

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.ФМ/Т.33.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**БУХОРО МУҲАНДИСЛИК ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ**

**ЖУМАЕВ МУСТАҚИМ РОФИЕВИЧ**

**КОНДЕНСИРЛАНГАН ВА НАНОЎЛЧАМЛИ ТИЗИМЛАРДАГИ  
ФЛУКТУАЦИЯВИЙ ВА ПАРАМЕТРИК ҲОДИСАЛАР**

**01.04.07-Конденсирланган ҳолат физикаси**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси  
автореферати мундарижаси**

**Оглавление автореферата  
диссертации доктора физико-математических наук (DSc)**

**Content of the dissertation abstract  
of the Doctor of Science (DSc) on physical and mathematical sciences**

**Жумаев Мустақим Рофиевич**

Конденсирланган ва наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ҳодисалар..... 3

**Жумаев Мустақим Рофиевич**

Флуктуационные и параметрические явления в конденсированных и наноразмерных системах ..... 29

**Jumaev Mustakim**

Fluctuational and parametric phenomena in condensed and nanoscopic systems ..... 55

**Эълон қилинган ишлар рўйхати**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 65

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ  
ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.ФМ/Т.33.01 РАҚАМЛИ  
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

---

**БУХОРО МУҲАНДИСЛИК ТЕХНОЛОГИЯ ИНСТИТУТИ**

**ЖУМАЕВ МУСТАҚИМ РОФИЕВИЧ**

**КОНДЕНСИРЛАНГАН ВА НАНОЎЛЧАМЛИ ТИЗИМЛАРДАГИ  
ФЛУКТУАЦИЯВИЙ ВА ПАРАМЕТРИК ҲОДИСАЛАР**

**01.04.07 - Конденсирланган ҳолат физикаси**

**Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси  
АВТОРЕФЕРАТИ**

**Тошкент – 2021**

**Фан доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2020.3.DSc/FM165 рақам билан рўйхатга олинган.**

Докторлик диссертацияси Бухоро муҳандислик-технология институтида бажарилган.

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

**Расмий оппентлар:**

**Комилов Иброҳимхон Комилович**  
физика-математика фанлари доктори, профессор,  
Россия фанлар академияси мухбир аъзоси

**Нуритдинов Иззатилло**  
физика-математика фанлари доктори, профессор,

**Явидов Баҳром Янгибоевич**  
физика-математика фанлари доктори

**Етакчи ташкилот:**

**Бошқирдистон давлат университети (Уфа, Россия)**

Диссертация ҳимояси Ядро физикаси институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2021 йил “\_\_\_” \_\_\_\_\_ соат \_\_\_ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек шаҳарчаси, ЯФИ; тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

Докторлик диссертацияси билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (\_\_\_\_\_ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100214, Тошкент ш., Улуғбек шаҳарчаси, Ядро физикаси институти. 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 (докторлик (DSc) диссертацияси аннотацияси)

**Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати.** Дунё миқёсида, сўнги йилларда суюқ азот ҳарорати ёки ундан юқори ҳароратларда ишловчи терагерц диапазонидаги жозефсон генераторлари ва детекторларини назарий асослаш ҳамда ишлаб чиқиш амалий юқори ҳароратли ўта ўтказувчанликнинг энг муҳим муаммоларидан бири бўлиб қолмоқда. Ушбу муаммонинг ечими юқори ҳароратли ўта ўтказгичлардаги ток флуктуациялари статистик табиатининг тўлиқ тушунтирилмаганлиги билан асосланади. Жозефсон уюрмалари нурлатадиган электромагнит нурланишнинг частотавий кенгайиш кўлами магнит оқим квантлари - флаксонларнинг нанотизимлардаги муҳим ролини белгилайди.

Жаҳонда охирги йигирма йилда релятивистик броун ҳаракати ва релятивистик статистик физика муаммоларига бўлган қизиқиш кескин тарзда ошмоқда. Бу релятивистик плазма физикаси (бошқарилувчи термоядровий синтез), релятивистик кинетик назариянинг бир қатор фундаментал муаммоларини ҳал қилиш билан, шунингдек, иссиқлик энергиясининг зарраларнинг тинчликдаги энергиясига нисбати нолдан чексизликгача ўзгара оладиган субатомли тизимлардаги ўта мувозанатсиз релятивистик термодинамиканинг ғайри оддий қонуниятлари билан ҳам бевосита боғлиқдир. Аммо ўта юқори ҳароратларда тўқнашувчи бундай ультрарелятивистик зарраларнинг эффектив кесимини аниқлаш имконини берувчи қатъий назария мавжуд эмас.

Республикамизда ўта ўтказувчи материалшуносликни ривожлантиришда, шунингдек квант ҳолатлар максимал энергиясининг иссиқлик энергиясига нисбати чекли қийматга эга бўлганда Бозе-Эйнштейн конденсацияси ҳосил бўлиш шартини ҳам ҳисобга олиш, замонавий конденсирланган ҳолат физикаси муаммоларни ўрганишда муайян натижаларга эришилмоқда. Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича 2017–2021 йилларга мўлжалланган Стратегиясида<sup>1</sup> муҳим вазифалар белгилаб берилган. Бу борада, жумладан турфа хил магнито-оптик тадбиқларни амалга оширишга хизмат қилувчи кўп қатламли наноўлчамли структураларни лойиҳалаштиришда ушбу тизимларда тарқалувчи тўлқинлар интенсивлигини Фарадей эффектини кучайтириш ёрдамида кескин ошириш усуллари излаб топиш муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида” фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-2772-сон “Электротехника саноатини 2017-2021 йилларда янада ривожлантириш чора тадбирлари”, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Илмий-тадқиқот фаолиятини бошқариш, ташкил этиш ва маблағлаштириш чора-тадбирлари” қарорлари, ҳамда, ушбу соҳадаги бошқа меъёрий-ҳуқуқий

---

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

хужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

**Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги.** Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

**Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи<sup>1</sup>.** Конденсирланган ва наноўлчамли тизимларда содир бўлувчи флуктуациявий ва параметрик ҳодисаларнинг турли жиҳатлари бўйича тадқиқотлар дунёнинг қатор етакчи илмий-тадқиқотлар марказларида олиб борилмоқда, жумладан: Австралия нозизиқли физика маркази (Австралия Миллий университети), Стокгольм университети физика факультети (Стокгольм, Швеция), Тель – Авив университетининг физикавий электроника бўлими (Исроил), Дебай номидаги наноматериаллар фанлари институти (Утрехт Университети, Голландия), Мэриленд университети Бирлашган квант институти (Мэриленд, АҚШ), Бошқирдистон давлат университети (Уфа, Россия), Москва давлат университети (Россия), В.А. Котельников номидаги радиотехника ва электроника институти (Москва, Россия), Россия фанлар академияси Доғистон илмий марказининг Х.А. Амирхонов номидаги физика институти (Махачқала), Ўзбекистон Республикаси фанлар академияси Ядро физикаси институти ва Физика-техника институти, шунингдек, Ўзбекистон Миллий университети, Турин политехника институти (Ўзбекистон).

Нозичиқли нано тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ҳодисалар бўйича жаҳон миқёсида назарий ва экспериментал тадқиқотлар асосида қатор муҳим илмий натижалар олинган, шу жумладан: магнит оқими квантларининг Жозефсон узатиш тармоқларидаги ҳаракати билан боғлиқ электромагнит нурланиш хусусиятлари ўрганилган (Дания университети); магнитооптикавий эффектларининг кўп қатламли гетероструктуралардаги кучайиши кузатилган (Москва давлат университети, Россия); диэлектрик сингдирувчанлик дисперсиясини ташқи магнит майдони таъсири остида бошқариш имконияти мавжудлиги исботланган (Москва физика ва технология институти, Россия); бинар Бозе-Эйнштейн конденсатидаги тўлқин жараёнлари ўрганилган (Россия фанлар академияси Доғистон илмий маркази Физика институти, Россия); Бозе-Эйнштейн конденсатидаги солитонларнинг стохастик ва параметрик нотурғунлиги аниқланган (Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Физика-техника институти, Ўзбекистон Миллий Университети).

Дунёда конденсирланган ва наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ҳодисалар бўйича қуйидаги устувор йўналишларда илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда: магнит оқими квантларининг релятивистик броун ҳаракати ва релятивистик броун флаксонлари идеал газини назариясини ишлаб чиқиш; флаксонларнинг асимметрик ва симметрик тезлик тақсимот функцияларини аниқлаш; флуктуацияларнинг электромагнит

---

<sup>1</sup> Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шарҳи <https://sciencedirect.com>, <https://istina.msu.ru>, <https://aip.scitation.org>, <https://osapublishing.org>, <https://elsevier.com> ва бошқа манбалар асосида амалга оширилди.

нурланишлар частотасининг кенгайишига таъсирини аниқлаш; ночизикли - дисперсион наноўлчамли гетероструктураларда (акуст-плазмон ва сиртли Шрёдингер) солитонларнинг шаклланиши ва тарқалишини ўрганиш.

**Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.** Конденсирланган ва наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ҳодисаларни тадқиқ қилиш билан дунёнинг етакчи илмий тадқиқот марказларида кўплаб олимлар шуғулланишмоқда, масалан, россиялик (В.И. Белотелов, Т.В. Михайлова, А.К. Звездин, В.В. Курин, А.С. Чиркин, А.И. Маймистов), исроиллик (Б.А. Маломед, ва ҳ.к.), австралиялик (Ю.С. Кившар, ва ҳ.к.), германиялик (А.В. Устинов, П. Ханги, Ж. Данкл, Р. Тауц), италиялик (М. Салерно ва ҳ.к.), англиялик (Ж. М. Элджин, Ж. П. Гордон), америкалик (С.А. Дарманян, Р. Хақим), ўзбекистонлик (Ф.Х. Абдуллаев, А.А. Абдумаликов ва ҳ.к.).

