal of Modern Physics A 35, 2050167, 2020; Advances in High Energy Physics 2021, 6677885, 2021; International Journal of Modern Physics A 36, 2150149, 2021) фойдаланилган. Илмий натижаларнинг қўлланилиши ОИРК ва КАК тажрибаларидаги p+p ва A+A тўқнашувларининг эффектив ҳарорати ва мувозанатсизлик (ноэкстенсивлик) параметрининг тўқнашувлар энергияси $(s_{nn})^{1/2}$ га боғлиқлигини ўрнатишга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари 7 та халқаро ва республика илмий-амалий анжуманларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация мавзуси бўйича жами 11 та илмий иш чоп этилган, шулардан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг диссертацияларнинг асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда 4 та мақола, шундан 2 таси хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, учта боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 118 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Диссертациянинг **кириш** қисмида тадқиқот мавзусининг долзарблиги ва унинг аҳамияти, ишнинг мақсад ва вазифалари, тадқиқот предмети ва объекти, ишлатилган усуллар ҳамда ундаги илмий ва амалий янгиликлар, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти, Ўзбекистон Республикасида фан ва техника ривожланишининг устувор йўналишларига мувофиқлиги кўрсатилиб, олинган натижаларнинг ишончлилиги, илмий ва амалий аҳамияти, иш натижалари ва апробацияси, диссертация тузилиши ва ҳажми тўғрисида маълумотлар берилган.

Диссертациянинг **«Юқори энергияли ядро-ядро тўқнашувлари бўйича олиб борилган экспериментал ва назарий ишларнинг қисқача шарҳи, феноменологик моделлар»** деб номланган биринчи бобида Катта адрон ва Оғир ионлар релятивистик коллайдерларидаги юқори энергияларда ядро-ядро тўқнашувлари бўйича экспериментал ишлар ва маълумотларни таҳлил қилиш бўйича назарий ёндашувлар кўриб чиқилган.

Материя қобиғининг доимий радиал оқим тезлиги билан сферик-симметрик кенгайишини таҳмин қилиб ва адронларнинг «совиш» вақтини аниқлаган ҳолда, Сименс ва Расмуссен жадалликнинг марказий соҳасидаги (y=0) оғир ионларнинг марказий тўқнашувларида аниқланган заррачаларнинг инвариант кўндаланг импульс спектрларини таҳлил қилиш учун қуйидаги формулани олишган:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev}p_t dp_t dy} = Z\, exp\left(-\frac{\gamma_t m_t}{T_{fo}}\right)\left\{(\gamma_t m_t + T_{fo})\frac{sinh\alpha}{\alpha} - T_{fo}cosh\alpha\ \right\} \qquad (1)$$

бу ерда Z – нормаллаш коэффициенти, T_{fo} - кинетик «совиш» ҳароратининг баҳолашда ишлатилиши мумкин бўлган кенгаяётган манбанинг ҳарорати, $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ – адроннинг кўндаланг массаси (кўндаланг энергияси), $\alpha = \frac{\gamma_t \beta_t\ p_t}{T_{fo}}$, $\gamma_t = 1/\sqrt{1-\beta_t^2}$, β_t – кўндаланг кенгайиш тезлиги. Ушбу тенглама (1) Сименс-Расмуссен зарба тўлқини функцияси деб аталади.

Агар кинетик «совиш» жараёни доимий ҳароратли (гипер)юзада содир бўлса, жадалликнинг марказий соҳасида (y=0) заррачаларнинг кўндаланг импульс спектрларини таҳлил қилиш учун қуйидаги тенглама олинади:

$$\left(\frac{d^2N}{2\pi N_{ev}p_t dp_t dy}\right)_{y=0} = C_t\, exp\left(-<\gamma_t> \frac{m_t - p_t <\beta_t>}{T_{fo}}\right), \qquad (2)$$

бу ерда C_t – нормаллаш коэффициенти, $<\beta_t>$ - кўндаланг оқим тезлигининг ўртача қиймати ва $<\gamma_t> = 1/\sqrt{1-<\beta_t>^2}$ га тенг. Бу тенглама оддий кўндаланг оқим модели фукцияси деб аталади.

Шунингдек, илмий ишда Шнедерман зарба тўлқини модели ишлатилган. Шнедерман моделида материянинг кўндаланг цилиндрсимон кенгайишидан фойдаланилган, бу эса Шнедерман зарба тўлқини гидростатик моделида жадалликнинг марказий соҳасида (y=0) бўйлама инвариант Бьоркен

платосига сабаб бўлади:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev}p_t dp_t dy} = \frac{d^2N}{2\pi N_{ev}m_t dm_t dy} =$$

$$C_s\, m_t\, I_0\left(\frac{p_t sinh(tanh^{-1}<\beta_t>)}{T_{fo}}\right) K_1\left(\frac{m_t cosh(tanh^{-1}<\beta_t>)}{T_{fo}}\right), \qquad (3)$$

бу ерда C_s – нормаллаш коэффициенти, I_0 ва K_1 – модификация қилинган Бессель функциялари. Бу тенглама (3) соддалаштирилган Шнедерман модель функцияси деб аталади. (3)-тенгламадаги функция ёрдамида олинган $<\beta_t>$ ва T_{fo} қийматларини $r=0$ дан $r=R$ гача бўлган интервалда олинган ўртача қийматлари деб ҳисоблаш мумкин. Бу ерда R – ҳосил бўлган цилиндриксимон «файрбол»нинг максимал радиуси.

Нуклон-нуклон тўқнашувларида ҳосил бўлган заррачаларнинг инвариант кўндаланг импульс тақсимотларини Ҳагедорн функциясидан фойдаланган ҳолда p_t нинг кенг интерваллари да муваффақиятли тавсифлаш мумкин:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev}p_t dp_t dy} = C\left(1+\frac{m_t}{p_0}\right)^{-n}, \qquad (4)$$

бу ерда C – нормаллаш коэффициенти, p_0 ва n – функциянинг эркин параметрлари, $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ – адроннинг кўндаланг массаси (кўндаланг энергияси), m_0 – адроннинг тинч ҳолатидаги массаси.

Ушбу ишда ОИРК ва КАКда юқори энергияли p+p тўқнашувларида ўлчанган инвариант p_t (m_t) спектрларини тавсифлаш учун Цаллис тақсимоти келтирилган. Шуни таъкидлаш керакки, Цаллис тақсимот функциясининг юқори энергияли p+p тўқнашувларида ҳосил бўлган заррачаларнинг p_t - спектрларини тавсифлаш учун бир хил даражада мос келадиган бир нечта вариантлари мавжуд. Иккита параметр T ва q ёрдамида заррачаларнинг инвариант спектрларини тавсифловчи Цаллис тақсимоти жадалликнинг марказий соҳасида (y=0) қуйидагича ифодаланади:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev}p_t dp_t dy} = C_q\left(1+(q-1)\frac{m_t}{T}\right)^{-1/(q-1)}, \qquad (5)$$

бу ерда C_q – нормаллаш коэффициенти, T – ҳарорат параметри, q параметри эса тизимнинг термализация даражасини кўрсатади. q параметри «бир» (1) қийматига яқинлашганда, Цаллис тақсимоти одатий Больцман-Гиббс тақсимотига айланади. (5)-тенгламадаги бу функция оддий Цаллис тақсимоти функцияси деб аталади.

Цаллис тақсимотининг қуйидаги функцияси (жадалликнинг марказий соҳасида (y=0)) заррачалар сони, энергия зичлиги ва босим учун термодинамик мос вариантига олиб келади:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C_q m_t \left(1 + (q-1)\frac{m_t}{T}\right)^{-q/(q-1)}, \qquad (6)$$

Бу (6)-тенглама термодинамик мос бўлган Цаллис тақсимоти функцияси деб аталади.

(5) ва (6)-тенгламаларда келтирилган Цаллис тақсимотидан олинган T қийматлари эффектив ҳароратидир, бу ҳарорат иссиқлик ҳаракати ва кенгаяётган материянинг коллектив оқими (агар мавжуд бўлса) ҳиссаларини ўз ичига қамраб олади. Иссиқлик ҳаракати ва коллектив оқим эффектларини ажратиш учун коллектив кўндаланг оқимининг тезлиги Цаллис тақсимотига киритилиши керак.

(4) ва (5)-тенгламалардаги функцияларни солиштирганда, $n = 1/(q-1)$ ва $p_0 = nT$ ифодаларидан фойдаланган ҳолда ҳар иккита функция ҳам математик жиҳатдан тенг эканлигини кўриш мумкин. Кўриниб турибдики, n параметрининг катта қийматлари q нинг кичик қийматларига мос келади. T ҳарорат параметрини қўшиш учун, $p_0 = nT$ ифодасини ишлатиб, (4)-тенгламадаги функцияни қуйидаги кўринишда қайта ёзиш мумкин:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C\left(1 + \frac{m_t}{n\,T}\right)^{-n}, \qquad (7)$$

Диссертация ишида қуйидаги $m_t \to \langle\gamma_t\rangle\,(m_t - p_t\langle\beta_t\rangle)$ оддий ўзгартириш ёрдамида (7)-тенгламага коллектив кўндаланг оқим параметрини киритишнинг энг оддий усули қўлланилади. Шунда (7)-тенглама қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C\left(1 + \langle\gamma_t\rangle\frac{(m_t - p_t\langle\beta_t\rangle)}{n\,T}\right)^{-n}, \qquad (8)$$

бу ерда $<\gamma_t>= 1/\sqrt{1-<\beta_t>^2}$, $<\beta_t>$ – кўндаланг кенгайиш тезлигини ўртача қиймати. (8)-тенглама кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функцияси деб аталади.

Диссертациянинг «**Юқори энергияли марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида зарядланган заррачалар кўндаланг импульсларининг спектрлари»** деб номланган иккинчи бобида $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ энергия оралиғида марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган пионлар, каонлар, протонлар ва антипротонларнинг кўндаланг импульс спектрларини Сименс-Расмуссен «зарба тўлқини», оддий кўндаланг оқим ва Шнедерман «зарба тўлқини» функциялари билан тавсифлаш ёрдамида назарий таҳлил қилинган.

Таҳлил қилинган ОИРК ва КАКда марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида жадалликнинг марказий соҳасида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонларнинг экспериментал инвариант p_t-спектрлари (тўқнашувнинг марказийлиги ва тўқнашувларда иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони ($<N_{part}>$)) 1-жадвалда келтирилган.

1-жадвал

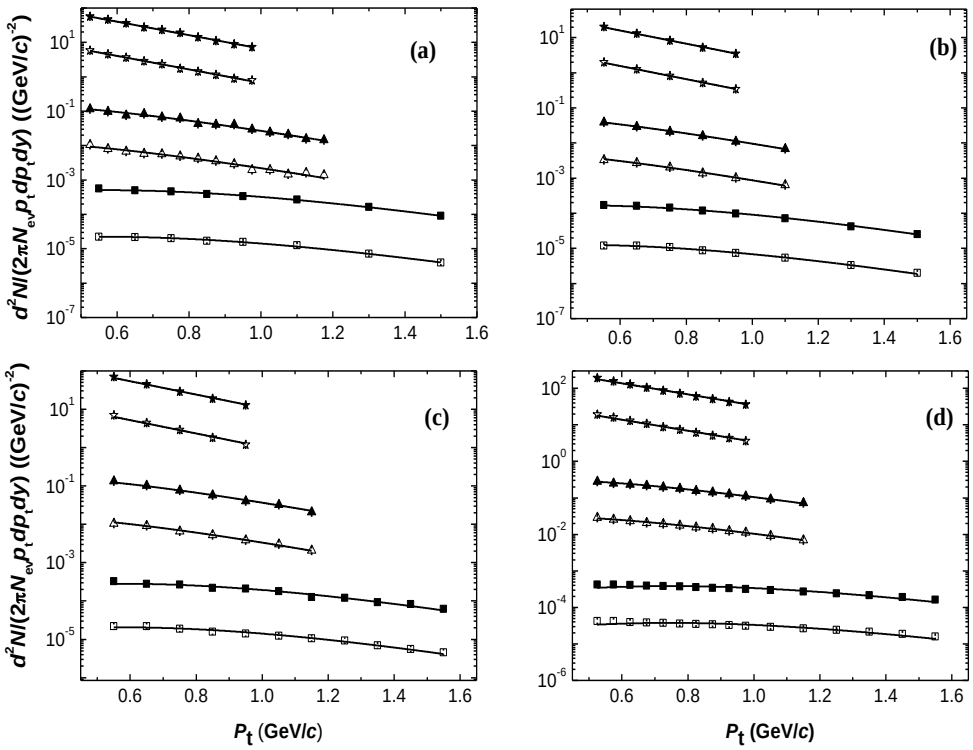
ОИРК ва КАК марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларда ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонларнинг ўлчанган инвариант p_t спектрлари ҳақида маълумот (жадалликнинг марказий соҳасида (<y>=0))

Заррачалар тури	$(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВли Au+Au тўқнашувлар, марказийлиги (0-10) %, $\langle N_{part}\rangle$=314±8	$(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВли Cu+Cu тўқнашувлар, марказийлиги (0-10) %, $\langle N_{part}\rangle$=97±1	$(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВли Au+Au тўқнашувлар, марказийлиги (0-10) %, $\langle N_{part}\rangle$=328±6	$(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВли Pb+Pb тўқнашувлар, марказийлиги (0-5) %, $\langle N_{part}\rangle$=383±2
	ўлчанган p_t оралиғи (ГэВ/c) (y оралиғи)	ўлчанган p_t оралиғи (ГэВ/c) (y оралиғи)	ўлчанган p_t оралиғи (ГэВ/c) (y оралиғи)	ўлчанган p_t оралиғи (ГэВ/c) (y оралиғи)
π^+	0.2-2.0 ($\lvert y\rvert < 0.2$)	0.3-2.35 ($\langle y\rangle = 0$)	0.2-1.9 ($\langle y\rangle = 0$)	0.1-3.0 ($\lvert y\rvert < 0.5$)
π^-	0.2-2.0 ($\lvert y\rvert < 0.2$)	0.3-2.35 ($\langle y\rangle = 0$)	0.2-1.9 ($\langle y\rangle = 0$)	0.1-3.0 ($\lvert y\rvert < 0.5$)
K^+	0.4-1.8 ($\lvert y\rvert < 0.15$)	0.4-2.35 ($\langle y\rangle = 0$)	0.4-1.9 ($\langle y\rangle = 0$)	0.2-3.0 ($\lvert y\rvert < 0.5$)
K^-	0.45-1.9 ($\lvert y\rvert < 0.15$)	0.4-2.35 ($\langle y\rangle = 0$)	0.4-1.9 ($\langle y\rangle = 0$)	0.2-3.0 ($\lvert y\rvert < 0.5$)
p	0.5-8.0 ($\lvert y\rvert < 0.5$)	0.5-3.50 ($\langle y\rangle = 0$)	0.3-3.0 ($\langle y\rangle = 0$)	0.3-4.6 ($\lvert y\rvert < 0.5$)
$\bar{p}$	0.5-8.0 ($\lvert y\rvert < 0.5$)	0.5-3.50 ($\langle y\rangle = 0$)	0.3-3.0 ($\langle y\rangle = 0$)	0.3-4.6 ($\lvert y\rvert < 0.5$)

1-расмда оғир ионларнинг марказий тўқнашувларида ҳосил бўлган заррачаларнинг экспериментал инвариант p_t- спектрларини (3)-тенгламада берилган функция ёрдамида қўшма тавсифлаш сифатини намойиш қилиш учун, p_t оптимал интервалида олинган эгри чизиқлар мос равишда кўрсатилган.

1-расмда p_t бўйича қўшма тавсифлаш интерваллари қуйидагича: зарядланган пионлар учун 0.5-1.0 ГэВ/c, зарядланган каонлар учун 0.5-1.2 ГэВ/c, протонлар ва антипротонлар учун 0.5-1.6 ГэВ/c. $\langle\beta_t\rangle$ ва T_{fo} лар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган.