Ҳозирги вақтда конденсирланган ва наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ҳодисалар дунёнинг етакчи олимлари томонидан ҳам экспериментал, ҳам назарий жиҳатдан етарлича батафсил тадқиқ этилган. Ўтказилган тадқиқотлар натижасида наноўлчамли кўп қатламли гетероструктуралар олиш усуллари ишлаб чиқилган, шунингдек, ушбу тизимларда ночизикли тўлқинларни уйғотиш ва кучайтириш усуллари ҳам тақлиф қилинган (В.И. Белотелов, Т.В. Михайлова, А.К. Звездин). Бу тадқиқотлар натижалари асосида турли гибрид структураларнинг электро- ва магнитооптик хоссаларини бошқариш имконияти вужудга келди. Айниқса, ташқи тасодифий ток ва ҳар хил физикавий табиатли диссипацияларнинг биргаликдаги таъсири остида флаксонларнинг электромагнит нурланиши хусусиятларини тадқиқ этишга бағишланган ишлар диққатга сазовордир (Б.А. Маломед, М. Салерно, Ю.С. Кившар, А.В. Устинов, В.В. Курин). Улар флаксонлар нурланишининг спектрал чизиқлари кўринишини ҳамда флуктуацияларнинг электромагнит нурланишлар частотасининг кенгайишига таъсирини аниқлашга имкон берди. Шунингдек интегралланувчи ночизикли эволюцион тенгламалар билан тавсифланувчи тасодифий модуляцияланган тўлқин майдонлари эволюциясининг бошланғич босқичлари ҳам тадқиқ этилган (Ж.М. Элжин, Ж.П. Гордон, А.С. Чиркин, А.И. Маймистов, Ф.Х. Абдуллаев, С.А. Дарманян, А.А. Абдумаликов). Тасодифий ва тартибланмаган муҳитлардаги ночизифий тўлқинларнинг хусусиятлари ўрганилган (Е.Н. Пелиновский, Л. Васкес).

Релятивистик броун ҳаракати ва релятивистик идеал газ назариясига бағишланган ишлар алоҳида диққатга сазовордир (П. Ханги, Ж. Данкл, Р. Зигадло, Р. Хақим, Ф. Деббач, Р. Тауц). Бу йўналишдаги тадқиқотларнинг натижалари релятивистик броун ҳаракати ва релятивистик идеал газнинг ўзига хос хислатларини тушунишга имконият яратди.

Аммо, айна вақтда ўз ечимини кутаётган айрим муаммолар ҳам мавжуд бўлиб, улар сирасига қуйидагиларни киритиш мумкин: флаксонларнинг ташқи токнинг чекли флуктуациялари таъсири остида юзага келувчи электромагнит нурланиши (ЭМН) частотасини тавсифлашда назарий ва экспериментал натижаларнинг (ўн ва юзлаб марта) катта фарқлиги. Жумладан [If F.,

Christiansen P.L. et.al. Simulation studies of radiation linewidth in circular Josephson junction fluxon oscillators// Phys.Rev.B, v.32, N.3, p. 1512 – 1518, (1985)] ишнинг муаллифлари ушбу фарқланиш сабабини тушунтириб бера олмадилар; бир ўлчовли релятивистик броун ҳаракатини содир этувчи заррача тезлигининг тақсимот функциясининг ягона эмаслиги, Ито, Стратонович ва Климонтович – Ханги трилеммасини ечишни тақозо қилади [A. Mukhopadhyay et.al. Theory of relativistic Brownian motion in the presence of electromagnetic field in (1+1) dimension //AIP Conference Proceedings, 1942, 110016 (2018)]; ҳозирга қадар давом этаётган – Юттнер тақсимотини “ислоҳ қилиш” йўлида олинаётган ва физикага зид натижаларнинг кўпайиб кетганлиги [Cubero D et.al. Thermal equilibrium and statistical thermometers in special relativity//Phys. Rev. Let. 99, 170601 (2007)], ҳамда уларга чек қўйиш зарурати; Бозе-Эйнштейн конденсацияси (БЭК) нинг нисбатнинг чекли қийматларида амалга ошиш шартларини аниқлаш; БЭКда конденсацияланувчи зарралар сонининг энг кичик қийматини топиш; номагнит диэлектриклардаги Фарадей эффектнинг резонанс-диссипатив назариясини ишлаб чиқиш ва кўп қатламли нано ўлчамли тизимларда магнитооптик эффектларни кучайтириш шартларини аниқлаш; бошланғич тасодиқий модуляцияланган тўлқиний импульсларнинг интегралланувчи ва деярли интегралланувчи тизимлардаги эволюциясини таҳлил қилиш усулини яратиш, шунингдек, флуктуациявий манбалар уйғотувчи солитонлар параметрларининг тақсимот функциясини келтириб чиқариш.

**Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги.** Диссертация тадқиқоти Бухоро муҳандислик технология институти илмий-тадқиқот ишлари режасининг ЁФ2-1 “Феррит гранатларда ориентациявий ўзаро таъсир инobatга олинган ҳолдаги фазавий ўтишлар ва магнито-оптикавий хоссаларни тадқиқ этиш” (2016-2017), 21-98 сонли “Параметрлари ўзгарувчан ночизиғий тизимларда солитонли структураларнинг шаклланиш шартлари ва хусусиятлари” (1998-2000), ОТ-Ф2-64 “Конденсирланган ва наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ҳодисалар” (2017-2020) ва халқаро CRDF ZM1-342 ва ZM2-2095, INTAS 96-339 илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

**Тадқиқотнинг мақсади** флуктуациявий ва параметрик кучлар таъсири остида бўлган физикавий тизимларнинг макроскопик хоссалари ва уларнинг ўзгаришларини параметрларнинг характери ва табиатини аниқловчи тақсимот функцияларини топиш асосида тушунтиришдан иборат.

**Тадқиқотнинг вазифалари:**

магнит оқими квантларининг релятивистик броун ҳаракати ва релятивистик броун флаксонлари идеал гази назариясини ривожлантириш;

тезликларнинг тақсимот функцияси асосида Максвелл – Больцман релятивистик идеал газининг муқобил назариясини ишлаб чиқиш;

квант релятивистик идеал газларнинг чекли-ҳароратли инвариант назариясини зарраларнинг релятивистик импульс функцияси асосида ривожлантириш;

Бозе-Эйнштейн конденсатидаги солитонларнинг энг кичик сонини топиш;

номагнит диэлектриклардаги Фарадей эффектининг резонанс-диссипатив моделини таклиф қилиш;

тасодифий модуляцияланган бошланғич тўлқинли импульсларнинг интегралланувчи ва деярли интегралланувчи тизимлардаги эволюциясини таҳлил қилиш усулини таклиф этиш;

флуктуациявий манбалар уйғотган солитонларнинг ночизигий-дисперсияли наноструктуралардаги параметрларининг тақсимот функциясини аниқлаш.

**Тадқиқотнинг объектини** классик ва квант релятивистик идеал газ, Бозе-Эйнштейн конденсати, шунингдек, кўп қатламли наноўлчамли гетероструктуралар ташкил этади.

**Тадқиқотнинг предметини** квази-зарралар ва одатдаги зарраларнинг релятивистик броун ҳаракати, Максвелл – Больцман релятивистик идеал газ зарраларнинг тавсифий тезликлари, ноквант ва квант релятивистик идеал газларнинг босими, ўртача энергияси зичлиги ва ҳолат тенгламаси, тасодифий модуляцияланган бошланғич тўлқиний импульслардан ҳосил бўлувчи солитонлар параметрларининг тақсимот функцияси ташкил этади.

**Тадқиқотнинг усуллари.** Тасодифий жараёнлар назарияси усуллари, солитонлар учун ғалаён назарияси, сочилиш масаласининг тескари усули, кумулянт таҳлил, тақсимот функцияларини алмаштириш усуллари, релятивистик идеал газларни тавсифловчи макроскопик катталикларни зарраларнинг тезлик ёки импульс бўйича тақсимот функциялари асосида ўртачаштириш усули воситасида топиш; сонли моделлаштириш усуллари, назарий ва статистик физика усулларида фойдаланилган.

**Тадқиқотнинг илмий янгилиги** куйидагилардан иборат:

илк бор флуктуаланувчи параметрли турли физик тизимлардаги тақсимот функцияларининг вақтга боғлиқ ўзгаришини таҳлил қилиш имкониятини берувчи релятивистик магнит оқими квантларининг (флаксонлар) тақсимот функцияси учун тенглама олинган;

биринчи марта заррачалар тезликларининг релятивистик тақсимот функцияси асосида релятивистик идеал газ зарраларининг тавсифий тезликлари ёруғлик тезлигидан катта бўла олмаслиги кўрсатилган ва шу асосида Планк масаласи ҳал этилган;

илк бор квант релятивистик идеал газларни тавсифловчи макроскопик катталиклар заррачалар импульслари бўйича тақсимот функциясини ўртачаштириш усули воситасида топилган;

вариацион таҳлил асосида Бозе – Эйнштейн конденсатида шакллланувчи солитонларнинг энг кичик критик сони топилган;

Бозе – Эйнштейн конденсатидаги атомларнинг флуктуациявий ўзаро таъсири натижасида юзага келувчи солитонларнинг стохастик параметрик резонанси назарияси ривожлантирилган;

сочилиш масаласининг тескари усули ва кумулянт таҳлил асосида тасодифий ташкил этувчига эга ночизикли тўлқинлар эволюциясини таҳлил қилиш усули таклиф этилган;

қисман когерент ўта қисқа лазер нурланиш манбалари таъсирида уйғотилувчи стохастик бошланғич шартлардан шаклланувчи солитонлар параметрларининг тақсимот функцияси аниқланган.

**Тадқиқот амалий натижалари** қуйидагилардан иборат:

флаксонларнинг асимметрик ва симметрик тезлик тақсимот функциялари топилган;

биринчи марта флаксонлар нурлайдиган электромагнит нурланиш частотасининг ўртача квадратик дисперсияси ташқи токнинг ҳар қандай кўламдаги флукутацияси учун чекланганлиги исботланган;

одатдаги заррачанинг бир ўлчовли релятивистик Броун ҳаракати учун флукутациявий – диссипатив нисбат олинган;

релятивистик идеал газлар зарраларининг ўртача ва ўртача квадратик тезликлари формулалари топилган ва релятивистик идеал газлар ҳолат тенгламаси олинган;

квант релятивистик идеал газнинг зарралар сонининг ўртача зичлиги, ўртача энергия зичлиги, квант релятивистик идеал газ ҳолат тенгламаси келтириб чиқарилган, ҳамда ултрарелятивистик чегарада квант идеал газларининг адиабата кўрсаткичлари ҳисобланган;

номагнит диэлектрикларда магнито-оптикавий эффектларни ташқи магнит майдони таъсирида бошқариш ва кучайтиришнинг нотривиал-резонанс усули топилган.

**Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги** назарий ва статистик физика, Эйнштейн-Фоккер тенгламалари назариясининг замонавий комплекс усуллари кўллаш, аналитик ҳисоблашларнинг сонли моделлаштириш натижаларига мослиги, шунингдек, олинган натижаларнинг умумфизик тасаввурларга зид эмаслиги ва мавжуд адабиётлардаги маълумотлар билан уйғунлиги билан таъминланган.

**Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.** Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти квазизарралар ва одатдаги зарраларнинг релятивистик броун ҳаракати назариясининг, шунингдек, ноквант ва квант релятивистик идеал газларнинг қатор муҳим хусусиятларини аниқлаштирилганлигидан иборат.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти флаксонлар генерациялаган электромагнит нурланиши частоталари тақсимот функцияси терагерц частоталар соҳасида ишловчи ва юқори ҳароратли ўта ўтказгичлар асосида яратилган жозефсон генераторлари ва детекторларини ишлаб чиқишда муҳим аҳамиятга эгалигидир. Тасодифий модуляцияланган бошланғич тўлқиний импульслар уйғотган солитонлар параметрларининг тақсимот функцияси - кўп қатламли структураларда қисман когерент ўта қисқа нурланишли лазер манбалари генерациялаган акусто-плазмон солитонлари ва Шрёдингер плазмон солитонларининг тарқалишини тадқиқ этишда қўлланилиши мумкин.

**Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши.** Конденсирланган ва

наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ходисаларни тадқиқ қилиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

вақтга боғлиқ ўзгаришини таҳлил қилиш имкониятини берувчи релятивистик магнит оқими квантларининг (флаксонлар) тақсимот функцияси учун олинган тенглама (Фоккер-Планк тенгламасига ўхшаш) Россия фанлар академияси Котелников номидаги Радиотехника ва электроника институтининг “Истикболли магнитокалорик материалларда содир бўлувчи фазавий ўтишлардаги термодинамик ва релаксациявий жараёнларни фундаментал тадқиқ этиш” илмий лойиҳаси доирасида фойдаланилган (Россия фанлар академияси Котелников номидаги Радиотехника ва электроника институтининг 27.10.2020 йилдаги 446-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши ўрганилаётган тизимларда квазизарралар тезлигининг тақсимот функцияларини топиш имконини берган;

Планкнинг асосий муаммоларини зарралар тезлигининг релятивистик тақсимлаш функциясига асосланган ҳолда ҳал қилиш бўйича натижалар ўқув жараёнида назарий физика бўйича бакалавр дастури ҳамда “Назарий физиканинг танланган боблари” ва “Конденсатланган моддалар физикаси” махсус курсларда магистрлик дастури сифатида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 18.01.2021 йилдаги 89-03-264-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши талабаларнинг конденсирланган ҳолатлар физикасининг замонавий муаммолари ҳақидаги тасавурларини кенгайтиришда хизмат қилган;

квант идеал газларнинг макроскопик хусусиятларини топиш учун зарралар моментларининг релятивистик тақсимот функцияси бўйича ўртача ҳисоблаш усули назарий физика бўйича бакалавр дастури ҳамда “Назарий физиканинг танланган боблари” ва “Конденсатланган моддалар физикаси” махсус курсларда магистрлик дастури сифатида фойдаланилган (Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг 18.01.2021 йилдаги 89-03-264-сон маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши талабаларнинг конденсирланган ҳолатлар физикасининг замонавий муаммолари ҳақидаги тасавурларини кенгайтиришда хизмат қилган;

Бозе-Эйнштейн конденсатидаги солитонларнинг топилган энг кичик критик сони “Квант – майдон усулларининг тараққиёти ва ферми-бозон тизимлари, мета-материаллар, графенсимон структуралар, спинорли Бозе-Эйнштейн конденсатларидаги янги фазавий ўтишлар, критик ходисалар, солитонлар топологиясини тадқиқ этиш” мавзусида давлат буюртмаси асосидаги илмий-тадқиқот лойиҳаси доирасида фойдаланилган (Россия фанлар академияси Доғистон федерал тадқиқот марказининг 27.10.2020 йилдаги 17200-913-сон маълумотномаси). Олинган натижаларнинг қўлланилиши Гросс - Питаевский солитонларини ҳосил қилиш учун Бозе - Эйнштейн конденсатидаги конденсацияланувчи атомларнинг энг кичик сонини аниқлаш имконини берган;

Бозе-Эйнштейн конденсатидаги солитонлар стохастик параметрик резонансининг ривожлантирилган назарияси Испаниянинг чизиқли бўлмаган муаммоларни ўрганишни қўллаб-қувватлаш лойиҳаси доирасида ишлатилган

(Мадрид университетининг 03.11.2020 йилдаги маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши солитонларнинг изланаётган параметрларининг ўртача қийматларини топиш имконини берган;

таклиф этилган сочилиш масаласининг тескари усули ва кумулянт таҳлил асосида тасодифий ташкил этувчига эга ночизиғий тўлқинлар эволюциясини таҳлил қилиш усули ва аниқланган стохастик бошланғич шартлардан эволюцияланувчи солитонлар параметрларининг тақсимот функцияси чизикли бўлмаган толали алоқа линияларида оптик солитонларнинг тарқалишини ўрганишда фойдаланилган (“МИФИ” Миллий тадқиқот ядро университетининг 29.10.2020 йилдаги маълумотномаси), ҳамда хорижий тадқиқотчилар томонидан ҳам қўлланилган (халқаро журналларда ҳаволалар: Physical Review, E, 78, 031120 (2008); Physical Review, E, 79, 051128 (2009); Physical Review, E, 81, 011141 (2010); Journal of Modern Physics B, 10, 1142 (1991); Physical Review, A, 63, 053603 (2001); Journal of the Physical Society of Japan, 65, 3426 (1996); Physical Review, E, 58, 4166 (1998); Journal of Statistical Physics, 10, 1023 (2001); Physical Review, E, 54, 6313 (1996); Progress of Theoretical Physics, 10, 1088 (2009); Physical Review, E, 71, 056205 (2005); Physical Review, E, 71, 056205 (2005); Physica D, 113, 115 (1998); Chaos, Solitons and Fractals, 39, 1645 (2009); Computational mathematics and theoretical physics, 10, 1134 (2013)). Илмий натижаларнинг қўлланилиши қачонки солитонларнинг тарқалиши Корте - вега де Вриза тенгламаси, синус Гордон тенгламаси ва чизикли бўлмаган Шредингер тенгламаси билан тавсифланган бўлса, шовқин манбалари натижасида ҳосил бўлган солитонлар параметрларининг тарқалиш функциясини аниқлаш имконини берган.

**Тадқиқот натижаларининг апробацияси.** Диссертация ишининг асосий натижалари 15 та халқаро ва республика анжуманларида маъруза қилинган, ҳамда муҳокама этилган.

**Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги.** Диссертация мавзуси бўйича жами 30 та илмий иш чоп этилган, жумладан, 1 та монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий журналларда – 10 та мақола, улардан 6 таси эса хорижий журналларда.

**Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми.** Диссертация кириш, 7 та боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертация ҳажми 230 бетни ташкил этади.

## ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

**Кириш** қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, илмий ишнинг мақсади ва вазифалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиқ берилган ва

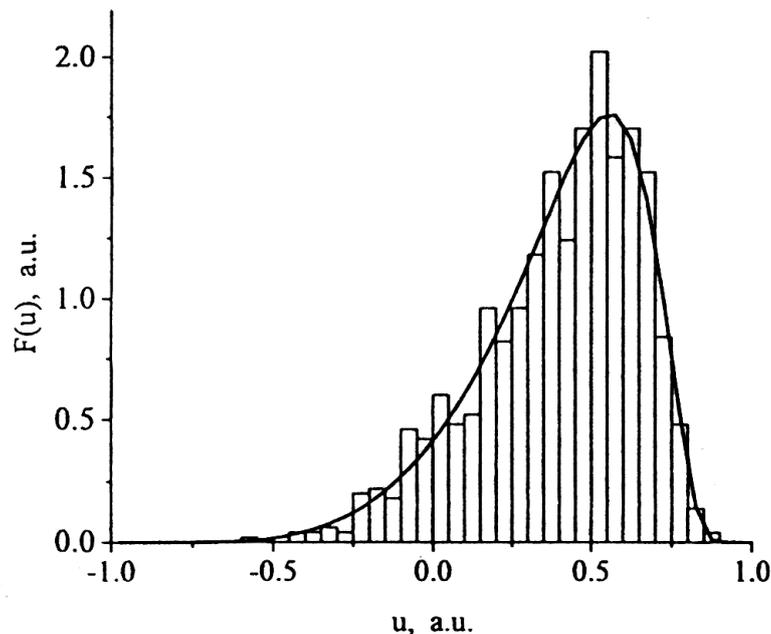
уларни амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг “**Магнит оқими квантларининг релятивистик броун ҳаракати назарияси**” деб номланган биринчи бобида магнит оқими квантларининг релятивистик броун ҳаракати назарияси, шунингдек, ноодатий газ – Броун флаксонлари релятивистик идеал гази назарияси илк марта тақдим этилган.

Дастлаб флаксонлар тезликларининг асимметрик тақсимот функцияси топилган (1-расмга қаранг)

$$\phi(u) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \frac{1}{(1-u^2)^{\frac{3}{2}}} \exp \left[ -a \left( \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} - b \right)^2 \right], \quad a = \frac{\alpha}{2D}, \quad b = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\gamma_0}{\alpha}. \quad (1)$$

бунда  $u$  – флаксон тезлигининг қаралаётган тизимдаги чегаравий тезлик - Свихарт тезлигига нисбати,  $\alpha$  – диссипация коэффиценти,  $\gamma_0$  - ташқи токнинг доимий ташкил этувчисининг максимал критик Жозефсон токига нисбати,  $D$  - ток флуктуацияларининг нисбий интенсивлиги.



Узлуксиз чизиқ- назария, гистограмма – сонли ҳисоблаш

### 1-расм. Флаксонлар тезликларининг асимметрик тақсимот функцияси

Флаксонлар тезликларининг ушбу тақсимот функцияси Гаусс тақсимоти эмас ва у флуктуациявий токли Жозефсон ўтишларининг нотривиал (яъни, кутилмаган) вольт-ампер тавсифига (ВАТ) олиб келади.