2-жадвалда учта модель функциялари: Сименс-Расмуссен модели функцияси, оддий кўндаланг оқим модели ва Шнедерман модели функцияси ёрдамида тавсифлаш натижаларидан ўртача қийматни ҳисоблаб чиқиш орқали олинган $\langle\beta_t\rangle$ ва T_{fo} параметрларнинг ўртача натижалари келтирилган.



π^+ (★), π^- (очиқ юлдузчалар), K^+(▲), K^-(Δ), p(■) ва $\bar{p}$(□)) спектрлари 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001 ва 0.00001 коэффициентларига мос равишда кўпайтирилган.

1-расм. $(s_{nn})^{1/2}$ = 62.4 ГэВли марказий Au+Au (a), $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВли марказий Cu+Cu (b), $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВли марказий Au+Au (c), $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли марказий Pb+Pb (d) тўқнашувларида жадалликнинг марказий соҳасида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар инвариант p_t - спектрларининг (3)-тенгламадаги функция ёрдамида қўшма тавсифлашнинг эгри чизиқлари (узлуксиз эгри чизиқлар)

2-жадвал

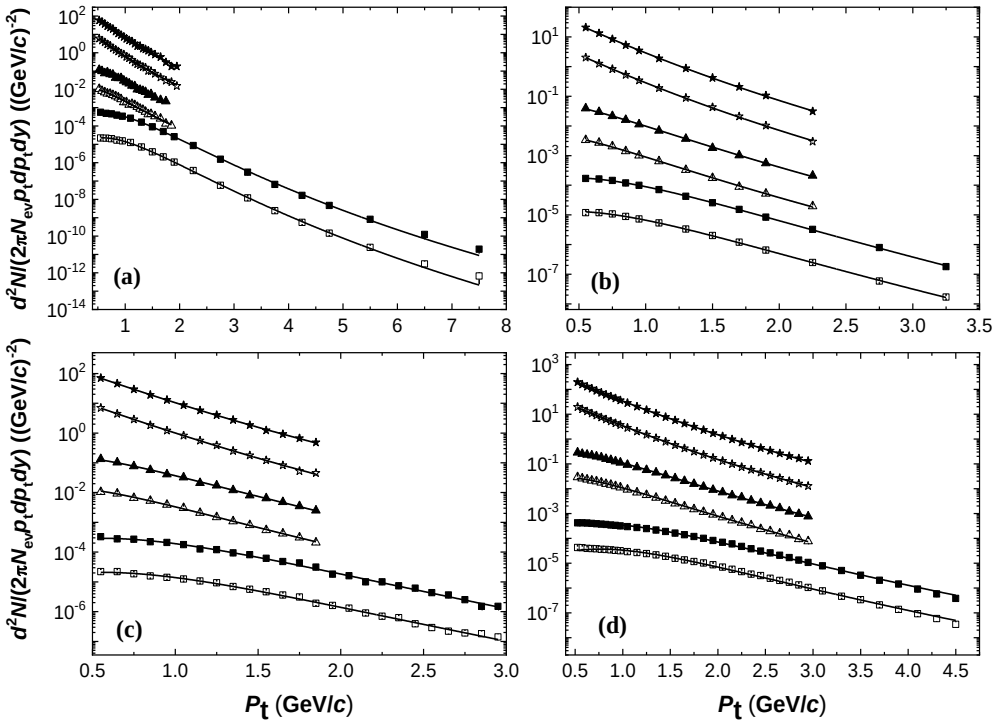
$<\beta_t>$ ва T_{fo} параметрларининг ўртача натижалари (учта модель функциялари асосида ўрта қийматда олинган)

Тўқнашувлар тури	$<\beta_t>$ (c ёруғлик тезлиги бирлигида)	T_{fo} (МэВ)
$(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВли Au+Au тўқнашувлар, марказийлиги (0-10)%, $<N_{part}>$=314±8	0.591±0.007	112±3
$(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВли Cu+Cu тўқнашувлар, марказийлиги (0-10)%, $<N_{part}>$=97±1	0.550±0.007	126±4
$(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВли Au+Au тўқнашувлар, марказийлиги (0-10)%, $<N_{part}>$=328±6	0.606±0.010	124±5
$(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВли Pb+Pb тўқнашувлар, марказийлиги (0-5)%, $<N_{part}>$=383±2	0.679±0.005	127±3

2-жадвалдан кўриниб турибдики, кўндаланг (радиал) оқим тезлигининг ўртача қиймати ($<\beta_t>$) ОИРК ва КАКда $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ энергия оралиғидаги марказий тўқнашувларда иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони $<N_{part}>$ билан ўзаро боғлиқ. Энг катта кўндаланг оқим ўртача

тезлиги ($<\beta_t>$=0.68±0.01) $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли иштирок этган нуклонларнинг сони энг кўп ($<N_{part}>$=383±2) бўлган марказий Pb+Pb тўқнашувларда КАКда кузатилади. Энг кичик кўндаланг оқим ўртача тезлиги ($<\beta_t>$= 0.55±0.01) эса $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВда иштирок этган нуклонларнинг сони энг кам ($<N_{part}>$ =97±1) бўлган марказий Cu+Cu тўқнашувларда ОИРКда кузатилади. 2-жадвалдан кўриниб турибдики, олинган глобал кинетик «совиш» ҳарорати T_{fo} таҳлил қилинаётган оғир ионлар марказий тўқнашувларида иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони $<N_{part}>$га боғлиқлиги кузатилмайди. Олинган глобал кинетик «совиш» ҳарорати тўқнашувлар энергияси $(s_{nn})^{1/2}$га боғлиқликга эга: $(s_{nn})^{1/2}$ =62.4 ГэВ бўлганида T_{fo} минимал қиймати (112±5 МэВ)га эга бўлади ва $(s_{nn})^{1/2}$ ортиши билан ошиб, $(s_{nn})^{1/2}\geq$ 200 ГэВ бўлганида ўзининг чегаравий ўртача қиймати ($<T_{fo}>$=126±7 МэВ)га эришади, яъни $(s_{nn})^{1/2}$ = 200—2760 ГэВ энергиялар оралиғида T_{fo} деярли ўзгаришсиз қолади.

Қўшма тавсифлаш сифатини намойиш қилиш мақсадида таҳлил қилинаётган оғир ионларнинг марказий тўқнашувларида ҳосил бўлган заррачаларнинг экспериментал инвариант p_t- спектрларини (8)-тенглама ёрдамида тавсифлаш орқали олинган эгри чизиқлар 2-расмда (бутун $p_t\geq$0.5 ГэВ/*c* интервалда) кўрсатилган.



π^+ (★), π^- (очиқ юлдузчалар), K^+(▲), K^-(Δ), p(■) ва $\bar{p}$(□)) спектрлари 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001 ва 0.00001 коэффициентларига мос равишда кўпайтирилган.

2-расм. $(s_{nn})^{1/2}$ = 62.4 ГэВли марказий Au+Au (a), $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВли марказий Cu+Cu (b), $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВли марказий Au+Au (c), $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли марказий Pb+Pb (d) тўқнашувларида жадалликнинг марказий соҳасида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонларнинг инвариант p_t – спектрларининг (8)-тенгламадаги функция билан қўшма тавсифлашнинг эгри чизиқлари (узлуксиз эгри чизиқлар)

2-расмда p_t бўйича қўшма тавсифлаш интерваллари барча заррачалар учун қуйидагича: $p_t \geq 0.5$ГэВ/c. $<\beta_t>$ ва T_{fo} лар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган.

$<\beta_t>$ ва T_{fo} параметрларининг оддий кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8-тенглама) фойдаланган ҳолда зарядланган пионлар, каонлар, протонлар ва антипротонлар инвариант p_t-спектрларининг $p_t \geq 0.5$ ГэВ/с ўлчанган интервалда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган қийматлари (КАК ва ОИРКда, марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида) 3-жадвалда кўрсатилган.

3-жадвал

$<\beta_t>$ ва T_{fo} параметрларининг оддий кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8-тенглама) фойдаланган ҳолда зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар инвариант p_t-спектрларининг $p_t \geq 0.5$ ГэВ/с ўлчанган интервалда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган қийматлари (э.д.с.-эркинлик даражаси сони)

Тўқнашувлар тури	$<\beta_t>$ (c ёруғлик тезлиги бирлигида)	T (МэВ)	χ^2/э.д.с. *(э.д.с.)*
$(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВда Au+Au тўқнашувлари, марказийлиги (0-10)%, $<N_{part}>$=314±8	0.53 ± 0.01	74 ± 5	0.43 (121)
$(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВда Cu+Cu тўқнашувлари, марказийлиги (0-10)%, $<N_{part}>$=97±1	0.41 ± 0.01	111 ± 5	0.26 (56)
$(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВда Au+Au тўқнашувлари, марказийлиги (0-10)%, $<N_{part}>$=328±6	0.51 ± 0.02	102 ± 8	0.33 (92)
$(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВда Pb+Pb тўқнашувлари, марказийлиги (0-5)%, $<N_{part}>$=383±2	0.63 ± 0.01	103 ± 3	0.50 (182)

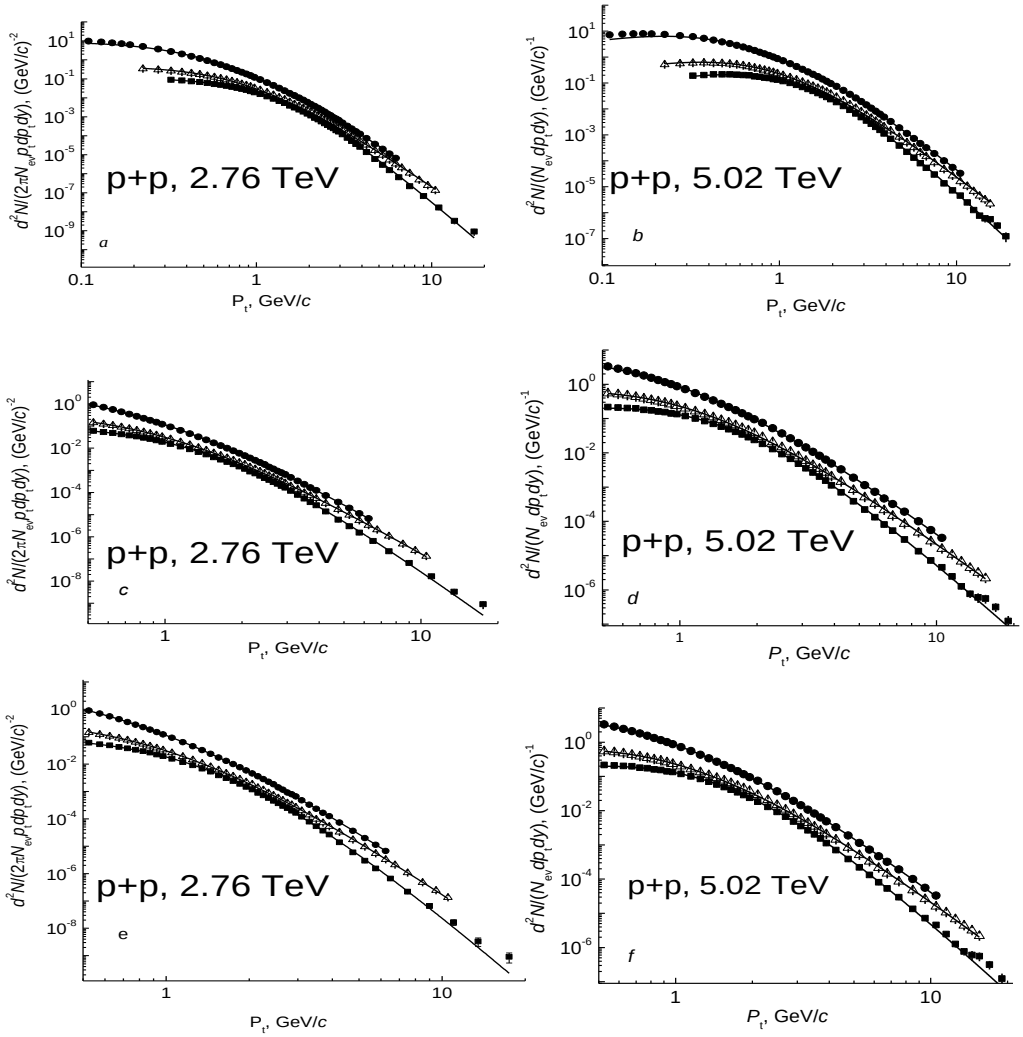
3-жадвалда p_t бўйича қўшма тавсифлаш интерваллари, бу – барча заррачалар учун $p_t \geq 0.5$ГэВ/c ўлчанган интервали. $<\beta_t>$ ва T лар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган.

2-расмдан ва 3-жадвалдаги χ^2/э.д.с. қийматларидан кўриниб турибдики, (8)-тенгламада келтирилган оддий кўндаланг оқим киритилган Хагедорн формуласи зарядланган пионлар, каонлар, протонлар ва антипротонларнинг экспериментал инвариант p_t- спектрларини $p_t \geq 0.5$ ГэВ/c ўлчанган интервалда яхши тавсифлайди (КАК ва ОИРКда, марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида жадалликнинг марказий соҳасида ҳосил бўлган заррачалар учун). 3-жадвалдан кўриниб турибдики, (8)-тенгламадан олинган $<\beta_t>$ ва T параметрларининг қийматлари паст оптимал p_t интервалда олинган ва 2-

жадвалда келтирилган $<\beta_t>$ ва T_{fo} параметрларининг ($<N_{part}>$) ва $(s_{nn})^{1/2}$ га нисбатан боғлиқлигларини яхши такрорлайди. 3-жадвалдан кўриниб турибдики, энг катта кўндаланг оқим ўртача тезлиги ($<\beta_t> = 0.63\pm0.01$) $(s_{nn})^{1/2} = 2.76$ ТэВли иштирок этган нуклонларнинг сони энг кўп ($<N_{part}> = 383\pm2$) бўлган марказий Pb+Pb тўқнашувларда КАКда кузатилади. Энг кичик кўндаланг оқим ўртача тезлиги ($<\beta_t> = 0.41\pm0.01$) $(s_{nn})^{1/2} = 200$ ГэВли иштирок этган нуклонларнинг сони энг кам ($<N_{part}>=97\pm1$) бўлган марказий Cu+Cu тўқнашувларда ОИРКда кузатилади. Ҳарорат параметри T нинг олинган қиймати таҳлил қилинаётган оғир ионлар марказий тўқнашувларида иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони ($<N_{part}>$)га боғлиқлиги кузатилмайди. T глобал параметрининг олинган қиймати $(s_{nn})^{1/2}$ га боғлиқликга эга, яъни $(s_{nn})^{1/2}$ =62.4 ГэВ бўлганида T минимал қийматга эга бўлади ва $(s_{nn})^{1/2}$ ортиши билан ошиб, $(s_{nn})^{1/2} \geq 200$ ГэВ бўлганида ўзининг чегаравий қийматига эришади, $(s_{nn})^{1/2}$ =200—2760 ГэВ энергиялар диапозонида T ўзгаришсиз қолади.

Диссертациянинг **«$(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p ва Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган заррачаларнинг кўндаланг импульслари тақсимотларининг қиёсий таҳлили»** деб номланган учинчи бобида $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВ энергия оралиғидаги p+p ва марказий, яриммарказий ва периферик Pb+Pb тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган заррачалар кўндаланг импульс тақсимотларига оид қиёсий таҳлил натижалари келтирилган (Цаллис тақсимоти функцияси ва кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан фойдаланган ҳолда).

3(a) - 3(d) - расмда $(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар экспериментал кўндаланг импульс спектрларининг барча ўлчанган p_t интервалда, шунингдек, термодинамик мос бўлган Цаллис тақсимоти функциясидан (5-тенглама) фойдаланган ҳолда зарядланган пионлар, каонлар, протонлар ва антипротонлар p_t-спектрларининг $p_t \geq 0.5$ ГэВ/с ўлчанган интервалда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган эгри чизиқлар келтирилган. 3(a)-(d)-расмдан кўриниб турибдики, $(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларда ҳосил бўлган зарядланган заррачаларнинг экспериментал p_t-спектрлари термодинамик мос бўлган Цаллис тақсимоти функцияси билан яхши тавсифланади. $(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларда кўндаланг радиал оқимнинг пайдо бўлиши қай даражада сезиларли бўлишини текшириш мақсадида, кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8-тенглама) фойдаланиб, ушбу тўқнашувларда ҳосил бўлган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар p_t-спектрларининг минимум χ^2 қўшма тавсифлаш амалга оширилди. $<\beta_t>$ ва T лар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган. 3(e)-(f) расмдан кўриниб турибдики, кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функцияси $(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларда ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар кўндаланг импульс спектрларини яхши тавсифлайди.



3-расм. Зарядланган (π^++π^-) пионлар(●), зарядланган (K^++K^-) каонлар (Δ), протонлар ва антипротонлар (p+$\bar{p}$) (■) экспериментал кўндаланг импульс спектрлари (p_t нинг барча ўлчанган интервалларида $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ (a)ли p+p тўқнашувлари ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВ (b)ли p+p тўқнашувлари); p_t≥0.5 ГэВ/*c* соҳада, $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ (c, e)ли p+p тўқнашувлари ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВ (d, f)ли p+p тўқнашувларида)

3-расмдаги узлуксиз эгри чизиқлар – зарядланган заррачаларнинг кўндаланг импульслари экспериментал спектрларининг термодинамик мос бўлган Цаллис тақсимоти функцияси (5-тенглама) ва кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функцияси (8-тенглама) билан минимум χ^2 қўшма тавсифлашнинг натижалари.

4-жадвалда термодинамик мос бўлган Цаллис тақсимоти функцияси (5-тенглама) ёрдамида минимум χ^2 қўшма тавсифлаш натижасида олинган q ва T параметрларининг таққосланиши (солиштирилиши) келтирилган ($(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида, p_t бўйича тавсифлашнинг бир хил интервалларини қўллаган ҳолда).

4-жадвалда T заррачалар спектрларининг қўшма тавсифлаш учун умумий параметр бўлган. p_t нинг тавсифлаш интерваллари ($(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида) зарядланган пионлар учун

0.5-6.5, каонлар учун 0.5-11.0, протон ва антипротонлар учун 0.5- 20.0 ГэВ бўлган. Бу ерда э.д.с.-эркинлик даражаси сони.

4-жадвал

Термодинамик мос бўлган Цаллис тақсимоти (5-тенглама) q ва T параметрларининг таққосланиши (солиштирилиши) ($(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида)

Тўқнашувлар тури	$(s)^{1/2}$=2.76 ТэВли $p+p$				$(s)^{1/2}$=5.02 ТэВли $p+p$			
Заррачалар тури	Cq ($c^4/ГэВ^3$)	q	T (МэВ)	χ^2/э.д.с. (э.д.с.)	Cq ($c^4/ГэВ^3$)	q	T (МэВ)	χ^2/э.д.с. (э.д.с.)
$\pi^+ + \pi^-$	194±6	1.139± 0.001	95±1	0.28 (123)	181±7	1.146± 0.001	98±1	1.19 (115)
$K^+ + K^-$	73±3	1.144± 0.001			68±3	1.150± 0.001		
$p+\bar{p}$	179±8	1.116± 0.001			132±7	1.126± 0.001		

4-жадвалдан кўриниб турибдики, Цаллис тақсимот функциясининг T ҳарорати ва q ноэкстенсивлик параметри тўқнашувларнинг энергияси $(s)^{1/2}$ ошиши билан (барча заррачалар учун) ортади ($(s)^{1/2}$ = 2.76 дан 5.02 ТэВгача бўлган p+p тўқнашувларда). Бу $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли «тез» p+p тўқнашувлар термализациянинг паст даражасига (мувозанатсизликнинг юқори даражасига) олиб келишини кўрсатади. ($(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВли p+p тўқнашувларга нисбатан).

5-жадвалда n, $<\beta_t>$ ва T параметрларининг кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан фойдаланган ҳолда $(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларда ҳосил бўлган заррачаларнинг p_t бўйича бир хил интервалда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган қийматларини таққосланиши (солиштирилиши) келтирилган.

5-жадвал

Кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функцияси n, $<\beta_t>$ ва T параметрларининг таққосланиши ($(s)^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларида)

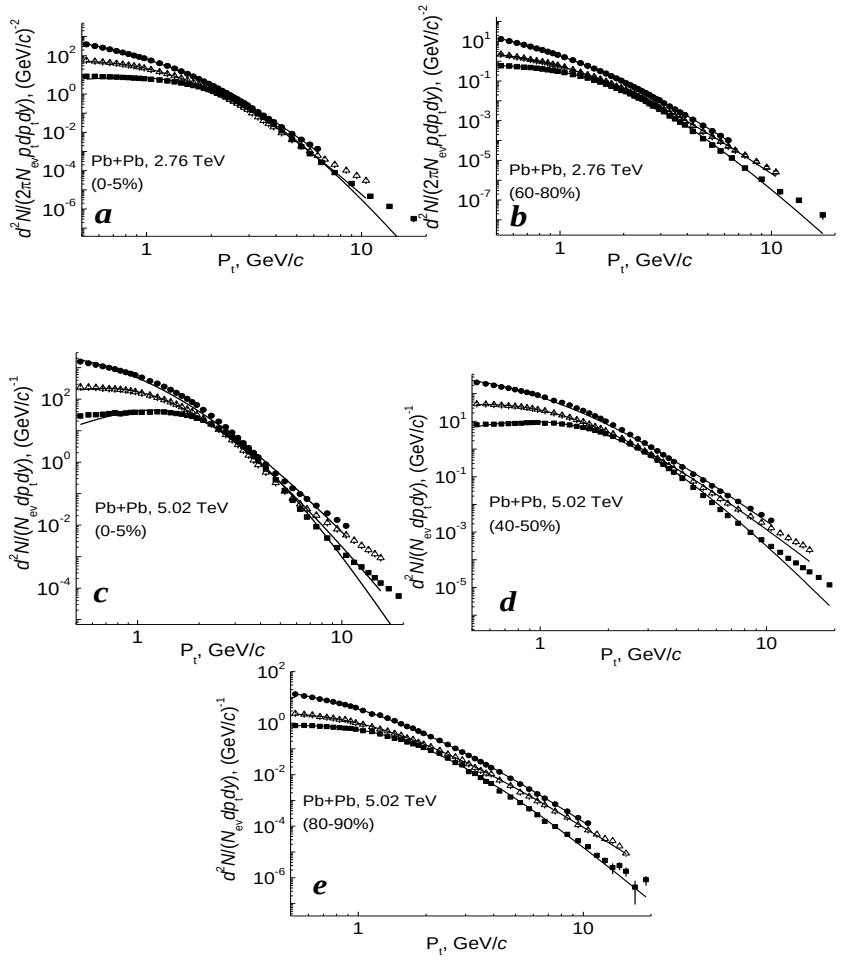
Тўқнашувлар тури	$(s)^{1/2}$=2.76 ТэВли $p+p$			$(s)^{1/2}$=5.02 ТэВли $p+p$		
Заррачалар тури	$\pi^+ + \pi^-$	$K^+ + K^-$	$p+\bar{p}$	$\pi^+ + \pi^-$	$K^+ + K^-$	$p+\bar{p}$
C $(ГэВ/c)^{-2}$	29±1	11±1	28±2	27±1	10±1	20±2
n	7.35±0.05	7.10±0.03	9.00±0.05	7.02±0.05	6.82±0.03	8.21±0.06
$\langle\beta_t\rangle$ (c ёруғлик тезлиги ўлчамида)	0±0.017			0±0.023		
T (МэВ)	121±3			127±4		
χ^2/э.д.с. (э.д.с.)	0.26 (122)			0.97 (114)		

5-жадвалда $<\beta_t>$ ва Tлар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар

спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган. p_t бўйича тавсифлаш интерваллари (($s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ ва $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларда) зарядланган пионлар учун 0.5-6.5, каонлар учун 0.5-11.0, протон ва антипротонлар учун 0.5- 20.0 ГэВ бўлган. c – ёруғликнинг вакумдаги тезлиги.

5-жадвалдан кўриниб турибдики, $(s)^{1/2}$= 2.76 ва 5.02 ТэВли $p+p$ тўқнашувларда кўндаланг (радиал) оқим деярли кузатилмайди.

4(a) ва 4 (b) расмларда $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли марказий (0-5)% (a) ва периферик (60-80)% (b) Pb+Pb тўқнашувларда ҳосил бўлган зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар экспериментал кўндаланг импульс спектрлари билан бирга оддий кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8 - тенглама) фойдаланган ҳолда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган эгри чизиқлар мос равишда келтирилган.



4-расм. Зарядланган $(\pi^+ + \pi^-)$ пионлар, зарядланган $(K^+ + K^-)$, каонлар, протонлар ва антипротонлар $(p+\bar{p})$ кўндаланг импульсларининг экспериментал спектрлари ($p_t \geq$ 0.5 ГэВ/с интервалда $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли марказий (0-5)% (a) ва периферик (60-80)% (b) Pb+Pb тўқнашувларида; $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли марказий (0-5)% (c), яримма рказий (49-50)% (d) ва периферик (60-80) % (e) Pb+Pb тўқнашувларида)

Ушбу минимум χ^2 қўшма тавсифлаш натижалари 6-жадвалда келтирилган. 4(c), 4(d) ва 4(e)-расмларда $(s_{nn})^{1/2}$=5.02 ТэВли марказий (0-5)% (a) ва периферик (60-80)% (b) Pb+Pb тўқнашувларда ҳосил бўлган зарядланган ($\pi^+ + \pi^-$) пионлар, зарядланган ($K^+ + K^-$) каонлар, протонлар ва антипротонлар ($p + \bar{p}$) экспериментал кўндаланг импульс спектрлари билан бирга кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8-тенглама) фойдаланган ҳолда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган эгри чизиқлар мос равишда келтирилган. Ушбу минимум χ^2 қўшма тавсифлаш натижалари эса 7-жадвалда келтирилган.

4-расмдаги узлуксиз эгри чизиқлар – зарядланган заррачаларнинг экспериментал кўндаланг импульс спектрларининг кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функцияси ёрдамида минимум χ^2 қўшма тавсифлашнинг натижалари.

6-жадвал

Кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8-тенглама) фойдаланган ҳолда зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар p_t - спектрларининг $p_t \geq 0.5$ ГэВ/с ўлчанган интервалда минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган $<\beta_t>$ ва T параметрлари қийматларининг таққосланиши ($(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли марказий (0-5) % ва периферик (60-80)% Pb+Pb тўқнашувларида)

Тўқнашувлар тури	$(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ТэВли Pb+Pb					
Тўқнашувлар марказийлиги ($<N_{part}>$)	(0-5)% ($<N_{part}>$=383±17)			(60-80)% ($<N_{part}>$=23±12)		
Заррачалар тури	$\pi^+ + \pi^-$	$K^+ + K^-$	$p + \bar{p}$	$\pi^+ + \pi^-$	$K^+ + K^-$	$p + \bar{p}$
C (ГэВ/с)$^{-2}$	7560±845	8376±1402	45899±12493	347±21	182±15	654±90
n	10.7±0.4	11.9±0.4	14.4±0.4	7.9±0.1	7.8±0.1	10.2±0.1
$<\beta_t>$ (c ёруғлик тезлиги ўлчамида)	0.66±0.01			0.36±0.01		
T (МэВ)	78±4			94±3		
χ^2/э.д.с. (э.д.с.)	3.14 (122)			0.51 (122)		

6-жадвалда p_t бўйича қўшма тавсифлаш интерваллари, бу – барча заррачаларнинг $p_t \geq 0.5$ ГэВ/c ўлчанган интервали. $<\beta_t>$ ва Tлар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган. p_t бўйича тавсифлаш интерваллари ($(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли Pb+Pb тўқнашувларида) зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар учун мос равишда 0.5-6.5, 0.5-11.0 ва 0.5- 20.0 ГэВ/с ни ташкил этади.

7-жадвал

Кўндаланг оқим киритилган Хагедорн функциясидан (8-тенглама) фойдаланган ҳолда зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар кўндаланг импульс спектрларининг минимум χ^2 қўшма тавсифлаш орқали олинган <β_t> ва *T* параметрларининг таққосланиши ($(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли марказий (0-5) %, яриммарказий (40-50)% ва периферик (80-90)% Pb+Pb тўқнашувларида)

Тўқнашувлар тури	Тўқнашувлар марказийлиги (<N_{part}>)	Заррачалар тури	C (ГэВ/с)$^{-2}$	*n*	$\langle\beta_t\rangle$ (ёруғлик тезлиги ўлчамида *c*)	*T* (МэВ)	χ^2/э.д.с. (э.д.с.)
$(s_{nn})^{1/2}$=5.02 ТэВли Pb+Pb	(0-5)% (<N_{part}>= 384±17)	$\pi^+ + \pi^-$	19402±3796	8.1±0.2	0.70±0.01	55±4	28.98 (124)
		$K^+ + K^-$	32537±9627	9.3±0.3			
		$p+\bar{p}$	229107±109103	11.3±0.4			
	(40-50)% (<N_{part}>= 87±13)	$\pi^+ + \pi^-$	2845±331	7.3±0.1	0.55±0.02	68±3	11.65 (124)
		$K^+ + K^-$	2406±380	7.6±0.1			
		$p+\bar{p}$	10336±2638	9.6±0.2			
	(80-90)% (<N_{part}>= 8±5)	$\pi^+ + \pi^-$	120±6	7.1±0.1	0.10±0.02	144±4	0.73 (124)
		$K^+ + K^-$	48±3	6.8±0.1			
		$p+\bar{p}$	115±12	8.6±0.1			

7-жадвалда p_t бўйича қўшма тавсифлаш интерваллари, бу – барча заррачаларнинг $p_t \geq 0.5$ ГэВ/*c* ўлчанган интервали. <β_t> ва *T* лар тўқнашувларда ҳосил бўлган барча заррачалар спектрларини қўшма тавсифлашда умумий параметрлар бўлган. p_t бўйича тавсифлаш интерваллари ($(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли Pb+Pb тўқнашувларида) зарядланган пионлар ва каонлар, протонлар ва антипротонлар учун мос равишда 0.5-11.0, 0.5-1.0 ва 0.5- 20.0 ГэВ/с ни ташкил этади.

6 ва 7-жадваллардан кўриниб турибдики, $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ва 5.02 ТэВли Pb+Pb тўқнашувларнинг марказийлиги ошиши билан кўндаланг оқим тезлигининг қиймати <β_t> ҳам ортади, *T* ҳарорати эса пасаяди. $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВли марказий (0-5)% Pb+Pb тўқнашувлари $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВли марказий (0-5)% Pb+Pb тўқнашувларига нисбатан сезиларли даражада юқори кўндаланг оқим тезлиги билан фарқ қилади. Шунингдек, 6 ва 7-жадваллардан кўриниб турибдики, барча параметрлар учун $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВли Pb+Pb тўқнашувлар марказийлиги ортиши билан *n* параметр қийматлари ҳам ортади, бу эса *q* ноэкстенсивлик параметрининг пасайишига ва унинг (1) га яқинлашишига мос келади. Шундан келиб чиқадики, КАК энергияларида Pb+Pb тўқнашувлар тизимининг термаллашиш даражаси ошади ва тўқнашувлар марказийлиги ортиши билан ноэкстенсивлик даражали пасаяди.