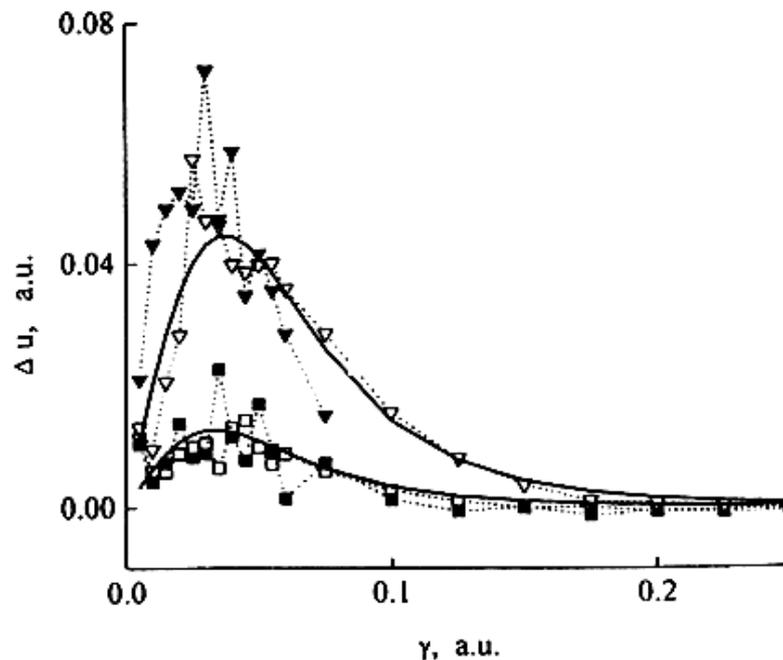
Бу ҳолда  $\Delta u$  кучланишлар фарқи  $b$  ошиши билан номонотон тарзда ўзгаради, яъни нормаллаштирилган доимий ток  $\gamma_0$  ўсганда,  $b=0.5$  ёки  $\gamma_0 = \frac{2\alpha}{\pi}$  бўлганда максимумга эришади.  $\Delta u_m$  ток флуктуацияларининг нисбий

интенсивлиги  $D$  га тўғри пропорционал ва диссипация коэффициенти  $\alpha$  га тескари пропорционалдир (2- расмга қаранг):

$$\Delta u = u_d - \langle u \rangle = \frac{3}{4a} \cdot \frac{b}{(1+b^2)^{5/2}}, \Delta u_m = \frac{24\sqrt{5}}{125} \cdot \frac{D}{\alpha} \quad (2)$$

Сўнгра флаксонлар тезликларининг релятивистик тақсимот функцияси (ТРТФ) олинган бўлиб, у соф тасодифий ток ва диссипация таъсирида қарор топади ҳамда қуйидаги кўринишга эга:

$$\Phi(u) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} (1-u^2)^{-3/2} \exp[-au^2(1-u^2)^{-1}] \quad (3)$$



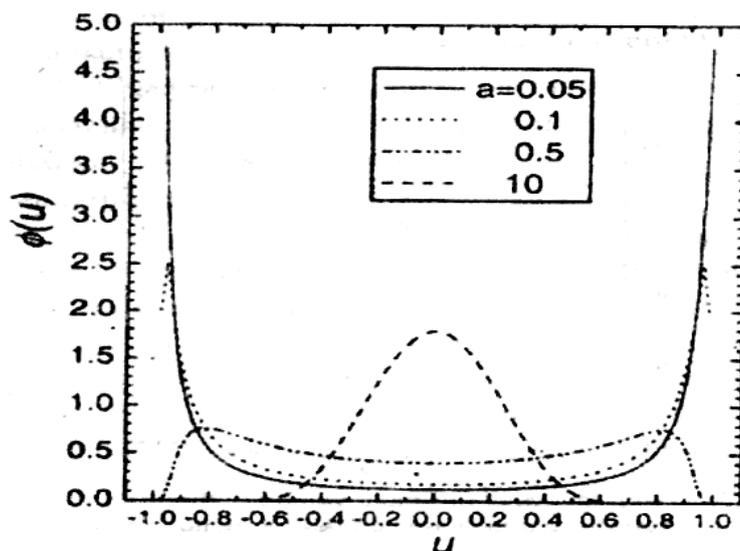
**2-расм. Кучланишлар фарқининг доимий токка боғлиқлиги. Узлуксиз чизиқ -назария, қора ва оқ белгилар – сонли ҳисоблаш ( $\sigma$  :  $\square$  – 0,1;  $\nabla$  – 0,05)**

Флаксонлар ТРТФ таҳлили шуни кўрсатадики, ток флуктуациялари ва диссипация коэффициенти нисбатининг муайян соҳасида ТРТФ графиги икки ўрқачлига айланади ҳамда қуйидаги икки нуқтада максимумга эга бўлади (3-расмга қаранг):

$$u = \pm \sqrt{1 - \frac{2a}{3}} \quad (4)$$

ТРТФнинг бундай ғаройиб ўзгариши - кутилмаган ҳолдир, чунки импульс тезликнинг бир қийматли монотон функциясидир. Шундай қилиб, ТФнинг бу

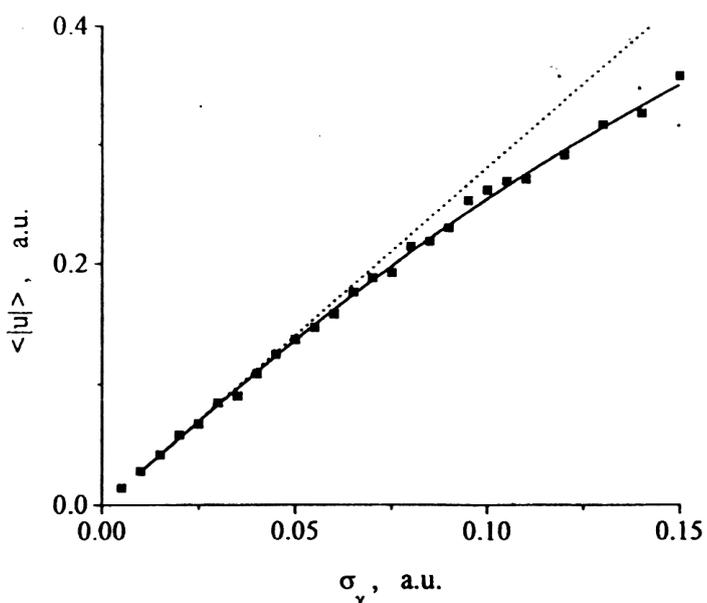
“нозик табиати”ни олдиндан кўра олиш имконсиз эди ва ТФнинг нозизиғий алмашинуви оқибатидир.



3-расм. Броун флаксонлари тезликларининг релятивистик тақсимот функцияси

Сўнгра флаксонлар тезликлари модулининг ўртача қиймати ва тезлик квадратининг ўртача қийматлари учун формулалар келтириб чиқарилган бўлиб, бу тавсифий тезликлар ток флуктуациялари интенсивлигининг нозизиғий функциясидир (4-расмга қаранг):

$$\langle |u| \rangle = [1 - \operatorname{erf}(\sqrt{a})] \exp a, \quad \langle |u|^2 \rangle = 1 - \sqrt{a\pi} \langle |u| \rangle. \quad (5)$$



4-расм. Флаксон тезлиги модули ўртача қийматининг ток флуктуацияси  $\sigma$  га боғлиқлиги. ■- сонли ҳисоблаш; узлуксиз чизиқ - (5) формула, пунктир –норелятивистик назария

Бу формулалар  $a \gg 1$  бўлганда норелятивистик Броун ҳаракати назариясидан келиб чиқувчи натижаларга айнан мос келади ва охириги назария куйидаги шартлар бажарилгандагина ўринлидир:

$$\langle |u|^2 \rangle \approx \frac{1}{2a} \ll 1, \quad a = \frac{\alpha}{2D} = \frac{E_0}{2kT} \gg 1, \quad E_0 = \frac{I_c \Phi_0}{2\pi}. \quad (6)$$

бунда  $E_0$  – флаксонларнинг тинчликдаги энергияси,  $I_c$  - максимал критик Жозефсон токи,  $kT$  - иссиқлик энергияси,  $T$  – тизимнинг эффе́ктив ҳарорати,  $k$  – Больцман доимийси,  $\Phi_0$  - магнит оқими кванти.

(5) формулалардан  $a$  параметрнинг жуда кичик қийматлари ( $a \ll 1$ ) яъни ультрарелятивистик чегарада куйидаги ажойиб натижалар келиб чиқади:

$$\langle |u| \rangle \approx 1 - 2\sqrt{\frac{a}{\pi}}, \quad \langle |u|^2 \rangle \approx 1 - 2a \quad (a \ll 1). \quad (7)$$

Шундай қилиб, биз тезлик квадратининг ўртача қиймати учун келтириб чиқарган (5) ифодани релятивистик квази зарралар – магнит оқими квантлари учун Эйнштейн муносабатининг релятивистик умумлаштирилиши деб қарашимиз мумкин.

Шунингдек, бу ерда флаксонлар ҳосил қилган электромагнит нурланиш частотасининг ўртача квадратик дисперсияси токнинг ҳар қандай флуктуацияси кўламида чекланган эканлиги ва бунда релятивистик магнит оқими квантларининг яна бир ноёб хусусияти намоён бўлиши биринчи марта исботлаб берилган.

Бобнинг охирида Броун флаксонлари релятивистик идеал газини тавсифловчи ўртача энергия зичлиги  $\rho$ , босими  $p$  ифодалари, ҳамда уларни ўзаро боғловчи ҳолат тенгламалари келтириб чиқарилган.

Диссертациянинг **“Максвел-Больцман релятивистик идеал газининг муқобил назарияси”** деб номланган иккинчи бобида оддий заррачаларнинг бир ўлчовли релятивистик Броун ҳаракати назарияси, бир ўлчовли релятивистик идеал газ назарияси, шунингдек, Максвелл-Больцман релятивистик идеал газининг муқобил назарияси тақдим этилган.

Дастлаб, бир ўлчовли релятивистик Броун ҳаракатида бўлган заррачалар тезликларининг тақсимот функцияси  $F(u)$  топилган:

$$F(u) = \frac{1}{2k_1(b)} (1-u^2)^{-\frac{3}{2}} \exp\left[-b(1-u^2)^{\frac{1}{2}}\right]. \quad (8)$$

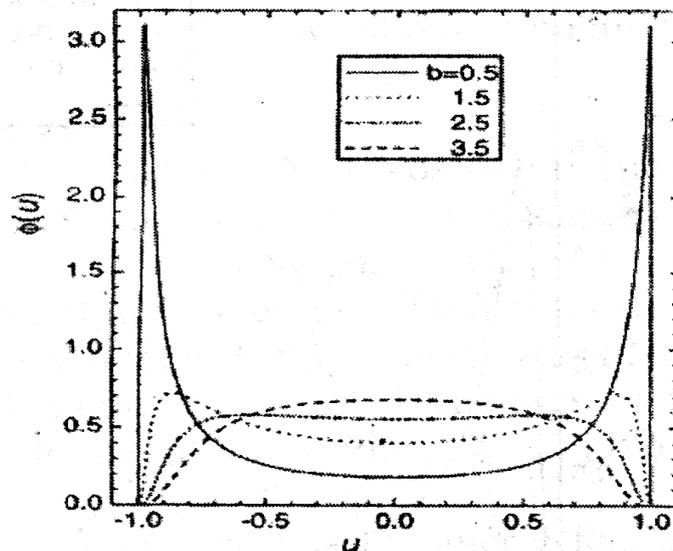
Ушбу ифодадан келиб чиқадики, тезликлар тақсимо́ти функцияси  $F(u)$  нинг статистик хусусиятлари заррачаниннг тинчликдаги энергияси  $E_0 = mc^2$  нинг тавсифий флуктуациявий энергияси  $E_{\text{фл}} = \frac{D}{\alpha}$  га нисбатига тенг бўлган  $b$  параметр билан аниқланади (бунда,  $D$  – заррачага таъсир этувчи тасодифий кучларнинг интенсивлиги,  $\alpha$  – диссипация коэффи́циенти). Сўнгра, бир ўлчовли

релятивистик идеал газ нормаллашган тезлигининг тақсимот қонуни қуйидаги кўринишда олинган (5-расмга қаранг):

$$\Phi(u) = \tilde{A}(1-u^2)^{-\frac{3}{2}} \exp\left[-b(1-u^2)^{-\frac{1}{2}}\right], \quad \tilde{A} = \frac{1}{2k_1(b)}, \quad u = \frac{g_x}{c}. \quad (9)$$

Биобарин, бир ўлчовли релятивистик идеал газ зарраларининг нормаллашган тезлигининг топилган тақсимот функцияси  $\Phi(u)$  бир ўлчовли Броун ҳаракатида бўлган релятивистик заррачанинг нормаллашган тезлигининг тақсимот функцияси  $F(u)$  га тўлиқ ўхшайди.

Шунингдек, ушбу бобда Максвелл-Больцман релятивистик идеал газининг муқобил назарияси ишлаб чиқилди.



**5-расм. Бир ўлчовли релятивистик идеал газ зарралари тезликларининг тақсимот функцияси**

Дастлаб, релятивистик идеал газ зарраларининг импульслари учун Максвелл-Больцман тақсимот функциясини тезликлар учун тақсимот функциясига алмаштириш орқали релятивистик идеал газ зарраларининг уч ўлчамли тезликлар тақсимоти олинган

$$\int f(P_x, P_y, P_z) dP_x dP_y dP_z = \int \varphi(v_x, v_y, v_z) D |dv_x dv_y dv_z|. \quad (10)$$

Бунда  $D$ —импульслар  $P_x, P_y, P_z$  дан тезликлар  $v_x, v_y, v_z$  га ўтиш детерминанти бўлиб, у қуйидагича аниқланади:

$$D = m^3 \gamma^5 = m^3 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{5}{2}}. \quad (11)$$

Қайд этиш жоизки, импульслардан тезликларга ўтиш учун топилган детерминант  $D$  релятивистик идеал газ зарралари импульсларининг ихтиёрий тақсимот функцияси учун ўринлидир.

Энди релятивистик идеал газ зарралари импульсларининг Больцман тақсимоидан фойдаланиб, Максвелл-Больцман релятивистик идеал газ зарралари тезликларининг тақсимот функциясини топамиз:

$$f(\vec{p}) = f(P_x, P_y, P_z) = B \exp\left[-\frac{\sqrt{E_0^2 + p^2 c^2}}{kT}\right]. \quad (12)$$

бунда  $E = mc^2$  – газ зарраларининг тинчликдаги энергияси,  $kT$  – иссиқлик энергияси,  $B$  – тақсимот функциясини нормаллаштириш орқали топиладиган доимий.

Дастлаб, Максвелл-Больцман релятивистик идеал газ зарралари нормаллашган тезликлари модулларининг келтирилган тақсимот функцияси топилган бўлиб, уни қуйидаги ихчам шаклда ёзиш мумкин:

$$\Phi(u) = \frac{b}{k_2(b)} u^2 (1-u^2)^{-\frac{5}{2}} \exp\left[-b(1-u^2)^{-\frac{1}{2}}\right]. \quad (13)$$

Таъкидлаб ўтамизки, норелятивистик соҳада иссиқлик ҳаракат энергияси  $kT$  зарранинг тинчликдаги энергияси  $mc^2$  дан жуда кичик ва параметр  $b = \frac{mc^2}{kT} \gg 1$ , ҳамда зарранинг тезлиги ёруғлик тезлигига нисбатан ҳисобга олмайдиган даражада кичик яъни  $\frac{v}{c} \ll 1$  бўлганда, ТФ  $\Phi(u)$  дан қуйидагини оламиз:

$$F_M(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left[-\frac{mv^2}{2kT}\right]. \quad (14)$$

Бу эса машҳур Максвелл тақсимоиди бўлиб,  $u$  - норелятивистик кинетик назария ва статистик физиканинг асоси ҳисобланади.

Шундай қилиб, биз топган релятивистик идеал газ зарралари тезликларининг тақсимот функцияси норелятивистик соҳада норелятивистик идеал газ кинетик назариясининг асоси бўлмиш Максвелл тақсимоидига айланар экан.

Кейинги бўлимда, илк марта релятивистик идеал газ зарраларининг ўртача ва ўртача квадратик тезликлари формулалари топилди, улар қуйидаги кўринишга эга:

$$\langle u \rangle = \frac{2e^{-b}}{k_2(b)} \left(\frac{1+b}{b^2}\right), \quad u_{\text{кв}} = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{1 - \frac{k_1(b) - k_{i_1}(b)}{k_2(b)} b} \quad (15)$$

Ўртача тезлик ва ўртача квадратик тезликлар учун топилган (15) ифодалар релятивистик тақсимоиднинг яна бир муҳим тавсифи – газ зарраларининг ўртача квадратик флукутациясини топишимизга имкон беради:

$$Dv = \langle v^2 \rangle - \langle v \rangle^2 = c^2 [\langle u^2 \rangle - \langle u \rangle^2] = c^2 Du, \quad (16)$$

бу релятивистик идеал газ зарралари тезлигининг тавсифий четлашувини тавсифлайди.

$b \gg 1$  бўлганда ўртача тезлик ва ўртача квадратик тезликлар учун қуйидагини оламиз:

$$\langle v^2 \rangle \approx c^2 \cdot \frac{3}{b} \left( 1 - \frac{45}{(8b)^2} \right) \approx \frac{3kT}{m}, \quad \langle v \rangle \approx c \cdot 2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{b}} \approx \sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot \frac{kT}{m} \quad (17)$$

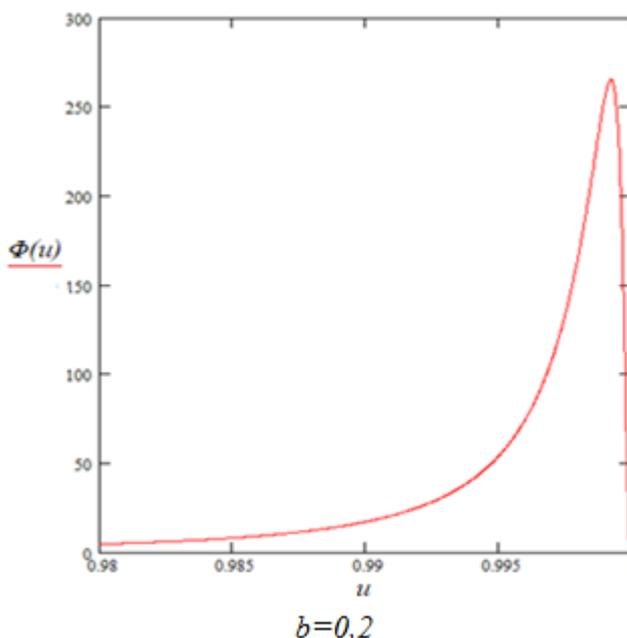
Ушбу натижалар Максвелл тезликлар тақсимотидан ҳам келиб чиқади.

$b$  параметрининг кичик қийматларида яъни  $b \ll 1$  (ёки  $b \rightarrow 0$ ), қуйидаги натижаларни оламиз:

$$\langle u \rangle = 1 - b^2, \quad \langle u^2 \rangle \approx 1 - \frac{1}{2} b^2. \quad (18)$$

Бинобарин, ультрарелятивистик чегарада релятивистик идеал газ заррачаларининг ўртача тезлиги ва ўртача квадрат тезлиги ёруғлик тезлигига - табиатдаги тезликлар чегарасига интилади.

Бу ерда, шунингдек, Максвелл-Больцман релятивистик идеал газ зарралари нормаллашган тезликлари модулларининг келтирилган тақсимот функцияси дельта функция шаклида бўлиши биринчи марта массасиз чегарага ўтиш орқали исботланди (6-расмга қаранг).



**6-расм. Максвелл-Больцман релятивистик идеал газ зарралари нормаллашган тезлиги модулларининг тақсимот функцияси ( $b=0,2$ )**

Шундай қилиб, релятивистик идеал газ (РИГ) заррачаларининг тавсифий тезликлари табиатдаги чегаравий тезлик - ёруғлик тезлигидан ошмайди.

Бундан ташқари, Нернст томонидан исботланган абсолют нол ҳароратга эришиб бўлмаслигини ҳисобга олиб, ҳар қандай ҳароратда фақат массасиз зарраларгина ёруғлик тезлигига тенг тавсифий тезликка эга деган хулосага келамиз. Албатта, ушбу хулосалар муҳим концептуал аҳамиятга эга, чунки улар релятивистик статистик физикада ҳам махсус нисбийлик назарияси постулатларининг тўғрилигини исботлайди.

Бошқача қилиб айтганда, "ёруғлик" ёки массасиз РИГ заррачалари ёруғлик тезлигига тенг бўлган бир хил тезликка эга ва улар тезликларининг йўналишлари тенг эҳтимоллик билан, яъни изотропик равишда тақсимланади.