ХУЛОСА

«$(s_{nn})^{1/2}$=62—5020 ГэВ энергия оралиғида p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb тўқнашувларининг коллектив хоссалари» мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси доирасида бажарилган тадқиқотлар асосида қуйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғидаги марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида кўндаланг (радиал) оқимининг ўртача тезлиги (<β_t>) ва иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони <N_{part}> ўртасида мусбат корреляция аниқланди;

2. $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 ГэВ энергия оралиғидаги марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида глобал кинетик «совиш» ҳарорати T_{fo} иштирок этган нуклонларнинг ўртача сони <N_{part}>га боғлиқ эмаслиги кўрсатилди;

3. Марказий Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида ўртача кинетик «совиш» ҳарорати <T_{fo}> масса маркази системасида тўқнашувлар энергиясига боғлиқлиги аниқланди: $(s_{nn})^{1/2}$ =62.4 ГэВ бўлганида <T_{fo}> минимал қиймати (112±5 МэВ)га эга бўлади ва $(s_{nn})^{1/2}$ ортиши билан ошиб, $(s_{nn})^{1/2}\geq$ 200 ГэВ бўлганида ўзининг чегаравий ўртача қиймати (<T_{fo}>=126±7 МэВ)га эришади, яъни $(s_{nn})^{1/2}$ = 200—2760 ГэВ энергиялар оралиғида <T_{fo}> деярли ўзгармайди. Ушбу боғлиқлик диссертацияда ишлатилган учта ҳар хил модельда мунтазам равишда тасдиқланди.

4. КАКнинг $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВли марказий Pb+Pb тўқнашувларида олинган кўндаланг (радиал) оқимининг ўртача тезлиги ОИРКда паст энергияли марказий Cu+Cu ва Au+Au тўқнашувларида олинган кўндаланг (радиал) оқимининг ўртача тезлигига нисбатан каттароқ қиймати билан фарқ қилиши аниқланди.

5. Цаллис тақсимотининг ҳарорати (T) ва ноэкстенсивлик q параметри p+p тўқнашувлар энергияси $(s)^{1/2}$ 2.76 дан 5.02 ТэВ гача ортиши билан (заррачаларнинг барча турлари учун) бир оз ошиб бориши аниқланди. Бу шуни кўрсатадики, $(s)^{1/2}$ = 5.02 ТэВли «тез» p+p тўқнашувлар $(s)^{1/2}$= 2.76 ТэВли p+p тўқнашувларга нисбатан кичикроқ термализация даражасига олиб келади;

6. КАК энергияларида Pb+Pb тўқнашувларининг марказийлиги ортиб бориши билан термализация даражаси ($(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ва 5.02 ТэВ) ортиб бориши ва мувозанатсизлик даражаси (ноэкстенсивлик) камайиб бориши кўрсатилган. Бу ҳолат диссертацияни қуйидаги натижаларига мос келади: $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВда ОИРК марказий Cu+Cu ва Au+Au тўқнашувлари ва $(s_{nn})^{1/2}$ =2.76 ТэВда КАК марказий Pb+Pb тўқнашувлари кучли термализацияланган тизимларни ҳосил қилади;

7. Оғир ионларнинг марказий тўқнашувларида (Cu+Cu, Au+Au ва Pb+Pb тўқнашувларида) $(s_{nn})^{1/2}$= 200—5020 ГэВ энергия оралиғида заррачалар ҳосил бўлишининг ўртача (глобал) кинетик ҳароратининг қиймати хатолар доирасида доимий бўлиб қолиши тасдиқланган;

8. Зарядланган пионлар, каонлар, протонлар ва антипротонларни кўндаланг оқим киритилган Хагедорн формуласи билан тавсифлаш натижалари $(s)^{1/2}$ = 2.76 ва 5.02 ТэВли p+p тўқнашувларининг тўлиқ ансамблида коллектив кўндаланг оқимининг жуда кичик қийматини (хатолар доирасида нол қийматини) кўрсатади.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА ИМЕНИ МИРЗО УЛУГБЕКА

КАНОКОВА ШАХНОЗА ЗАКИРОВНА

КОЛЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb СОУДАРЕНИЙ В ИНТЕРВАЛЕ $(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 ГэВ

01.04.08- Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам

Ташкент – 2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером B2018.2. PhD/FM251

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель: **Олимов Хусниддин Косимович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бозоров Эркин Ходжиевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Насиров Авазбек Каримович
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: **Джизакский государственный педагогический институт**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес:100174, г.Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно–ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер_____). (Адрес:100214, г.Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289-31-41)

Автореферат диссертации разослан «__» _____2021 г.
(Реестр протокола рассылки №____от _____2021 г.)

М.Ю. Ташметов
председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

О.Р. Тожибоев
ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, PhD ф.-м.н.

И. Нуритдинов
председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время теоретическое исследование ядро-ядерных соударений при высоких энергиях является одной из фундаментальных задач современной теоретической и экспериментальной физики. В релятивистских ядерных соударениях пионы, каоны, протоны и антипротоны несут важную информацию о пространственно-временных характеристиках плотной материи, возникающей в таких соударениях. Распределения частиц по поперечному импульсу содержат непосредственную информацию о поперечном расширении этой материи и температуре, при которой адроны отделяются от расширяющегося «огненного шара» - файрбола. Исследование ядро-ядерных соударений при высоких и сверхвысоких энергиях при различных центральностях даёт возможность получить новую информацию о коллективных свойствах плотной материи и её эволюции с изменением центральности соударения.

На современных Коллайдерах выполняются актуальные исследования, важные для развития физики высоких энергий. На сегодняшний день, одной из приоритетных задач экспериментов, проводимых на Релятивистском Коллайдере Тяжелых Ионов (РКТИ, Брукхейвенская Национальная Лаборатория, США) и на Большом Адронном Коллайдере (БАК, ЦЕРН, Швейцария) является создание плазменного состояния кварков и глюонов, так называемой кварк-глюонной плазмы (КГП), и подробное изучения её различных свойств. Считается, что именно в этом состоянии находилась Вселенная в первые микросекунды после Большого взрыва. Такое состояние вещества в лабораторных условиях достигается в центральных ядро-ядерных соударениях при высоких и сверхвысоких энергиях. Исследование кварк-глюонной плазмы представляет собой одну из актуальных фундаментальных задач современной физики.

В нашей Республике большое внимание уделяется изучению экспериментальных и теоретических работ в физике атомного ядра и элементарных частиц, развитию физики ядро-ядерных соударений при высоких энергиях и проведению фундаментальных исследований по этому направлению на мировом уровне. Востребованность к дальнейшему изучению и развитию в направлении фундаментальных наук обозначены в Стратегии[1] действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 гг.

Данная научно-исследовательская работа соответствует задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-5484 «О мерах по развитию атомной энергетики в Республике Узбекистан» от 19 июля 2018 года, № УП-5544 «Об утверждении стратегии инновационного развития Республики Узбекистан на 2019 - 2021 годы» от 21 сентября 2018 г., Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации,

[1]Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 г. // Официальное издание Министерства юстиции Республики Узбекистан. – Ташкент: Адолат, 2017.

управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 18 февраля 2017 года, №ПП-4492 «Об утверждении стратегии развития кадрового потенциала для ядерно-энергетической программы Республики Узбекистан» от 16 октября 2019 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологии в Республике Узбекистан II: «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Теоретические и экспериментальные исследования, посвящённые изучениям коллективных свойств и эволюции сверхплотной ядерной материи, образованной в соударениях тяжелых ионов при высоких энергиях, проводятся ведущими учёными мира и международными коллаборациями, например, американскими и европейскими учеными из коллаборации ALICE, STAR и BRAHMS (B. Abelev, I. Arsene, J. Adams, и др.), бельгийскими учеными (J. Cleymans, K. Redlich, A. Adronic) и другими исследователями физики высоких энергий.

В работах американских и европейских учёных из коллаборации ALICE (B. Abelev и др.), коллаборации BRAHMS (I. Arsene и др.), а также других учёных (J. Cleymans, K. Redlich, A. Adronic) был успешно описан выход конечных частиц в соударениях тяжёлых ионов в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=2–200 ГэВ с помощью гидродинамических моделей. Следует отметить, что гидродинамические модели довольно успешно описывают данные о центральных соударениях, тогда как они плохо описывают данные при более периферических соударениях, указывая на предел применимости гидродинамики.

Американские и европейские учёные (J. Adams, B. Abelev, I. Arsene и др.) из международных коллабораций STAR, ALICE и BRAHMS в своих работах провели фитирование гидродинамическими модельными функциями ударной волны распределений поперечных импульсов идентифицированных частиц в соударениях тяжелых ионов на Релятивистском коллайдере тяжёлых ионов (РКТИ, Брукхейвенская Национальная Лаборатория, США) и Большом адронном коллайдере (БАК, ЦЕРН, Швейцария). Однако из-за различных интервалов фитирования по поперечному импульсу (p_t), использованных для фитирования модельными функциями экспериментальных данных РКТИ и БАК, нельзя напрямую сравнивать скорости поперечного потока ($<\beta_t>$) расширяющейся материи и кинетические температуры «размораживания» (T_{fo}), полученные в этих работах, потому что эти параметры могут варьироваться при изменении используемых интервалов фитирования по поперечному импульсу.

Бельгийскими учеными (J. Cleymans и др.) с применением распределения Цаллиса были успешно описаны измеренные распределения поперечных импульсов частиц вплоть до 200 ГэВ/*c* в *p*+*p* соударениях при энергии $(s_{nn})^{1/2}$=7 ТэВ на БАКе. Несмотря на этот успех, в их работе были отмечены неоднозначности в отношении определения параметров

распределения Цаллиса при использовании короткого интервала фитирования (p_t <3 ГэВ/c) по поперечному импульсу.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного или научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках договора от 25 января 2018 года о научном сотрудничестве Национального университета Узбекистана с научно-исследовательскими институтами (Физико-техническим институтом НПО «Физика-Солнце» АН РУз) по научно-педагогической подготовке квалифицированных кадров.

Целью исследования является получение новой информации о коллективных свойствах плотной и горячей материи, образованной в Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb и p+p соударениях при высоких энергиях.

Задачи исследования:

провести феноменологический анализ экспериментальных распределений по поперечному импульсу заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в центральных Cu+Cu, Au+Au, и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 62.4—2760 ГэВ;

выбрать оптимальные интервалы фитирования по поперечному импульсу теоретическими (модельными) функциями спектров поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в центральных Cu+Cu, Au+Au, и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 62.4—2760 ГэВ;

определить значения коллективных параметров (средней скорости поперечного расширения материи ($<\beta_t>$) и кинетической температуры отделения адронов от расширяющегося файрбола (глобальной кинетической температуры «размораживания» (T_{fo}))) плотной материи, образованной в центральных Cu+Cu, Au+Au, и Pb+Pb соударениях, и установить зависимости этих параметров от числа участвующих нуклонов в системе соударений ($<N_{part}>$) и энергии $(s_{nn})^{1/2}$;

провести анализ экспериментальных распределений по поперечному импульсу заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в p+p соударениях и Pb+Pb соударениях при различных центральностях при энергиях $(s_{nn})^{1/2}$ =2.76 и 5.02 ТэВ;

выбрать оптимальные интервалы фитирования по поперечному импульсу теоретическими (модельными) функциями спектров поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов образованных в p+p соударениях и Pb+Pb соударениях при различных центральностях при энергиях $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ;

определить значения средней скорости поперечного расширения материи ($<\beta_t>$) и глобальной температуры T в Pb+Pb соударениях при различных центральностях при энергиях $(s_{nn})^{1/2}$ =2.76 и 5.02 ТэВ и получить зависимости этих параметров от степени центральности соударений и энергии $(s_{nn})^{1/2}$;

получить значения степени неравновесности (неэкстенсивности) q и температуры T функции распределения Цаллиса в p+p соударениях при

энергиях $(s)^{1/2}$=2.76 и 5.02 ТэВ и определить зависимости этих параметров от типа частиц и энергии $(s)^{1/2}$.

Объектом исследования являются соударения тяжёлых ионов (Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb соударения) и *p*+*p* соударения при высоких энергиях.

Предметом исследования являются экспериментальные спектры поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в *p*+*p*, Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях при высоких энергиях.

Методы исследования. Использованы аппарат математической статистики, аналитические приближения и методы теоретического и феноменологического моделирования экспериментальных данных.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

установлена прямая зависимость между средней скоростью поперечного (радиального) потока $<\beta_t>$ материи и средним числом участвующих нуклонов $<N_{part}>$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 ГэВ;

показано, что полученная глобальная кинетическая температура «размораживания» T_{fo} не зависит от среднего числа участвующих нуклонов $<N_{part}>$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 ГэВ;

установлено, что значение средней кинетической температуры «размораживания» $<T_{fo}>$ растет с увеличением $(s_{nn})^{1/2}$, достигая своего предельного среднего значения при $(s_{nn})^{1/2} \geq 200$ ГэВ, и остается практически постоянной в диапазоне энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 200—5020 ГэВ;

показано, что степень термализации системы Pb+Pb соударений при энергиях $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ увеличивается, а степень неравновесности (неэкстенсивности) уменьшается с увеличением центральности Pb+Pb соударений;

установлено, что температура T и степень неравновесности (неэкстенсивности) q функции распределения Цаллиса возрастают для всех типов частиц, с увеличением энергии $(s)^{1/2}$ p+p соударений от 2.76 до 5.02 ТэВ;

получено согласующееся в пределах ошибок нулевое значение скорости коллективного поперечного потока в p+p соударениях при $(s)^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ, что указывает на отсутствие сигнала об образовании кварк-глюонной плазмы в полном ансамбле p+p соударений.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

получены средние скорости коллективного потока плотной материи, образованной в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ;

оценены средние (глобальные) кинетические температуры образования заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ;

оценены средние скорости коллективного потока плотной материи и средние (глобальные) кинетические температуры образования заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов при различных центральностях в

Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ.

Достоверность результатов исследования обосновывается использованием стандартного аппарата математической статистики, включая общепринятый метод минимума χ^2, теоретическим и феноменологическим моделированием (основанным на законах статистической и ядерной физики, термо- и гидродинамики) экспериментальных данных большой статистики, полученных в современных экспериментах на РКТИ и БАКе, а также согласием полученных результатов с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость исследования. Научная значимость результатов исследования определяется тем, что полученные новые фундаментальные результаты по средней скорости коллективного потока плотной материи, а также средней кинетической температуре образования заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, образованных в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ пополняют мировую базу данных по коллективным свойствам плотной материи, образованной в центральных соударениях тяжёлых ионов при высоких энергиях.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что применённая в данной работе методика может быть использована для определения средней скорости коллективного потока плотной материи, а также средней кинетической температуры образования частиц в ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях, а полученные результаты могут быть применены для проверки годности новых теоретических моделей и подходов для описания столкновений тяжёлых ионов при высоких энергиях и планировании новых экспериментов на современных ускорителях тяжёлых ионов – Релятивистском коллайдере тяжёлых ионов (РКТИ, Брукхейвенская Национальная Лаборатория, США) и Большом адронном коллайдере (БАК, ЦЕРН, Швейцария).

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию коллективных свойств p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb соударений в интервале $(s_{nn})^{1/2}$=62—5020 ГэВ:

установленная прямая зависимость между средней скоростью поперечного (радиального) потока $<\beta_t>$ материи и средним числом участвующих нуклонов $<N_{part}>$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 ГэВ использована в рамках проектов Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11575103) и Фонда естественных наук провинции Шаньси (грант № 201901D111043) (письмо Института теоретической физики Университета Шаньси (Китай) от 24 мая 2021 г.). Использование научных результатов позволило установить зависимости скорости поперечного потока материи от энергии $(s_{nn})^{1/2}$ и среднего числа участвующих нуклонов $<N_{part}>$ соударений тяжёлых ионов;

результаты по зависимостям кинетической температуры «размораживания» T_{fo} от среднего числа участвующих нуклонов $<N_{part}>$ и энергии соударения в системе центра масс $(s_{nn})^{1/2}$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 ГэВ использованы в рамках проектов Национального фонда естественных наук Китая (грант

№ 11575103) и Фонда естественных наук провинции Шаньси (грант № 201901D111043) (письмо Института теоретической физики Университета Шаньси (Китай) от 24 мая 2021 г.), а также зарубежными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах International Journal of Modern Physics A 35, 2050167, 2020; Euro-Asia Conferences, 2021; Advances in High Energy Physics 2021, 6677885, 2021; International Journal of Modern Physics A 36, 2150149, 2021). Использование научных результатов позволило установить зависимости кинетической температуры образования частиц от энергии $(s_{nn})^{1/2}$ соударений тяжёлых ионов, а также пополнить мировую базу данных по коллективным свойствам плотной материи.