Шу билан бирга, Максвелл тезликлар тақсимооти (14) массасиз соҳада "айнийд" ва ҳар қандай нолдан фарқли бўлган ҳароратда нолга тенг бўлади. Бу кутилган натижа бўлиб, норелятивистик физикага кўра массаси нол бўлган зарралар мавжуд бўлиши мумкин эмас, яъни эҳтимоли нолга тенг – буни эса Максвелл тезликлар тақсимооти кўрсатиб турибди.

Боб охирида РИГлар макроскопик хусусиятларини уларнинг зарралари тезлигининг тақсимот функцияси бўйича статистик ўртачалош асосида релятивистик идеал газ учун ҳолат тенгламаси келтириб чиқарилган.

Биз қуйида ишлаб чиқан назариянинг асоси қуйидаги релятивистик-инвариант ифодалар бўлиб, улар релятивистик идеал газ заррачаларнинг ўртача энергия зичлиги ва босимини аниқлайди:

$$\rho = nE_0 \left\langle \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\rangle, \quad (A) \quad P = \frac{nE_0}{3} \left\langle \frac{\frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\rangle, \quad (B) \quad (19)$$

бунда  $n$  – газ зарраларининг концентрацияси,  $E_0$  - газ зарраларининг тинчликдаги энергияси ва қавслар идеал газ зарралари тезлигининг тақсимот функцияси бўйича ўртачалашни билдиради.

(19,A) ва (19,B) ифодалардан, ҳамда РИГ зарралари тезликлари тақсимот функциясидан фойдаланиб, Максвелл-Больцман релятивистик идеал газнинг ҳолат тенгламаси олинган ва бу тенглама РИГнинг босими, ўртача энергия зичлиги ва ҳароратини боғлайди:

$$\rho - 3P = nmc^2 \frac{k_1(b)}{k_2(b)}, \quad b = \frac{mc^2}{\kappa T}. \quad (20)$$

Бу ерда Максвелл-Больцман РИГ ўртача энергия зичлиги  $\rho$  қуйидагича ифодаланади:

$$\rho = nmc^2 \left[ \frac{k_1(b)}{k_2(b)} + \frac{3}{b} \right], \quad b = \frac{mc^2}{\kappa T}, \quad (21)$$

ва РИГ босими

$$P = nkT. \quad (22)$$

Максвелл-Больцман РИГ ўртача энергия зичлиги  $\rho$  ифодасидан фойдаланиб, хусусан, битта РИГ заррачасининг (ёки атомининг) ўртача кинетик энергиясини аниқлаш учун қуйидаги формулани оламиз:

$$\frac{\langle E_k \rangle}{kT} = b \cdot \left[ \frac{k_1(b)}{k_2(b)} + \frac{3}{b} - 1 \right]. \quad (23)$$

Охирги формула зарранинг ўртача кинетик энергиясини ва ҳароратни ўлчаш асосида зарра массасини аниқлашнинг ноанъанавий имкониятини беради.

Ишлаб чиқилган РИГ муқобил назариясининг қўлланилиши сифатида тўқнашувчи ультра РИГ зарраларининг эффективўртача квадратик кесими топилди ва у қуйидаги формула билан аниқланади:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \sqrt{\langle u_1^2 \rangle + \langle u_2^2 \rangle - \langle u_1^2 \rangle \langle u_2^2 \rangle} \frac{2}{3}. \quad (24)$$

бунда  $\sigma_{\max}$  - кўзгалмас зарра билан тўқнашувчи зарранинг максимал эффектив ўртача квадратик кесими,  $u_1$  ва  $u_2$  - тўқнашувчи зарралар тезликларининг ёруғлик тезлигига нисбати.

Жумладан, охирги ифодадан ультрарелятивистик зарралар учун, яъни  $b \rightarrow 0$  да қуйидагини оламиз:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \sqrt{\frac{4}{3}} \quad (25)$$

Биобарин, охирги формула тўқнашувчи ультра РИГ зарралари эффектив ўртача квадратик кесимининг чегаравий қиймати ўрнатади.

Диссертациянинг “**Квант идеал газларнинг релятивистик инвариант чекли-ҳароратли назарияси**” учинчи бобида квант идеал газларнинг релятивистик инвариант чекли-ҳароратли назарияси тақдим этилган. Бунда Максвелл-Больцман РИГ нинг муқобил назарияси квант статистикага бўйсинувчи РИГ лар учун умумлаштирилган ва квант РИГ ни тавсифловчи барча макроскопик катталиклар – газ зарраларининг импульслар бўйича инвариант ТФ асосида ўрталаштириш усули воситасида биринчи марта келтириб чиқарилган.

Шуни алоҳида таъкидлаймизки, КРИГ илк бор Юттнер томонидан ишлаб чиқилган бўлиб, у ўз назариясини квант идеал газ учун эркин энергия ифодасига асослаган.

Дастлаб КРИГ зарралари сонининг ўртача зичлиги учун қуйидаги ифода олинган:

$$n = \frac{4\pi g}{h^3} (mc)^3 \frac{1}{b} \left[ k_2(b) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \frac{k_2[(n+1)b]}{n+1} \right], \quad b = \frac{mc^2}{\kappa T} \quad (26)$$

Охирги ифода КРИГ зарралари сонининг ўртача зичлигини – иссиқлик энергияси  $\kappa T$  ва зарранинг тинчликдаги энергияси  $mc^2$  га нисбатининг ҳар қандай қийматида топиш имкон беради. Бу ерда:  $\varepsilon = -1, 0, +1$  – мос равишда Ферми-Дирак, Максвелл – Больцман ва Бозе – Эйнштейн тақсимотларига мос келади.

Ультрарелятивистик соҳада, яъни  $b \ll 1$  ёки  $b \rightarrow 0$  массаси нолга тенг зарралар учун қуйидаги ифодаларни оламиз:

$$n_{\phi Д} = 4\pi g_{-1} \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot 2 \cdot \frac{3}{4} \xi(3), \quad n_{МБ} = 4\pi g_0 \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot 2, \\ n_{БЭ} = 4\pi g_1 \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot 2 \xi(3) \quad (27)$$

Аксинча норелятивистик соҳада (ёки образли тарзда айтганда ўта оғир зарралар учун), яъни  $b \gg 1$  бўлганда

$$n_{\phi Д} = 4\pi g_{-1} \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b}, \quad n_{МБ} = 4\pi g_0 \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b} \\ n_{БЭ} = 4\pi g_1 \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b} \quad (28)$$

(28) ифодадан кўриниб турибдики, Максвелл-Больцман, Ферми-Дирак ва Бозе-Эйнштейн статистикаларида зарралар сонининг ўртача зичлиги  $\sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b}$  га пропорционал бўлиб, у образли қилиб айтганда оғир норелятивистик зарралар ҳиссасининг экспоненциал “камлигини” кўрсатади. Демак, КРИГ зарралар сонининг ўртача зичлигига энг катта ҳиссани массасиз зарралар кўшар экан.

Бундан ташқари, квант релятивистик идеал газнинг ўртача энергия зичлиги учун қуйидаги ифода олинган:

$$\rho = 4\pi g \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot (\kappa T) b^4 \times \\ \times \left\{ \frac{k_2(b)}{b} + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \cdot \frac{k_1[(n+1)b]}{(n+1)b} + 3 \cdot \frac{k_2(b)}{b^2} + 3 \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \cdot \frac{k_2[(n+1)b]}{(n+1)^2 b^2} \right\}. \quad (29)$$

Бу ифода газ зарралари қайси статистикага бўйсунушидан қатъий назар ўринлидир.

Ультрарелятивистик соҳада ўртача энергия зичлиги қуйидагича топилади ( $b \ll 1$  ёки  $b \rightarrow 0$ ):

$$\rho_{\text{МБ}} \equiv 6g_0 A, \quad \rho_{\text{ФД}} = 6g_{-1} A \cdot \frac{7}{8} \xi(4), \quad \rho_{\text{БЭ}} = 6g_1 A \cdot \xi(4), \quad (30)$$

$$A = 4\pi \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot (\kappa T) \quad (31)$$

$b \gg 1$  бўлганда Максвелл – Больцман, Ферми – Дирак ва Бозе-Эйнштейн  $\frac{3}{2} \rightarrow \frac{5}{2}$  статистикаларида зарраларнинг ўртача энергия зичлиги  $\sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b}$  га пропорционал бўлиб, у оғир норелятивистик зарралар ҳиссасининг экспоненциал “камлигини” кўрсатади.

Боб охирида КРИГ ҳолат тенгламалари келтириб чиқарилган.

КРИГ учун ишлаб чиқилган релятивистик назариянинг тадбиқи сифатида биз политропик юлдузлар, яъни "айниган" ультрарелятивистик квант газлардан ташкил топган юлдузларучун мувозанат шартларини кўриб чиқамиз. Юлдузларнинг барқарорлиги шартига кўра, агар юлдуз тузилган газнинг адиабатик кўрсаткичи  $\gamma \leq 4/3$  бўлса, у барқарорлигини йўқотади. У фақатгина  $\gamma > 4/3$  шарт бажарилгандагина барқарор бўлади [Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Теория тяготения и эволюция звезд. - М.: Наука, 1971. - С. 235].

Барча КРИГ лар учун адиабата кўрсаткичлари  $(\gamma = 1 + \frac{k}{c_v}, c_v = \frac{dU}{dT},$

$U = \frac{\rho}{n})$  ни топиб,  $b \rightarrow 0$  да қуйидагини оламиз:

$$\gamma_{\text{БЭ}} = 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{\xi(3)}{\xi(4)} \approx 1,37; \quad \gamma_{\text{МБ}} = \frac{4}{3}; \quad \gamma_{\text{ФД}} = 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{6\xi(3)}{7\xi(4)} \approx 1,3173 \quad (32)$$

бунда  $\xi(x)$  - Риман зета функцияси.

Шундай қилиб, биз политропик юлдуз фақат ва фақат "айниган" квант ультрарелятивистик Бозе – Эйнштейн газидан иборат бўлгандагина барқарор бўлади деган фундаментал хулосага келамиз.

Диссертациянинг “**Бозе-Эйнштейн конденсатидаги солитонларнинг критик сони**” номли тўртинчи бобида Бозе-Эйнштейн конденсацияси (БЭК) шароитида солитонларнинг шаклланиш шартлари тадқиқ этилган ва ҳосил бўлиши мумкин бўлган солитонларнинг энг кичик критик сони аниқланган.

Боб охирида солитонларнинг БЭК ҳосил қилувчи атомлар орасидаги ўзаро таъсир потенциалининг тасодифийлиги оқибатида рўй берувчи стохастик параметрик резонанси ҳодисаси ўрганилган. Бунда солитонлар кенглигининг стохастик таъсир остида тез тебранишлар билан содир бўлувчи секин ўсиши кузатилади ва у қуйидаги қонуниятга бўйсунди:

$$Dx(\tau) = \langle x^2(\tau) \rangle - \langle x(\tau) \rangle^2 = \frac{c^2}{2} \left\{ (e^{\sigma^2 \omega_0^2 \tau} - 1) + \cos(2\omega_0 \tau) \left[ 1 - e^{-\frac{\sigma^2 \omega_0^2 \tau}{2}} \right] \right\} \quad (33)$$

Диссертациянинг “**Номагнит наноструктурали диэлектрикларда Фарадей эффектнинг резонанс-диссипатив назарияси**” бешинчи бобида номагнит диэлектрикларда Фарадей эффектнинг резонанс-диссипатив назарияси ишлаб чиқилган, шунингдек кўп қатламли наноструктураларда магнито оптикавий эффектларни кучайтириш шартлари топилган.

Хусусан, электромагнит майдон циклик частотаси электронларнинг хусусий тебранишлари циклик частотасига тенг бўлганда Фарадей бурилиш бурчагининг модули қуйидаги ифода билан аниқланиши кўрсатилган (7-расмга қаранг):

$$|\varphi(d)| = \frac{Ne^2 d}{2\varepsilon_0 c} \cdot \frac{eB}{b^2 + e^2 B^2}. \quad (34)$$

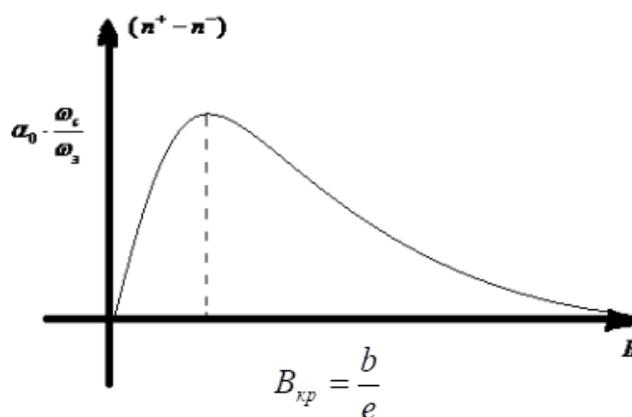
Охириги ифодадан келиб чиқадики, Фарадей бурилиш бурчагининг модули ташқи магнит майдон индукциясининг қуйидаги критик деб аталувчи қийматида максимум қийматга эга бўлади:

$$B_{кр} = \frac{b}{e}. \quad (35)$$

Фарадей бурилиш бурчагининг модулининг максимал қиймати эса қуйидагига тенг:

$$|\varphi_{макс}| = \frac{Ne^2 d}{4\varepsilon_0 bc}. \quad (36)$$

Бобнинг охирида кўп қатламли наноструктураларда магнитооптикавий эффектларни кучайтириш шартлари топилган.



**7-расм. Ўнг ва чап қутбланган электромагнит тўлқинлар синдириш кўрсаткичлари фарқининг ташқи магнит майдон индукциясига боғлиқлиги**

Диссертациянинг “Тасодифий модуляцияланган бошланғич тўлқиний импульсларнинг интегралланувчи ва деярли интегралланувчи тизимлардаги эволюциясини таҳлил қилиш усули” олтинчи бобида тасодифий модуляцияланган бошланғич тўлқиний импульсларнинг интегралланувчи тизимлардаги эволюциясини таҳлил қилиш усули тақдим этилган.

Илк бор тасодифий манбалар ҳосил қилувчи солитонлар параметрларининг тақсимот функцияси ТФ топилган бўлиб, у қуйидаги кўринишга эга:

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( 1 - \frac{1}{2} \gamma y \left( 1 - \frac{1}{3} y^2 \right) \right) \exp \left( -\frac{y^2}{2} \right), y = \frac{\Delta - k_1}{\sqrt{k_2}}, \gamma = \frac{k_3}{k_2^2}. \quad (37)$$

бунда  $k_1, k_2$  ва  $k_3$ —биринчи, иккинчи ва учинчи тартибли кумулянтлар бўлиб, улар тўлқиний жараёни тавсифловчи ночизиғий эволюцион тенглама ва бошланғич импульсларнинг тасодифий вариациялари билан аниқланади.

Ушбу ТФ дан фойдаланиб, тасодифий катталиқ унинг ихтиёрий тартибли моментлари учун қуйидаги муҳим рекуррент муносабат топилган:

$$M_{2k} = \langle y^{2k} \rangle = (2k - 1)!!, \quad M_{2k+1} = \langle y^{2k+1} \rangle = \frac{\gamma}{3} k(2k + 1)!!, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (38)$$

Шунингдек, биз дастлабки тасодифий модуляцияланган импульслардан ҳосил бўлувчи солитонлар параметрларининг қуйидаги статистик тавсифларини ҳам топа оламиз:

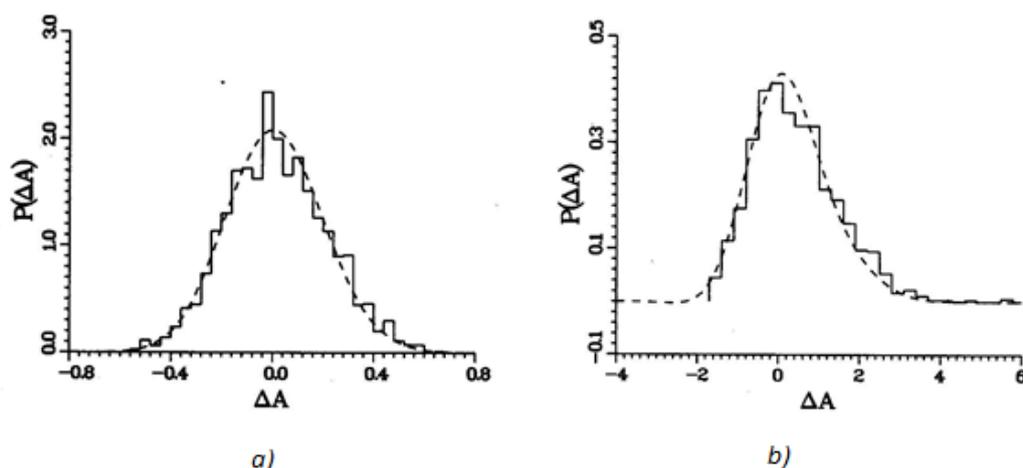
$$\Delta_{mp} = k_1 - \left( \frac{k_3}{2k_2} \right) \quad (a) \quad \langle \Delta \rangle = k_1 \quad (b) \quad \langle \Delta \rangle - \Delta_{mp} = \frac{k_3}{2k_2} \quad (c) \quad (39)$$

бунда а) энг катта эҳтимолиятли тузатма, б) ўртача тузатма, с) ўртача ва энг катта эҳтимолиятли тузатмалар фарқи.

Таъкидлаш жоизки, бу формулалар асимметрия коэффициенти унинг фақат кичик қийматлари учунгина ўринлидир.

8-расмда бевосита сонли моделлаштириш асосида олинган  $P(\Delta)$  ТФ келтирилган бўлиб, у назарий ҳисоблашларни жуда яхши аниқлик билан тасдиқлайди.

Сўнгра бошланғич тасодифий модуляцияланган акусто-плазмон солитонларнинг (АПС) кўп қатламли гибрид металл-ферромагнит структуралардаги эволюцияси таҳлил этилган, шунингдек тасодифий генерацияланган бошланғич АПСларнинг кучсиз дисперсияланувчи наноўлчамли актив тизимларда автосолитон ҳолатга ўтиш динамикаси тадқиқ этилган.



**8-расм. Тақсимот функцияси  $P(\Delta A)$  (а-  $\sigma=0,1$  и б -  $\sigma=0,5$ ). Гистограмма – сонли моделлаштириш натижалари, узук чизиқ-назарий ҳисоблаш**

Амплитуданинг ТФси эволюциянинг охири босқичида дельтасимон, яъни  $P_{st}(A) = \delta(A - A_{st})$  кўринишга эга бўлиши кўрсатилган. Бу ерда  $A_{st} = \frac{5\varepsilon_0}{4\gamma}$  – солитоннинг барқарорлашган амплитудаси бўлиб, у диссипация ва қуйи частотали кучайиш оқибатида юзага келади ( $\varepsilon_0, \gamma > 0$ ). Амплитуда ТФнинг барқарорлашуви тизимда автотўлқинли ҳолат мавжудлиги билан боғлиқ бўлиб, барча солитонсимон тасодифий тўлқинлар шу ҳолатга интилади (9-расмга қаранг).

**“Тасодифий модуляцияланган ночизиғий наноўлчамли гетероструктуралардаги Шрёдингер плазмон-солитонлари”** еттинчи боби тасодифий модуляцияланган Шрёдингер плазмон солитонлари (ШПС)нинг ночизиқли наноўлчамли гетероструктуралардаги эволюцияси таҳлиliga бағишланган.

ШПС нинг тарқалиши қуйидаги ночизиғий Шрёдингер тенгламаси

$$iu_t + \frac{1}{2}u_{xx} + |u|^2u = 0 \quad (40)$$

билан тавсифланувчи ҳол учун тасодифий амплитудавий ва фазавий модуляцияларнинг корреляцияси тадқиқ этилган.

Бошланғич импульс бир солитонли ечимдан кичик фарқ қилиб, қуйидаги кўринишга эга деб фараз қиламиз:

$$u(t = 0, x) = u_5[1 + \varepsilon_1(x)]\exp[i\varepsilon_2(x)] \quad (41)$$

бунда  $\varepsilon_1(x)$  и  $\varepsilon_2(x)$ –мос равишда дастлабки импульс амплитудасининг ва фазасининг тасодифий модуляцияларини тавсифлайди.