установленные зависимости степени термализации и степени неравновесности (неэкстенсивности) от центральности системы Pb+Pb соударений а также температуры T и степени неравновесности q функции распределения Цаллиса от энергии в системе центра масс, полученное нулевое значение скорости коллективного поперечного потока в p+p соударениях при $(s)^{1/2} = 2.76$ и 5.02 ТэВ использованы для феноменологического анализа экспериментальных данных по протон-протонным столкновениям в рамках договора о научном сотрудничестве между факультетом физики Университета науки и технологий Банну (USTB, Банну, Пакистан) и Лабораторией физики высоких энергий Физико-технического института АН РУз (письмо Факультета физики Университета науки и технологий Банну (USTB, Банну, Пакистан) от 25 мая 2021 г.), а также зарубежными исследователями (ссылки в зарубежных научных журналах International Journal of Modern Physics A 35, 2050167, 2020; Advances in High Energy Physics 2021, 6677885, 2021; International Journal of Modern Physics A 36, 2150149, 2021). Использование научных результатов позволило определить зависимости эффективной температуры системы соударения и параметра неэкстенсивности (степени неравновесности) частиц в p+p и A+A соударениях от энергии $(s_{nn})^{1/2}$ в экспериментах на Релятивистическом коллайдере тяжелых ионов и Большом адронном коллайдере.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 7 международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 научные статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских (PhD) диссертаций, из них 2 в зарубежных научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Объём диссертации составляет 118 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность и востребованность темы исследования, сформулированы цель и задачи, выявлены предмет, объект и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты, обоснована достоверность полученных результатов, научно-практическая значимость, даны сведения о внедрении результатов и апробации работы, о структуре и объеме диссертации.

В первой главе диссертации **«Краткий обзор экспериментальных и теоретических работ по ядро-ядерным соударениям при высоких энергиях, феноменологические модели»** рассмотрены экспериментальные работы и теоретические подходы для анализа и теоретического описания экспериментальных данных ядро-ядерных соударений при высоких энергиях на Большом Адронном Коллайдере (БАК, ЦЕРН, Швейцария) и Релятивистическом Коллайдере Тяжелых Ионов (РКТИ, Брукхейвен, США).

Предполагая сферически-симметричное расширение оболочек вещества с постоянной радиальной (потоковой) скоростью и определяя время, когда адроны «размораживаются», Сименс и Расмуссен извлекли следующую формулу для анализа инвариантных спектров поперечного импульса идентифицированных частиц в центральных соударениях тяжелых ионов в центральной области быстрот (y=0):

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = Z\, exp\left(-\frac{\gamma_t m_t}{T_{fo}}\right)\left\{(\gamma_t m_t + T_{fo})\frac{sinh\alpha}{\alpha} - T_{fo} cosh\alpha\ \right\}, \quad (1)$$

где Z - коэффициент нормировки, T_{fo} - температура расширяющегося источника, которая может служить оценкой кинетической температуры «размораживания», $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ - поперечная масса (поперечная энергия) адрона, $\alpha = \frac{\gamma_t \beta_t\ p_t}{T_{fo}}$, $\gamma_t = 1\,/\sqrt{1-\beta_t^2}$, β_t - скорость поперечного расширения (потока). Это уравнение (1) называется функцией ударной волны модели Сименса-Расмуссена.

Если кинетическое размораживание происходит на (гипер)поверхности постоянной температуры, в центральной области быстрот (y=0) получается следующее уравнение для анализа спектров поперечного импульса частиц:

$$\left(\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy}\right)_{y=0} = C_t\, exp\left(-<\gamma_t> \frac{m_t - p_t <\beta_t>}{T_{fo}}\right), \quad (2)$$

где C_t - коэффициент нормировки, $<\beta_t>$ - среднее значение скорости поперечного потока и $<\gamma_t> = 1/\sqrt{1-<\beta_t>^2}$. Это уравнение (2) называется функцией модели простого поперечного потока.

В работе также использована модель ударной волны Шнедермана и др.

Шнедерман и др. использовали поперечное цилиндрическое расширение материи, вызывающее продольное инвариантное плато Бъёркена в центральной области быстрот (y=0) в их гидростатической модели ударной волны:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = \frac{d^2N}{2\pi N_{ev} m_t dm_t dy} =$$

$$C_s\, m_t\, I_0\left(\frac{p_t sinh(tanh^{-1}<\beta_t>)}{T_{fo}}\right) K_1\left(\frac{m_t cosh(tanh^{-1}<\beta_t>)}{T_{fo}}\right), \qquad (3)$$

где C_s - коэффициент нормировки, I_0 и K_1 - модифицированные функции Бесселя. Это уравнение (3) называется модельной функцией упрощенной ударной волны Шнедермана и др. Значения $<\beta_t>$ и T_{fo}, полученные с использованием функции в уравнении (3), можно рассматривать как средние значения этих параметров в интервале от $r=0$ до $r=R$, где R - максимальный радиус образованного цилиндрического «огненного шара» - файрбола.

Инвариантные распределения поперечного импульса частиц, образующихся при нуклон-нуклонных соударениях, могут быть также успешно описаны в широком интервале p_t с помощью функции Хагедорна:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C\left(1+\frac{m_t}{p_0}\right)^{-n}, \qquad (4)$$

где C - коэффициент нормализации, p_0 и n - свободные параметры этой функции, $m_t = \sqrt{p_t^2 + m_0^2}$ - поперечная масса (поперечная энергия) адрона, а m_0 – его масса покоя.

Для описания инвариантных p_t (или m_t) спектров, измеренных в $p+p$ соударениях при высоких энергиях на РКТИ и БАКе в данной работе приведено несколько вариантов функции распределения Цаллиса. В простейшем варианте распределение Цаллиса, описывающее инвариантные спектры частиц с помощью двух параметров T и q, выражается в центральной области быстрот (y=0) как

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C_q\left(1+(q-1)\frac{m_t}{T}\right)^{-1/(q-1)}, \qquad (5)$$

где C_q - коэффициент нормализации, T - температурный параметр, параметр q измеряет степень неравновесности системы.

При стремлении параметра q к единице (1), распределение Цаллиса приближается к обычному экспоненциальному распределению Больцмана-Гиббса. Эта функция в уравнении (5) называется простой функцией распределения Цаллиса.

Следующая форма распределений Цаллиса (в центральной области быстрот (y=0)) приводит к термодинамически согласующейся версии для числа частиц, плотности энергии и давления:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C_q m_t \left(1 + (q-1)\frac{m_t}{T}\right)^{-q/(q-1)}, \qquad (6)$$

которая называется термодинамически согласующейся функцией распределения Цаллиса.

Значения T, полученные из распределений Цаллиса, приведённые в уравнениях (5) и (6), являются эффективными температурами, которые содержат вклады как теплового движения, так и коллективного потока расширяющейся материи (если таковой имеется). Чтобы разделить тепловое движение и эффект коллективного потока, коллективная скорость поперечного потока должна быть включена в распределение Цаллиса.

Сравнивая функции в уравнениях (4) и (5), можно увидеть, что обе функции математически эквивалентны при использовании $n = 1/(q-1)$ и $p_0 = nT$. Видно, что большие значения параметра n соответствуют меньшим значениям q. Чтобы включить параметр температуры, T, можно переписать функцию в уравнении (4), применяя выражение $p_0 = nT$, как

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C\left(1 + \frac{m_t}{n\,T}\right)^{-n}, \qquad (7)$$

В диссертационной работе используется простейший способ включения коллективного поперечного потока в уравнение (7), используя простое преобразование $m_t \to \langle\gamma_t\rangle\,(m_t - p_t\langle\beta_t\rangle)$, уравнение (7) принимает вид:

$$\frac{d^2N}{2\pi N_{ev} p_t dp_t dy} = C\left(1 + \langle\gamma_t\rangle\frac{(m_t - p_t\langle\beta_t\rangle)}{n\,T}\right)^{-n} \qquad (8)$$

где $<\gamma_t>= 1/\sqrt{1-<\beta_t>^2}$, $<\beta_t>$ - средняя скорость поперечного расширения (потока). Уравнение (7) называется функцией Хагедорна с внедренным поперечным потоком.

Вторая глава диссертации «**Спектры поперечных импульсов заряженных частиц в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях при высоких энергиях**» посвящена теоретическому анализу спектров поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ путем фитирования их модельными функциями «ударной волны» Сименса-Расмуссена, простого поперечного потока и функцией модели «ударной волны» Шнедермана и др.

Информация об экспериментальных инвариантных p_t-спектрах заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов, включая центральность соударений и соответствующее среднее число нуклонов-участников ($<N_{part}>$), проанализированные во второй главе диссертационной работы, приведены в таблице 1.

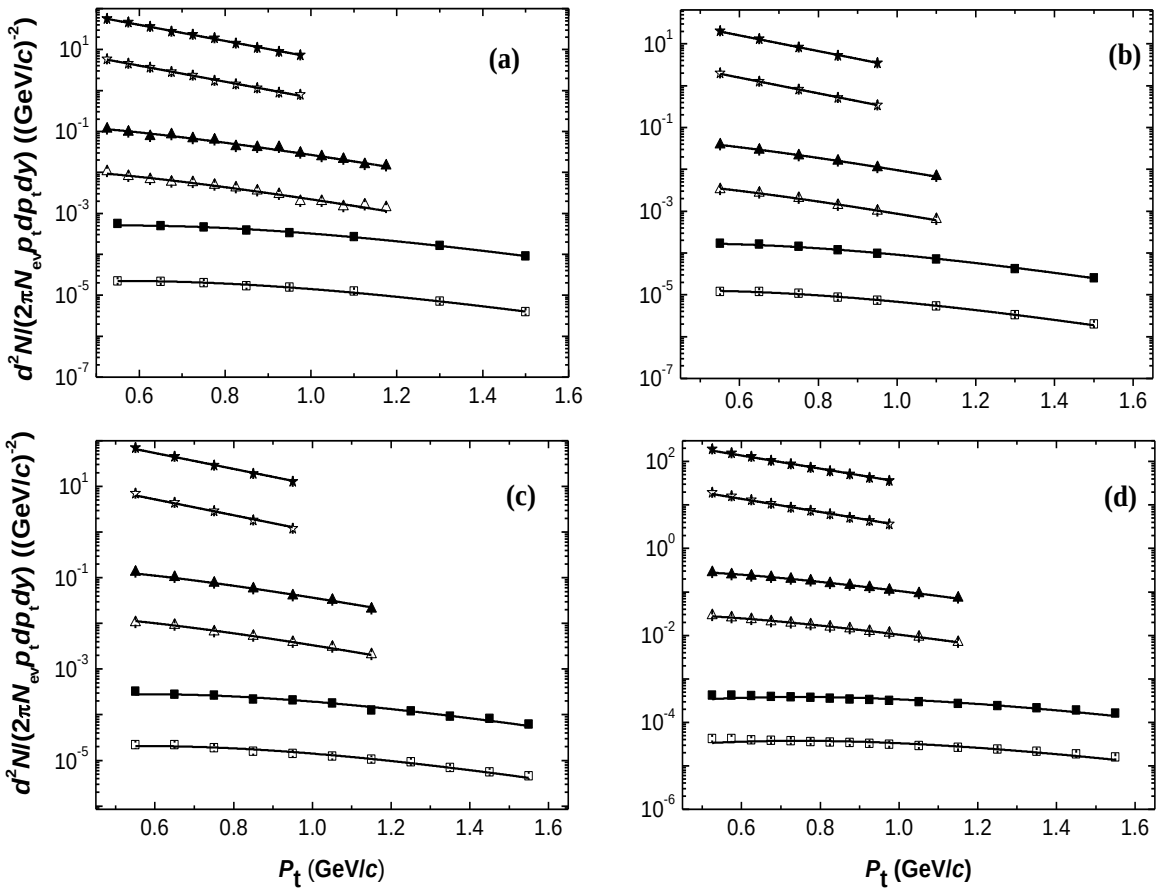
Таблица 1

Информация об измеренных инвариантных p_t-спектрах заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в центральной области быстрот (<y>=0) в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях на РКТИ и БАК

Тип частицы	Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВ, (0-10)% центральность, <N_{part}>=314±8	Cu+Cu соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ, (0-10)% центральность, <N_{part}>=97±1	Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ, (0-10)% центральность, <N_{part}>=328±6	Pb+Pb соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ, (0-5)% центральность, <N_{part}>=383±2
	Измеренный p_t интервал (ГэВ/c) (y интервал)	Измеренный p_t интервал (ГэВ/c) (y интервал)	Измеренный p_t интервал (ГэВ/c) (y интервал)	Измеренный p_t интервал (ГэВ/c) (y интервал)
π^+	0.2-2.0 ($\|y\| < 0.2$)	0.3-2.35 (<y> = 0)	0.2-1.9 (<y> = 0)	0.1-3.0 ($\|y\| < 0.5$)
π^-	0.2-2.0 ($\|y\| < 0.2$)	0.3-2.35 (<y> = 0)	0.2-1.9 (<y> = 0)	0.1-3.0 ($\|y\| < 0.5$)
K^+	0.4-1.8 ($\|y\| < 0.15$)	0.4-2.35 (<y> = 0)	0.4-1.9 (<y> = 0)	0.2-3.0 ($\|y\| < 0.5$)
K^-	0.45-1.9 ($\|y\| < 0.15$)	0.4-2.35 (<y> = 0)	0.4-1.9 (<y> = 0)	0.2-3.0 ($\|y\| < 0.5$)
p	0.5-8.0 ($\|y\| < 0.5$)	0.5-3.50 (<y> = 0)	0.3-3.0 (<y> = 0)	0.3-4.6 ($\|y\| < 0.5$)
$\bar{p}$	0.5-8.0 ($\|y\| < 0.5$)	0.5-3.50 (<y> = 0)	0.3-3.0 (<y> = 0)	0.3-4.6 ($\|y\| < 0.5$)

На рисунке 1 показаны полученные кривые фитирования экспериментальных инвариантных p_t-спектров частиц в анализируемых центральных соударениях тяжелых ионов функцией, приведенной в уравнении (3) в оптимальных интервалах фитирования, чтобы продемонстрировать качество комбинированных (одновременных) фитирований.

Интервалы комбинированного фитирования по p_t на рисунке 1 следующие: 0.5-1.0 ГэВ/c для заряженных пионов, 0.5-1.2 ГэВ/c для заряженных каонов и 0.5-1.6 ГэВ/c для протонов и антипротонов. <β_t> и T_{fo} были общими параметрами при комбинированном (одновременном) фитировании спектров всех частиц в данной системе соударений.



Спектры π^+ (★), π^- (открытые звёздочки), K^+ (▲), K^- (Δ), p (■), и $\bar{p}$ (□)) умножены на коэффициенты 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, и 0.00001 соответственно

Рис. 1. Кривые комбинированного (одновременного) фитирования (сплошные кривые) инвариантных p_t-спектров заряженных π , K, p и $\bar{p}$, в центральной области быстрот в центральных Au+Au соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 62.4 ГэВ (a), центральных Cu+Cu соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВ (b), в центральных Au+Au соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВ (c) и в центральных Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ (d) функцией из уравнения (3)

В таблице 2 представлены средние результаты для извлеченных параметров $<\beta_t>$ и T_{fo}, полученные при вычислении среднего значения по соответствующим результатам фитирования тремя модельными функциями: модельной функцией Сименса-Расмуссена, модельной функцией простого поперечного потока и модельной функцией Шнедермана и др.

Как видно из таблицы 2, полученное среднее значение поперечной (радиальной) скорости потока ($<\beta_t>$) коррелирует со средним числом участвующих нуклонов, $<N_{part}>$, в центральных соударениях тяжелых ионов в диапазоне $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 ГэВ на РКТИ и БАКе. Наибольшая средняя поперечная скорость ($<\beta_t>$=0.68±0.01) наблюдается в центральных Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ на БАКе с наибольшим числом участвующих нуклонов, $<N_{part}>$=383±2. В тоже время наименьшая средняя поперечная скорость ($<\beta_t>$=0.55±0.01) наблюдается в центральных Cu+Cu

соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ на РКТИ с наименьшим числом участвующих нуклонов, $<N_{part}>$=97±1.

Таблица 2

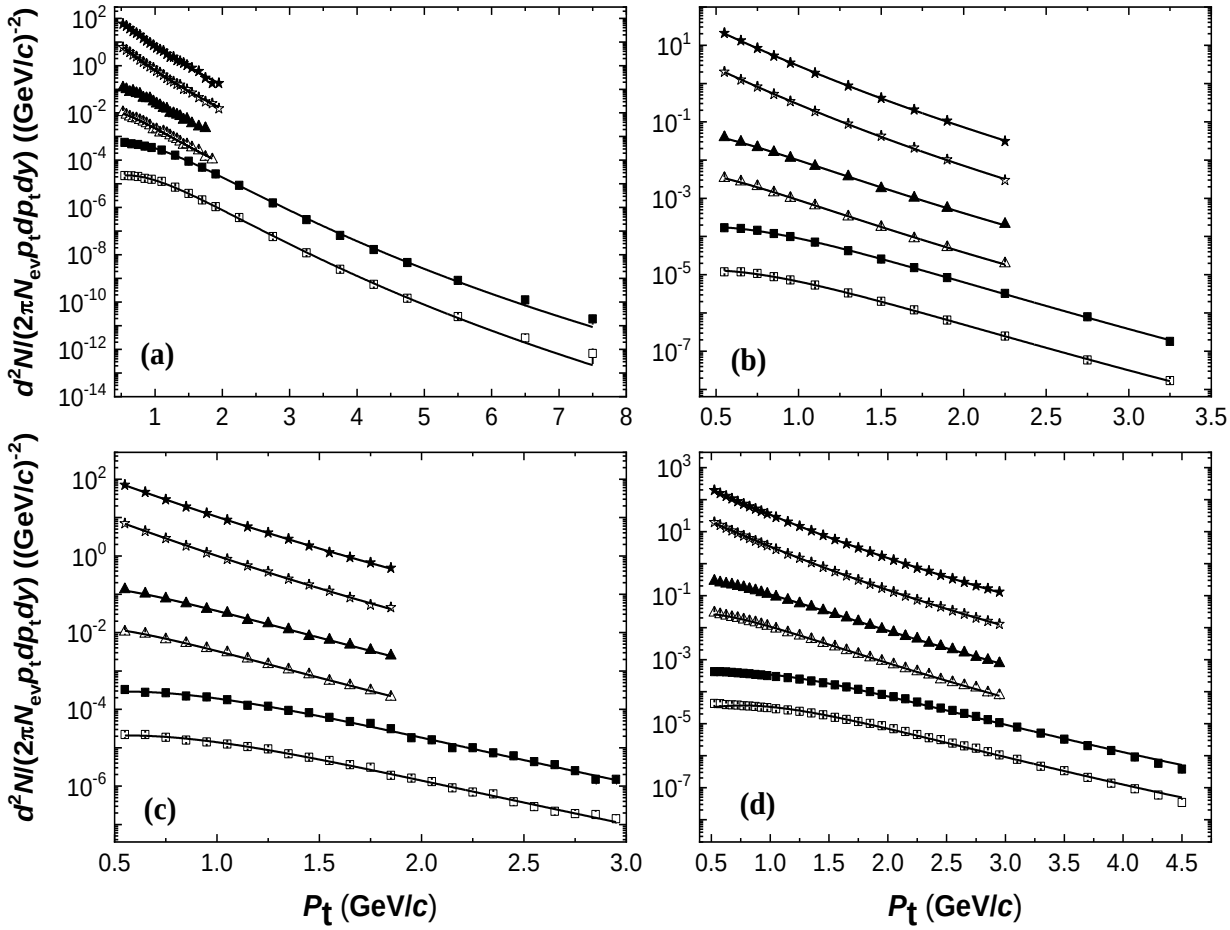
Средние результаты для параметров $<\beta_t>$ и T_{fo}, усредненные по результатам трех модельных функций

Тип	$<\beta_t>$ (в единицах c)	T_{fo} (МэВ)
Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВ, (0-10)% центральность, $<N_{part}>$=314±8	0.591±0.007	112±3
Cu+Cu соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ, (0-10)% центральность, $<N_{part}>$=97±1	0.550±0.007	126±4
Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ, (0-10)% центральность, $<N_{part}>$=328±6	0.606±0.010	124±5
Pb+Pb соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ, (0-5)% центральность, $<N_{part}>$=383±2	0.679±0.005	127±3

С другой стороны, как видно из таблицы 2, полученная глобальная кинетическая температура «размораживания» T_{fo} не показывает какой-либо заметной зависимости от среднего числа участвующих нуклонов, $<N_{part}>$, в анализируемых центральных соударениях тяжелых ионов. Полученная глобальная кинетическая температура «размораживания» демонстрирует интересную зависимость от энергии соударения $(s_{nn})^{1/2}$: $<T_{fo}>$ имеет минимальное значение 112±5 МэВ при $(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВ, и растет с увеличением $(s_{nn})^{1/2}$, достигая своего предельного среднего значения $<T_{fo}>$=126±7 МэВ при $(s_{nn})^{1/2}$≥200 ГэВ, то есть T_{fo} остается практически постоянным в диапазоне энергий $(s_{nn})^{1/2}$= 200—2760 ГэВ.

Качество комбинированных (одновременных) фитирований экспериментальных инвариантных p_t-спектров частиц в анализируемых центральных соударениях тяжелых ионов функцией в уравнении (8) во всем интервале фитирования p_t≥0.5 ГэВ/c, показаны на рисунке 2.

Интервалы комбинированного фитирования по p_t на рисунке 2 составляют p_t ≥0.5 ГэВ/c для всех частиц. $<\beta_t>$ и T были глобальными (общими) параметрами при комбинированном (одновременном) фитировании спектров всех частиц в данной системе соударений.



Спектры π^+ (★), π^- (открытые звёздочки), K^+ (▲), K^- (Δ), p (■), и $\bar{p}$ (□)) умножены на коэффициенты 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001, и 0.00001 соответственно.

Рис. 2. Кривые комбинированного (одновременного) фитирования (сплошные кривые) инвариантных p_t-спектров заряженных π ,K, p и $\bar{p}$, полученных в центральной области быстрот в центральных Au+Au соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВ (a), центральных Cu+Cu соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 200 ГэВ (b), в центральных Au+Au соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ (c) и центральных Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ (d) функцией из уравнения (8)

Значения параметров $<\beta_t>$ и T, полученные из комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования инвариантных p_t-спектров заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов с формулой Хагедорна с внедренным простым поперечным потоком (уравнение (8)) в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях на РКТИ и БАКе во всем измеренном диапазоне p_t≥0.5 ГэВ/c, представлены в таблице 3.

В таблице 3 интервалы комбинированного фитирования по p_t - это весь измеренный интервал в области p_t≥0.5 ГэВ/c для всех частиц. $<\beta_t>$ и T были глобальными (общими) параметрами для комбинированного (одновременного) фитирования спектров всех частиц в данной системе соударений.

Таблица 3

Значения параметров $<\beta_t>$ и T формулы Хагедорна с внедренным простым поперечным потоком (уравнение (8)), полученных для инвариантных p_t-спектров заряженных π и K, p и $\bar{p}$

Тип	$<\beta_t>$ (в единицах c)	T (МэВ)	χ^2/ч.с.с. *(ч.с.с.)*
Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВ, (0-10)% центральность, $<N_{part}>$=314±8	0.53 ± 0.01	74 ± 5	0.43 (121)
Cu+Cu соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ, (0-10)% центральность, $<N_{part}>$=97±1	0.41 ± 0.01	111 ± 5	0.26 (56)
Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ, (0-10)% центральность, $<N_{part}>$=328±6	0.51 ± 0.02	102 ± 8	0.33 (92)
Pb+Pb соударения при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ, (0-5)% центральность, $<N_{part}>$=383±2	0.63 ± 0.01	103 ± 3	0.50 (182)

Как видно из рисунка 2 и значений χ^2*/ч.с.с.* в таблице 3, формула Хагедорна с внедренным простым поперечным потоком, приведенная в уравнении (8), хорошо описывает экспериментальные инвариантные p_t-спектры заряженных пионов, каонов, протонов и антипротонов во всем измеренном интервале в области $p_t \geq 0.5$ ГэВ/c в центральной области быстрот в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях на РКТИ и БАКе. Как видно из таблицы 3, значения параметров $<\beta_t>$ и T, полученные с помощью уравнения (8), хорошо воспроизводят все установленные зависимости параметров $<\beta_t>$ и T_{fo} от ($<N_{part}>$) и $(s_{nn})^{1/2}$ системы соударений, полученные в нижнем оптимальном диапазоне p_t и представленные в таблице 2. Наибольшее значение $<\beta_t>$ наблюдается в центральных Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ТэВ на БАКе с наибольшим числом участвующих нуклонов, $<N_{part}>$=383±2. В то же время наименьшее значение $<\beta_t>$ наблюдается в центральных Cu+Cu соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 200 ГэВ на РКТИ с наименьшим числом участвующих нуклонов, $<N_{part}>$=97±1. Полученное значение параметра температуры T, не показывает какой-либо заметной зависимости от среднего числа участвующих нуклонов, $<N_{part}>$, в анализируемых центральных соударениях тяжелых ионов. Полученное значение глобального параметра T показывает такую же зависимость от $(s_{nn})^{1/2}$, что и глобальная температура кинетического «размораживания» T_{fo}, в таблице 2, т.е. T имеет минимальное значение при $(s_{nn})^{1/2}$=62.4 ГэВ и растет с увеличением $(s_{nn})^{1/2}$, достигая своего предельного значения при $(s_{nn})^{1/2}\geq$200 ГэВ, оставаясь постоянным в пределах ошибок фитирования в диапазоне $(s_{nn})^{1/2}$ = 200–2760 ГэВ.

В третьей главе диссертации **«Сравнительный анализ распределений**

поперечных импульсов частиц в *p+p* и Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ и $(s_{nn})^{1/2}$= 5.02 ТэВ» приведены результаты сравнительного анализа распределений поперечных импульсов заряженных частиц в $p+p$ столкновениях и в центральных, полуцентральных и периферических Pb+Pb соударениях при значениях энергий $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ и $(s_{nn})^{1/2}$= 5.02 ТэВ, используя функцию распределения Цаллиса и формулу Хагедорна с внедренным поперечным потоком.

На рисунке 3(a)-(d) показаны экспериментальные спектры поперечного импульса заряженных $(\pi^+ + \pi^-)$ пионов, заряженных $(K^+ + K^-)$ каонов, протонов и антипротонов $(p+\bar{p})$ во всем измеренном интервале p_t, а также в интервале фитирования $p_t \geq 0.5$ ГэВ/c в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ вместе с кривыми фитирования, полученными из комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования термодинамически согласующейся функцией распределения Цаллиса (уравнение (5)). Как видно из рисунка 3(a) -(d), экспериментальные p_t - спектры заряженных частиц в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВ хорошо описываются термодинамически согласующейся функцией распределения Цаллиса. Чтобы проверить возникает ли существенный поперечный радиальный поток в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$= 2.76 ТэВ и 5.02 ТэВ, было проведено комбинированное (одновременное) минимум χ^2 фитирование p_t-спектров заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)). Параметры $<\beta_t>$ и T были глобальными (общими) параметрами для комбинированного (одновременного) фитирования спектров всех частиц в данной системе соударений. Как видно из рисунка 3 (e)-(f), формула Хагедорна с внедренным поперечным потоком достаточно хорошо описывает спектры поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ.

На рисунке 3 сплошные кривые - результаты комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования термодинамически согласующейся функцией распределения Цаллиса 3 (a, b, c и d) (уравнение (5)) и формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком 3 (e,f) (уравнение (8)) экспериментальных спектров поперечных импульсов заряженных частиц.

В таблице 4 представлено сравнение параметров q и T, полученное из комбинированного фитирования термодинамически согласующейся функцией распределения Цаллиса (уравнение (5)) с использованием одинаковых интервалов фитирования по p_t частиц в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВ.

В таблице 4 T был общим параметром для комбинированного (одновременного) фитирования спектров всех частиц в данной системе соударений.

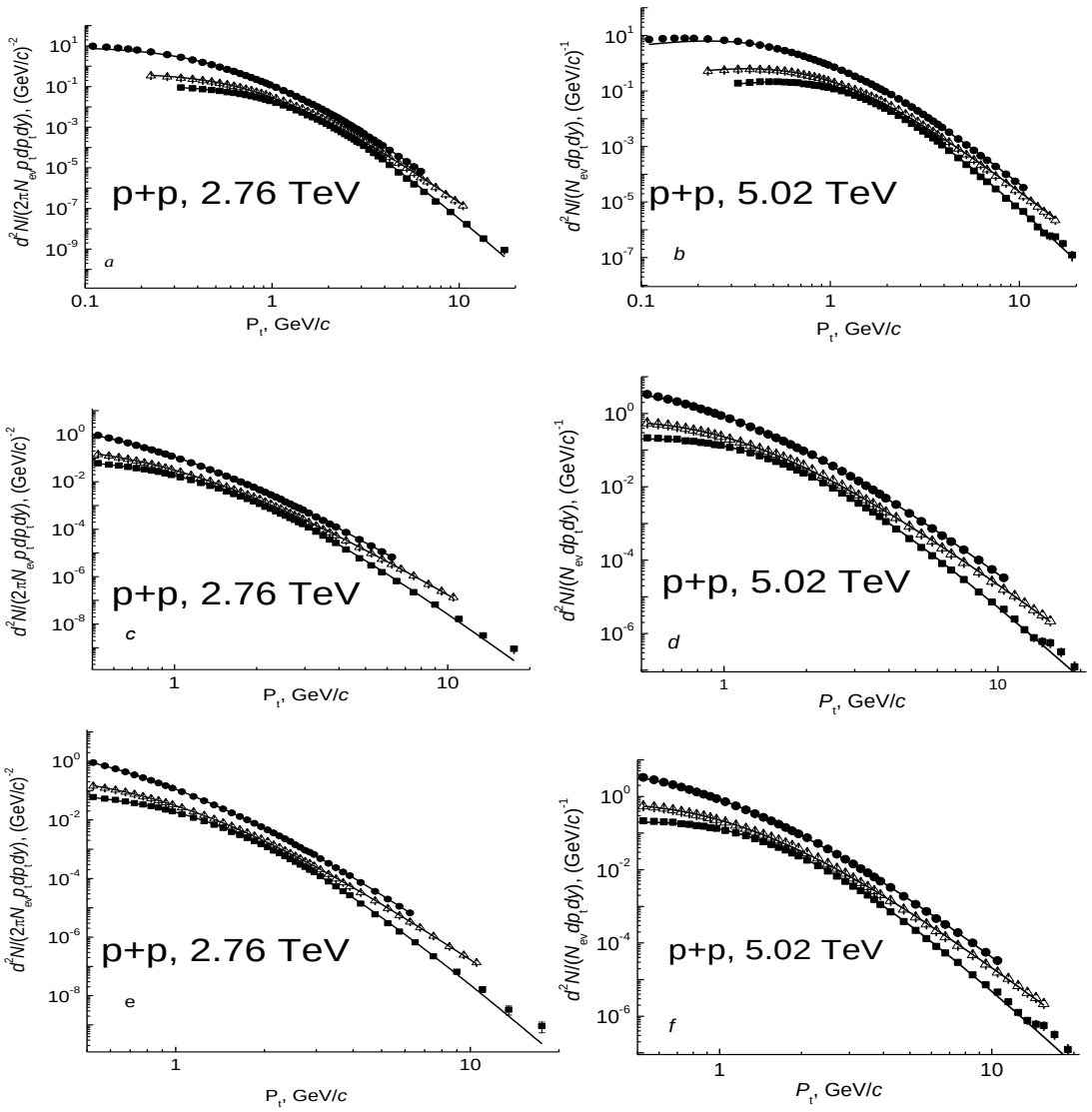


Рис. 3. Экспериментальные спектры поперечных импульсов заряженных (π^++π^-) пионов (●), заряженных (K^++K^-) каонов (Δ), протонов и антипротонов (p+$\bar{p}$) (■) во всем измеренном интервале p_t в *p*+*p* соударениях при (s)$^{1/2}$=2.76 ТэВ (a) и *p*+*p* соударениях при (s)$^{1/2}$ = 5.02 ТэВ (b) и в области p_t≥0.5 ГэВ/*c* в *p*+*p* соударениях при (s)$^{1/2}$ = 2.76 ТэВ (c,e) и *p*+*p* соударениях при (s)$^{1/2}$= 5.02 ТэВ (d,f)

Таблица 4

Сравнение параметров *q* и *T* функции распределения Цаллиса (уравнение (5)), полученных в *p*+*p* соударениях при (s)$^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ

Тип соударения	*p*+*p* при (s)$^{1/2}$=2.76 ТэВ				*p*+*p* при (s)$^{1/2}$=5.02 ТэВ			
Вид частицы	*Cq* (c^4/ГэВ^3)	*Q*	*T* (МэВ)	χ^2/ч.с.с. (ч.с.с.)	*Cq* (c^4/ГэВ^3)	*q*	*T* (МэВ)	χ^2/ч.с.с. (ч.с.с.)
π^++π^-	194±6	1.139±0.001	95±1	0.28 (123)	181±7	1.146±0.001	98±1	1.19 (115)
K^++K^-	73±3	1.144±0.001			68±3	1.150±0.001		
p+$\bar{p}$	179±8	1.116±0.001			132±7	1.126±0.001		

Интервалы комбинированного фитирования по p_t составляют 0.5-6.5, 0.5-11.0 и 0.5-20.0 ГэВ/c для $\pi^+ + \pi^-$, $K^+ + K^-$, и $p+\bar{p}$ соответственно в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВ.

Из таблицы 4, видно, что температура T и параметр неэкстенсивности q функции распределения Цаллиса слегка возрастают (для всех типов частиц) с увеличением энергии в системе центра-масс $(s)^{1/2}$ $p+p$ соударений от 2.76 до 5.02 ТэВ, что указывает на то, что более «разрушительные» и более быстрые $p+p$ соударения при $(s)^{1/2}$=5.02 ТэВ приводят к меньшей степени термализации (более высокой степени неравновесности) по сравнению с $p+p$ соударениями при $(s)^{1/2}$=2.76 ТэВ.

В таблице 5 показано сравнение параметров n, $(<\beta_t>)$ и T, полученное из комбинированного фитирования формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)) с использованием одинаковых интервалов фитирования по p_t частиц в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ.

Таблица 5

Сравнение параметров n, $(<\beta_t>)$ и T формулы Хагедорна с внедренным простым поперечным потоком (уравнение (8)), полученных в $p+p$ соударениях при $(s)^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ

Тип соударения	$p+p$ при $(s)^{1/2}$=2.76 ТэВ			$p+p$ при $(s)^{1/2}$=5.02 ТэВ		
Вид частицы	$\pi^+ + \pi^-$	$K^+ + K^-$	$p+\bar{p}$	$\pi^+ + \pi^-$	$K^+ + K^-$	$p+\bar{p}$
C (ГэВ/c)$^{-2}$	29±1	11±1	28±2	27±1	10±1	20±2
N	7.35±0.05	7.10±0.03	9.00±0.05	7.02±0.05	6.82±0.03	8.21±0.06
$\langle\beta_t\rangle$ (в единицах c)	0±0.017			0±0.023		
T (МэВ)	121±3			127±4		
χ^2/ч.с.с. (ч.с.с.)	0.26 (122)			0.97 (114)		

В таблице 5 $<\beta_t>$ и T были глобальными (общими) параметрами для комбинированного (одновременного) фитирования спектров всех частиц в данной системе соударений. Интервалы комбинированного фитирования по p_t составляют 0.5-6.5, 0.5-11.0 и 0.5-20.0 ГэВ/c для $\pi^+ + \pi^-$, $K^+ + K^-$, и $p+\bar{p}$ соответственно в p+p соударениях при $(s)^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВ. c - скорость света в вакууме.

Как видно из таблицы 5, в p+p соударениях практически не наблюдается поперечный (радиальный) поток при $(s)^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВ.

Экспериментальные спектры поперечного импульса заряженных пионов ($\pi^+ + \pi^-$), заряженных каонов ($K^+ + K^-$), протонов и антипротонов ($p+\bar{p}$) в центральных (0-5)% и периферических (60-80)% Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ТэВ вместе с кривыми фитирования, полученными из комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования формулой

Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)) показаны на рисунках 4(a) и 4(b) соответственно. Соответствующие результаты этих комбинированных минимум χ^2 фитирований представлены в таблице 6. Экспериментальные p_t-спектры заряженных пионов ($\pi^+ + \pi^-$), заряженных каонов ($K^+ + K^-$), протонов и антипротонов ($p+\bar{p}$) в центральных (0-5)%, полуцентральных (40-50)% и периферических (80-90)% Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$=5.02 ТэВ вместе с кривыми фитирования, полученными из комбинированных (одновременных) минимум χ^2 фитирований формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)) представлены на рисунках 4(c), 4(d) и 4(e) соответственно. Соответствующие результаты для параметров этих комбинированных минимум χ^2 фитирований приведены в таблице 7.

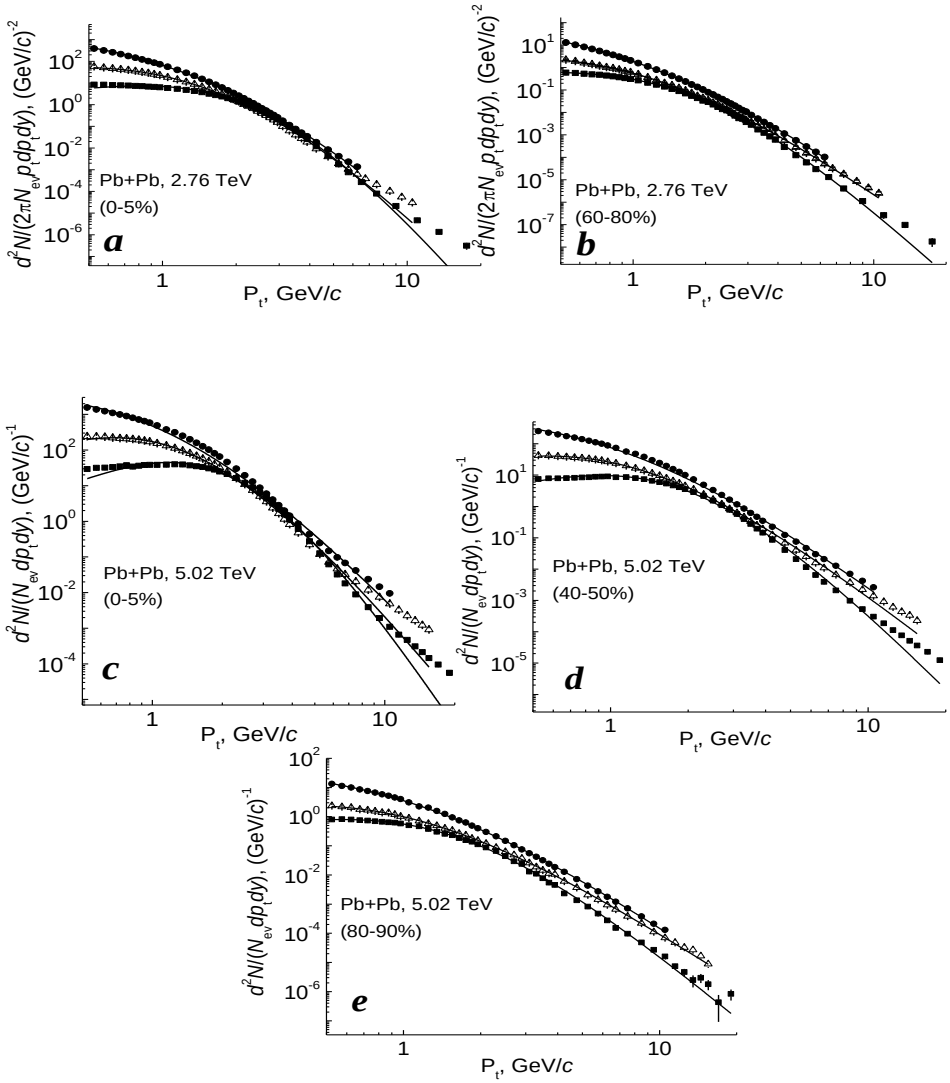


Рис.4. Экспериментальные спектры поперечного импульса заряженных ($\pi^+ + \pi^-$) пионов (●), заряженных ($K^+ + K^-$) каонов (□), протонов и антипротонов ($p+\bar{p}$) (■) в интервале $p_t \geq 0.5$ ГэВ/с в центральных (0-5)% (a) и периферических (60-80)% (b) Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 ТэВ и в центральных (0-5)% (c), полуцентральных (40-50)% (d) и периферических (80-90)% (e) Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$= 5.02 ТэВ

На рисунке 4 сплошные кривые – результаты комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования экспериментальных спектров поперечных импульсов заряженных частиц формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)).

Таблица 6

Сравнение параметров $<\beta_t>$ и T, полученных из комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)) спектров поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов в центральных (0-5)% и периферических (60-80)% Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ

Тип соударения	Pb+Pb при $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ТэВ					
Центральность соударений ($<N_{part}>$)	(0-5)% ($<N_{part}>$=383±17)			(60-80)% ($<N_{part}>$=23±12)		
Вид частицы	π^++π^-	K^++K^-	p+$\bar{p}$	π^++π^-	K^++ K^-	p+$\bar{p}$
C (ГэВ/c)$^{-2}$	7560±845	8376±1402	45899±12493	347±21	182±15	654±90
N	10.7±0.4	11.9±0.4	14.4±0.4	7.9±0.1	7.8±0.1	10.2±0.1
$<\beta_t>$ (в единицах c)	0.66±0.01			0.36±0.01		
T (МэВ)	78±4			94±3		
χ^2/ч.с.с. (ч.с.с.)	3.14 (122)			0.51 (122)		

В таблице 6 интервалы комбинированного фитирования по p_t - это весь измеренный интервал в области p_t≥0.5 ГэВ/c для всех частиц. $<\beta_t>$ и T были глобальными (общими) параметрами для комбинированного (одновременного) фитирования спектров всех частиц в данной системе соударений. Интервалы комбинированного фитирования по p_t составляют 0.5-6.5, 0.5-11.0 и 0.5-20.0 ГэВ/c для π^++π^-, K^++K^-, и p+$\bar{p}$ соответственно в Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ.

В таблице 7 интервалы комбинированного фитирования по p_t- это весь измеренный интервал в области p_t≥0.5 ГэВ/c для всех частиц. $<\beta_t>$ и T были глобальными (общими) параметрами для комбинированного (одновременного) фитирования спектров всех частиц в данной системе соударений. Интервалы комбинированного фитирования по p_t составляют 0.5-11.0, 0.5-16.0 и 0.5-20.0 ГэВ/c для π^++π^-, K^++K^-, и p+$\bar{p}$ соответственно в Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВ.

Таблица 7

Сравнение параметров <β_t> и T, полученных из комбинированного (одновременного) минимум χ^2 фитирования формулой Хагедорна с внедренным поперечным потоком (уравнение (8)) спектров поперечных импульсов заряженных пионов, каонов, протонов и антипротоны в центральных (0-5)%, полуцентральных (40-50)% и периферических (80-90)% Pb+Pb соударениях при $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВ

Тип соударения	Центральность соударений (<N_{part}>)	Вид частицы	C (ГэВ/c)$^{-2}$	n	$\langle\beta_t\rangle$ (в единицах c)	T (МэВ)	χ^2/ч.с.с. (ч.с.с.)
Pb+Pb при $(s_{nn})^{1/2}$=5.02 ТэВ	(0-5)% (<N_{part}>=384±17)	π^++π^-	19402±3796	8.1±0.2	0.70±0.01	55±4	28.98 (124)
		K^++K^-	32537±9627	9.3±0.3			
		p+$\bar{p}$	229107±109103	11.3±0.4			
	(40-50)% (<N_{part}>=87±13)	π^++π^-	2845±331	7.3±0.1	0.55±0.02	68±3	11.65 (124)
		K^++K^-	2406±380	7.6±0.1			
		p+$\bar{p}$	10336±2638	9.6±0.2			
	(80-90)% (<N_{part}>=8±5)	π^++π^-	120±6	7.1±0.1	0.10±0.02	144±4	0.73 (124)
		K^++K^-	48±3	6.8±0.1			
		p+$\bar{p}$	115±12	8.6±0.1			

Как видно из таблиц 6 и 7, значение поперечной скорости потока (<β_t>) увеличивается, а температура T уменьшается с увеличением центральности Pb+Pb соударений при $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 и 5.02 ТэВ; центральные (0-5)% Pb+Pb-соударения при $(s_{nn})^{1/2}$ = 5.02 ТэВ характеризуются заметно большей средней скоростью поперечного потока по сравнению с центральными (0-5)% Pb+Pb соударениями при $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 ТэВ. Из таблиц 6 и 7 можно также увидеть, что значения параметра n увеличиваются с увеличением центральности соударения для всех частиц, что соответствует уменьшению параметра неэкстенсивности q и приближению его (q) к 1 (единице) с увеличением центральности Pb+Pb соударений при $(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 и 5.02 ТэВ. Следовательно, степень термализации системы Pb+Pb соударений при энергиях БАК увеличивается, а степень неравновесности (неэкстенсивности) уменьшается с увеличением центральности соударений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённых исследований по диссертации на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «Коллективные свойства p+p, Cu+Cu,

Au+Au, Pb+Pb соударений в интервале $(s_{nn})^{1/2}$=62—5020 ГэВ», представлены следующие выводы.

1. Установлена положительная корреляция между средней поперечной (радиальной) скоростью потока ($<\beta_t>$) материи и средним числом участвующих нуклонов $<N_{part}>$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 ГэВ.

2. Показано, что полученная глобальная кинетическая температура «размораживания» T_{fo} практически не зависит от среднего числа участвующих нуклонов $<N_{part}>$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях в интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 ГэВ.

3. Установлены зависимости средней кинетической температуры «размораживания» от энергии соударения в системе центра масс $(s_{nn})^{1/2}$ в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях: $<T_{fo}>$ имеет минимальное значение 112±5 МэВ при $(s_{nn})^{1/2}$= 62.4 ГэВ, и растет с увеличением $(s_{nn})^{1/2}$. Показано, что $<T_{fo}>$ достигает своего предельного среднего значения $<T_{fo}>$=126±7 МэВ при $(s_{nn})^{1/2}\geq$200 ГэВ, т. е. $<T_{fo}>$ остается практически постоянной в диапазоне энергий $(s_{nn})^{1/2}$ = 200—2760 ГэВ. Данная зависимость воспроизводится систематически всеми тремя различными моделями поперечного расширения материи (ударной волны), использованными в работе.

4. Получено, что центральные Pb+Pb соударения при $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ТэВ на БАКе характеризуются более высокой средней скоростью поперечного радиального потока в сравнении с таковыми в центральных Cu+Cu и Au+Au соударениях при более низких энергиях на РКТИ.

5. Получено, что температура T и параметр неэкстенсивности q функции распределения Цаллиса слегка возрастают (для всех типов частиц) с увеличением энергии в системе центра-масс $(s)^{1/2}$ $p+p$ соударений от 2.76 до 5.02 ТэВ, что указывает на то, что более «разрушительные» и более быстрые $p+p$ соударения при $(s)^{1/2}$= 5.02 ТэВ приводят к меньшей степени термализации (более высокой степени неравновесности) по сравнению с $p+p$ соударениями при $(s)^{1/2}$=2.76 ТэВ.

6. Показано, что степень термализации системы Pb+Pb соударений при энергиях БАКа ($(s_{nn})^{1/2}$=2.76 и 5.02 ТэВ) увеличивается, а степень неравновесности (неэкстенсивности) уменьшается, с увеличением центральности Pb+Pb соударений, что согласуется с полученным в настоящей работе результатом о том, что центральные Cu+Cu и Au+Au соударения при $(s_{nn})^{1/2}$=200 ГэВ на РКТИ и центральные Pb+Pb соударения при $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 ТэВ на БАКе создают сильно термализованные системы.

7. Установлено, что значение средней (глобальной) кинетической температуры образования частиц остаётся постоянной в пределах ошибок в центральных соударениях тяжелых ионов (Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударения) в широком интервале энергий $(s_{nn})^{1/2}$=200—5020 ГэВ.

8. Результаты комбинированного фитирования спектров поперечных импульсов заряженных пионов и каонов, протонов и антипротонов с

использованием формулы Хагедорна с внедренным поперечным потоком указывают на очень маленькое значение (согласующееся в пределах ошибок с нулевым значением) скорости коллективного поперечного потока в полном ансамбле p+p соударений при $(s)^{1/2}$=2.76 и 5.02 ТэВ.

SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01
ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREES
AT THE INSTITUT OF NUCLEAR PHYSICS

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

KANOKOVA SHAKHNOZA ZAKIROVNA

COLLECTIVE PROPERTIES OF p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb COLLISIONS IN $(s_{nn})^{1/2}$=62-5020 GeV RANGE.

01.04.08 – Atomic nucleus and elementary particle physics. Accelerator facility

DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences

Tashkent - 2021

The dissertation theme of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences has been registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No. B2018.2.PhD/FM251.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian and English (abstract)) languages on the website of the Scientific Council at www.inp.uz and on the website «Ziyonet» Informational and educational portal at www.ziyonet.uz

Scientific supervisor:	**Olimov Khusniddin Kosimovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Bozorov Erkin Khojievich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
	Nasirov Avazbek Karimovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher
Leading organization:	**Jizzakh State Pedagogical Institute**

The defense of the dissertation will be held on «____» _____ 2021, at ____at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100174 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz)

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No._____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100214 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41.

The abstract of dissertation was distributed on «____»_____ 2021.
(Registry record № _____ dated «____» _____ 2021).

M.Yu. Tashmetov
Chairman of the Scientific Council on award of Scientific degrees, D.ph.-m.s., Professor

O.R.Tojiboev
Scientific secretary of the Scientific Council on award of Scientific degrees, PhD ph.-m.s.,

I. Nuritdinov
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council on award of Scientific Degrees, D. ph.-m.s., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is extraction of new information on the collective properties of dense and hot matter, created in Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb, and p+p collisions in Relativistic Heavy Ion Collider and the Large Hadron Collider experiments at high energies.

The tasks of the research:

phenomenological analysis of experimental transverse momentum distributions of charged pions and kaons, protons and antiprotons produced in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$ = 62.4—2760 GeV range;

select optimal fitting p_t ranges with theoretical (model) functions of the transverse momentum spectra of charged pions and kaons, protons and antiprotons in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$ =62.4—2760 GeV range;

estimate the values of the collective parameters (average transverse expansion velocity ($<\beta_t>$) and global kinetic freeze-out temperature (T_{fo})) of dense matter created in the central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions and extract their dependencies on the collision system ($<N_{part}>$) and energy $(s_{nn})^{1/2}$;

analysis of experimental transverse momentum distributions of charged pions and kaons, protons and antiprotons produced in p+p and Pb+Pb collisions at different centralities at $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 and 5.02 TeV;

select optimal fitting p_t ranges with theoretical (model) functions of the transverse momentum spectra of charged pions and kaons, protons and antiprotons in $p+p$ and Pb+Pb collisions at different centralities at $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 and 5.02 TeV;

estimate the values of the average transverse expansion (flow) velocity ($<\beta_t>$) and global temperature T_0 in Pb+Pb collisions at different centralities at $(s_{nn})^{1/2}$ = 2.76 and 5.02 TeV and extract their dependencies on the degree of centrality of collisions and energy $(s_{nn})^{1/2}$;

estimate the values of the nonextensity parameter q and effective temperature T of the Tsallis distribution function in $p+p$ collisions at $(s)^{1/2}$ = 2.76 and 5.02 TeV and extract their dependencies on the type of particles and energy $(s)^{1/2}$;

The object of the research work are heavy ion collisions (Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb collisions) and p+p collisions at high energies.

The subject of the research work is experimental transverse momentum spectra of charged pions and kaons, protons and antiprotons in p+p, Cu+Cu, Au+Au and Pb+Pb collisions at high energies.

The methods of research. The research methods are mathematical apparatus of statistics, analytical approximations and methods of theoretical and phenomenological modeling of experimental data.

The scientific novelty of the research is as follows:

a positive correlation between the average transverse (radial) expansion velocity ($<\beta_t>$) and the average number of participant nucleons $<N_{part}>$ in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 GeV range was established;

it was demonstrated that the extracted global kinetic freeze-out temperature, T_{fo}, does not show any noticeable dependence on the average number of participant

nucleons $<N_{part}>$ in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 GeV range;

it was found that the value of the average kinetic freeze-out temperature $<T_{fo}>$ increases with an increase of collision energy $(s_{nn})^{1/2}$, reaching its limits at $(s_{nn})^{1/2} \geq$ 200 GeV, and stays constant in $(s_{nn})^{1/2}$ = 200—5020 GeV energy range;

it was shown that the degree of thermalization of the Pb+Pb collision system at LHC energies ($(s_{nn})^{1/2}$= 2.76 and 5.02 TeV) increases, and the degree of non-equilibrium (non-extensivity) decreases with increasing Pb+Pb collision centrality;

it was determined that the temperature T and the nonextensity parameter q of the Tsallis distribution function slightly increase (consistently for all the particle types) with an increase in center-of-mass energy of $p+p$ collisions from 2.76 to 5.02 TeV;

a zero value (consistent within the errors) of the collective transverse flow velocity in p+p collisions at $(s)^{1/2}$ = 2.76 and 5.02 TeV was obtained, which shows the absence of signal on formation of quark-gluon plasma in the whole ensemble of $p+p$ collisions.

Practical results of research consist of the following:

the average values of the collective transverse flow velocity of dense matter created in central Cu+Cu, Au+Au and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 GeV energy range were obtained;

the average values of (global) kinetic temperatures of production of charged pions and kaons, protons and antiprotons in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 GeV energy range were estimated;

the average values of the collective transverse flow velocity of dense matter and average (global) kinetic temperatures of production of the charged pions and kaons, protons and antiprotons were estimated at different centralities in Pb+Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 and 5.02 TeV;

The reliability of the research results is substantiated by the use of the standard apparatus of mathematical statistics, including the generally accepted method of minimum χ^2, theoretical and phenomenological modeling (based on the laws of statistical and nuclear physics, thermo- and hydrodynamics) of experimental data of large statistics obtained in modern RHIC and LHC experiments, as well as the consistency of the obtained results with the results of other authors.

Scientific and practical significance of the research results.

Scientific significance of the research results is determined by the fact that the obtained new fundamental results on the average collective transverse flow velocity of dense matter, as well as the average kinetic freeze-out temperature of the charged pions and kaons, protons and antiprotons in central Cu+Cu, Au+Au and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$= 62—2760 GeV range make a significant contribution to the global database on the collective properties of dense matter created in central collisions of heavy ions at high energies.

Practical significance of the results of the dissertation research comprises of the fact that the method used in this work can be used to determine the average collective transverse flow velocity of dense matter, as well as the average kinetic freeze-out temperature in nucleus-nucleus collisions at high energies, and the results

obtained can be applied to test the suitability of new theoretical models and approaches for describing heavy ions collisions at high energies and planning new experiments at modern heavy ion accelerators - the Relativistic Heavy Ion Collider (Brookhaven, USA) and the Large Hadron Collider (LHC, European Organization for Nuclear Research, Switzerland).

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on the study of collective properties of p+p, Cu+Cu, Au+Au, Pb+Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2}$=62—5020 GeV:

the established positive correlation between the average transverse (radial) expansion velocity ($<\beta_t>$) and the average number of participant nucleons $<N_{part}>$ in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in $(s_{nn})^{1/2}$=62—2760 GeV range was used in the framework of projects of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11575103) and the Shanxi Provincial Science Foundation (Grant No. 201901D111043) (letter from the Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, China, May 24, 2021). The use of scientific results made it possible to establish the dependence of the transverse flow velocity of matter on the energy $(s_{nn})^{1/2}$ and the average number of participant nucleons $<N_{part}>$ of heavy ions collisions;

results on the dependences of the kinetic freeze-out temperature T_{fo} on the average number of participant nucleons $<N_{part}>$ and the collision energy $(s_{nn})^{1/2}$ in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions in the energy range $(s_{nn})^{1/2}$ = 62—2760 GeV were used in the framework of projects of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11575103) and the Shanxi Provincial Science Foundation (Grant No. 201901D111043) (letter from the Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, China, May 24, 2021), and by foreign researchers (references in foreign scientific journals International Journal of Modern Physics A 35, 2050167, 2020; Euro-Asia Conferences, 2021; Advances in High Energy Physics 2021, 6677885, 2021; International Journal of Modern Physics A 36, 2150149, 2021). The use of scientific results made it possible to establish the dependence of the kinetic temperature of particle formation on the energy $(s_{nn})^{1/2}$ of heavy ions collisions, as well as make a significant contribution to the global database on the collective properties of dense matter created in central collisions of heavy ions at high energies;

the established dependences of the degree of thermalization and the degree of non-equilibrium (non-extensivity) on the centrality of the Pb+Pb collision system as well as the temperature T and the degree of non-equilibrium q of the Tsallis distribution function on the energy, the obtained zero value of the collective transverse flow velocity in p+p collisions at $(s)^{1/2}$ = 2.76 and 5.02 TeV were used for the phenomenological analysis of experimental data on proton-proton collisions within the framework of a scientific cooperation agreement between the Department of Physics of the University of Science and Technology Bannu (USTB, Bannu, Pakistan) and the High Energy Physics Laboratory of the Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of Uzbekistan (letter from the Faculty of Physics of the University of Science and Technology Bannu (USTB, Bannu, Pakistan) dated May 25, 2021), and by foreign researchers (references in foreign

scientific journals International Journal of Modern Physics A 35, 2050167, 2020; Advances in High Energy Physics 2021, 6677885, 2021; International Journal of Modern Physics A 36, 2150149, 2021). The use of scientific results made it possible to determine the dependences of the effective temperature of the collision system and the non-extensivity parameter (degree of non-equilibrium) of particles in p+p and A+A collisions on the energy $(s_{nn})^{1/2}$ in experiments at the Heavy Ion Relativistic Collider and the Large Hadron Collider.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation is presented on 118 pages consisting of an introduction, three chapters, a conclusion and a bibliography.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Olimov Kh.K., Kanokova Sh.Z., Olimov K., Gulamov K.G., Yuldashev B.S., Lutpullaev S.L., Yuldashev F.Y. Average transverse expansion velocities and global freeze-out temperatures in central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions at high energies at RHIC and LHC // Modern Physics Letters A. - World Scientific (Singapore), 2020.-Vol. 35, No14.- id.2050115.- p. 2050115-1 (№ 1. Web of Science; IF=2.066)

2. Olimov Kh.K., Kanokova Sh.Z., Olimov A.K., Umarov K.I., Tukhtaev B.J., Gulamov K.G., Yuldashev B.S., Lutpullaev S.L., Saidkhanov N.Sh., Olimov K., Sadykov T.Kh. Combined analysis of midrapidity transverse momentum spectra of the charged pions and kaons, protons and antiprotons in p+p and Pb+Pb collisions at $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 and 5.02 TeV at the LHC // Modern Physics Letters A. - World Scientific (Singapore), 2020. -Vol. 35, No29.- id.2050237.- p. 2050237-1 (№ 1. Web of Science; IF=2.066)

3. Олимов Х.К, Канокова Ш.З. Анализ инвариантных p_t-спектров адронов, возникающих в центральных соударениях тяжелых ионов в рамках модифицированного уравнения Сименса-Расмуссена // Наманган Давлат университети илмий ахборотномаси. – Наманган (Узбекистан), 2020. - №. 3. - С.46-50 (01.00.00. №14)

4. Олимов Х.К, Канокова Ш.З. Феноменологические модели и анализ соударений тяжелых ионов при высоких энергиях // Бухоро Давлат Университети илмий ахбороти. – Бухоро (Узбекистан), 2020. - №. 3. - С.30-35 (01.00.00. №3)

II бўлим (2 часть; part 2)

5. Олимов Х.К., Канокова Ш.З. О средних скоростях поперечного расширения и глобальных температурах «размораживания» в центральных Cu+Cu, Au+Au и Pb+Pb соударениях RHIC и LHC // «Роль одаренной молодежи в развитии физики»: Сборник тезисов докладов республиканской конференции Национального Университета Узбекистана, 18 мая 2019. – Ташкент (Узбекистан),2019. - С.27-31.

6. Olimov Kh. K., Kanokova Sh. About average transverse flow velocities and global freeze-out temperatures in high-energy central Cu+Cu, Au+Au, and Pb+Pb collisions at RHIC and LHC // «Nuclear and Radiation Physics»: Book of abstracts of the XII Intern. Conf. 24-27 June, 2019. – Almaty (Kazakhstan), 2019. - pp.9-10.

7. Olimov Kh. K., Kanokova Sh. About the average transverse flow velocity and kinetic freeze-out temperature in central heavy-ion collisions at high energies at RHIC and LHC experiments // «Nuclear and Radiation Physics»: Book of abstracts of the XII Intern.Conf. 24-27 June, 2019– Almaty (Kazakhstan), 2019. - pp.24-27.

8. Olimov Kh.K., Kanokova Sh. Combined phenomenological analysis of transverse momentum spectra of particles in central heavy-ion collisions at RHIC and LHC energies // «Nuclear and Radiation Physics»: Book of abstracts of the XII Intern. Conf. 24-27 June, 2019. – Almaty (Kazakhstan),2019. - pp.11-12.

9. Olimov Kh. K., Kanokova Sh. Average Characteristics of «Freeze-Out» in Central Heavy-Ion Collisions at High Energies at RHIC and LHC Experiments // «Modern Problems of Nuclear Physics and Nuclear Technologies»: Book of abstracts of the IX Intern.Conf. – Tashkent (Uzbekistan), 2019. - p.36-37.

10. Олимов Х.К, Канокова Ш.З. Феноменологический анализ соударений тяжелых ионов при высоких энергиях // «Роль одаренной молодежи в развитии физики»: Сборник тезисов докладов республиканской конференции Национального Университета Узбекистана 19 мая 2020. – Ташкент (Узбекистан), 2020. - С.120-124.

11. Olimov Kh.K., Kanokova Sh.Z., Olimov A.K., Umarov K.I., Gulamov. K.G. Simultaneous Analysis Of Midrapidity Transverse Momentum Distributions of the Charged Pions and Kaons, Protons and Antiprotons in p+p and Pb+Pb Collisions at $(s_{nn})^{1/2}$=2.76 And 5.02 TeV at the LHC // «Fundamental And Applied Problems of Physics»: Book of abstracts of the International Conference 23 September, 2020. – Tashkent (Uzbekistan), 2020. - pp.73-78.