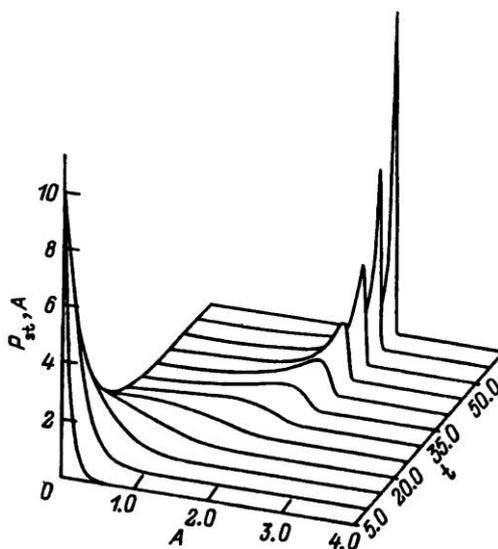
Тасодифий модуляцияланган Шрёдингер плазмон солитонлари эволюциясининг таҳлили кўрсатдики, агар амплитудавий флуктуациялар  $\sigma_A^2 < 1$  бўлса, асимметрия коэффициентининг нол қиймати  $\gamma=0$  га мос келувчи

фазавий флуктуацияларнинг критик интенсивлиги мавжуд бўлиб, у қуйидагича аниқланади:

$$\sigma_{\phi,кр}^2 = \ln \frac{\sqrt{1+3\sigma_A^2}}{2-\sqrt{1+3\sigma_A^2}}, \quad (42)$$

Бошқача айтганда, бу шартни тасодифий модуляцияланган импульслардан ҳосил бўлувчи ШПС нинг ночизиғий магнито оптикавий тизимлардаги шаклланишини бошқаришнинг оптимал режими сифатида қараш мумкин.

Кейин эса нано ўлчамли гетероструктураларда нормал дисперсия частоталар соҳасида тарқалувчи ШПСнинг бошланғич импульсаддитив ва регуляр импульслардан таркиб топган ҳолдаги эволюцияси тадқиқ этилган. Шунингдек, ШПСнинг актив ночизиғий магнито оптикавий тизимларда тарқалиши юқори тартибли ночизиғийлик, диссипация ва дисперсия инобатга олинган ҳолда тадқиқ этилди.



9-расм. Автосолидон ҳолатнинг қарор топиши

Ўтказилган таҳлил шу хулосага олиб келдики, қаралаётган ҳолда бошланғич тасодифий электромагнит импульслардан - тезлиги ва амплитудаси бир хил, фазалари эса тасодифий тақсимланган ШПС автосолидон кетма – кетлиги ҳосил бўлади. Таъкидлаш жоизки, ШПСнинг барқарорлашган амплитудаси  $A_{st} = \frac{3\gamma_0}{4\gamma}$  муносабат билан аниқланиб, у қуйи частотали кучайтириш ва юқори частотали диссипациянинг ўзаро баланси оқибатидир ( $\gamma_0, \gamma > 0$ ).

## ХУЛОСА

“Конденсирланган ва наноўлчамли тизимлардаги флуктуациявий ва параметрик ходисалар” мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Магнит оқим квантларининг релятивистик Броун ҳаракати назарияси ва Броун флаксонлари релятивистик идеал газ назарияси илк бор яратилди. Флаксонларнинг тезлик тақсимот функцияси Гаусс тақсимоми бўлмай у флуктуациявий токчи Жозефсон ўтишларининг нотривиал вольт-ампер тавсифига эга бўлишга олиб келади.
2. Максвелл-Больцман релятивистик идеал газининг муқобил назарияси таклиф этилди, жумладан, релятивистик идеал газ зарраларининг ўртача ва ўртача квадратик тезликлари формулалари топилди ва улар релятивистик идеал газ зарралари тезликларининг тавсифий четланишларини топиш имкониятини беради.
3. Квант идеал газларнинг чекли ҳароратли релятивистик инвариант назарияси ишлаб чиқилди, хусусан, квант идеал газларнинг ультра релятивистик чегарадаги адиабата кўрсаткичлари топилди. Улар асосида политроп юлдуз фақат “айниган” квант ультра релятивистик квант Бозе-Эйнштейн газидан иборат бўлсагина турғун бўла олиши ҳақидаги фундаментал хулоса олинди.
4. Бозе-Эйнштейн конденсациясида конденсацияланувчи зарраларнинг энг кичик сони топилди.
5. Номагнит диэлектриклардаги Фарадей эффектнинг резонанс диссипатив назарияси ишлаб чиқилди ва у кўп қатламли нано структураларда магнитооптикавий эффектларни кучайтириш шартларини топишга имкон берди.
6. Тасодифий модуляцияланган бошланғич тўлқиний импульсларнинг интегралланувчи ва деярли интегралланувчи тизимлардаги эволюциясини таҳлил қилиш усули таклиф этилди.
7. Флуктуациявий манбалар ҳосил қилувчи солитонлар параметрларининг тақсимот функцияси топилди, шунингдек, тасодифий импульслар ҳосил қилувчи Шредингер плазмон солитонларини оптимал бошқариш шarti топилди.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**  

---

**БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**ЖУМАЕВ МУСТАКИМ РОФИЕВИЧ**

**ФЛУКТУАЦИОННЫЕ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ  
В КОНДЕНСИРОВАННЫХ И НАНОРАЗМЕРНЫХ СИСТЕМАХ**

**01.04.07 – Физика конденсированного состояния**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации доктора (DSc) физико-математических наук

**Ташкент–2021**

**Тема диссертации доктора (DSc) физико-математических наук зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № В2020.3.DSc/FM165.**

Диссертация выполнена в Бухарском инженерно-технологическом институте.

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

**Официальные оппоненты:**

**Камилов Ибрагимхан Камилович**

Доктор физико-математических наук, профессор,  
член-корреспондент Российской академии наук

**Нуритдинов Иззатилло**

доктор физико-математических наук, профессор

**Явидов Бахрам Янгибаевич**

доктор физико-математических наук

**Ведущая организация:**

**Башкирский государственный университет  
(Уфа, Россия)**

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: 100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики; тел.: (+99871) 289-31-41, факс (+99871) 289-36-65, e-mail: [info@inp.uz](mailto:info@inp.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (зарегистрирована за № \_\_\_\_\_). (Адрес: 100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ; тел.: (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2021г.  
(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 докторской диссертации (DSc))

**Актуальность и востребованность темы исследований.** В настоящее время одной из важных проблем прикладной высокотемпературной сверхпроводимости является теоретическое обоснование и практическая разработка, так называемых, джозефсоновских генераторов или детекторов терагерцового диапазона, работающих при температурах жидкого азота или более высоких температурах. Но решение указанной проблемы наталкивается на ряд существенных трудностей. Во-первых, не до конца понята статистическая природа токовых флуктуаций в высокотемпературных сверхпроводниках. Во-вторых, флуктуационные (как нормальные, так и сверхпроводящие) токи играют критическую роль в подобных системах, а именно, ими определяется величина частотного уширения электромагнитного излучения, генерируемого джозефсоновскими вихрями. К последним относятся, в частности, и флаксоны, т.е. кванты магнитного потока.

За последние двадцать лет резко вырос интерес к релятивистскому броуновскому движению и проблемам релятивистской статистической физики. Естественно это обусловлено решением ряда фундаментальных проблем релятивистской физики плазмы (управляемый термоядерный синтез), релятивистской кинетической теории, а также, сверхнеравновесной релятивистской термодинамики в субатомных системах, в которых отношения тепловой энергии к энергии покоя частиц могут меняться от нуля до бесконечности. Но для таких ультрарелятивистских частиц не существует теории, которая позволила бы определить эффективные сечения сталкивающихся частиц при сверхвысоких температурах.

В Республике Узбекистан большое внимание уделяется развитию сверхпроводникового материаловедения. Основной задачей проектирования одномерных многослойных наноструктур для различных магнитооптических применений является использование усиления эффекта Фарадея и интенсивности света, распространяющегося через эти системы. Следует также иметь в виду условия образования конденсации Бозе-Эйнштейна, когда отношение максимальной энергии квантовых состояний к тепловой энергии является конечной величиной. Изучение флуктуационных и параметрических явлений в конденсированных и наноразмерных системах очень актуально и важно для понимания проблем современной физики конденсированного состояния. Основные направления фундаментальных исследований и разработок, важных для успешного развития науки в нашей стране, и их практическое применение отражены в Стратегии<sup>1</sup> дальнейшего развития Республики Узбекистан на 2017-2021 годы.

Данная диссертационная работа в определенной степени служит решению задач, предусмотренных в Указе Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

Республики Узбекистан», в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-2772 от 13 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017-2021 гг.» и № ПП-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности», а также в других нормативно-правовых документах принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования с приоритетными направлениями развития науки и технологий республики.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике П. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

**Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации<sup>1</sup>.** Исследования по различным аспектам флуктуационных и параметрических явлений в конденсированных и наноразмерных системах проводятся в ведущих мировых научно-исследовательских центрах, в том числе, Австралийском центре нелинейной физики (Австралийский национальный университет), в отделе физической электроники Тель-Авивского университета (Израиль), Дебаевском институте науки наноматериалов (Утрехтский университет, Голландия), Башкирском государственном университете (Уфа, Россия), Московском государственном университете (Москва, Россия), Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Москва, Россия), Институте им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН (Махачкала, Россия), Институте ядерной физики и Физико-техническом институте АН Республики Узбекистан, а также в Национальном университете Узбекистана и Туринском политехническом институте (Ташкент, Узбекистан).

На основе мировых теоретических и экспериментальных исследований флуктуирующих и параметрических явлений в нелинейных наносистемах был получен ряд важных научных результатов, в том числе: исследованы характеристики электромагнитных излучений в джозефсоновских линиях передачи, связанных с движущимися в них квантами магнитного потока (при слабых флуктуациях внешнего тока и при малых скоростях) (Датский технический университет, Копенгаген); обнаружено усиление магнитооптических эффектов в многослойных гетероструктурах (Московский государственный университет, Россия); показана возможность управления дисперсией диэлектрической проницаемости под действием внешнего магнитного поля (Московский институт физики и технологии, Россия); исследованы волновые процессы в бинарном конденсате Бозе-Эйнштейна (Институт физики Дагестанского научного центра, Россия); стохастическая и

---

<sup>1</sup> Обзор зарубежной научной литературы по теме диссертации: <https://sciencedirect.com>, <https://istina.msu.ru>, <https://aip.scitation.org>, <https://osapublishing.org>, <https://elsevier.com> и на основе других источников.

параметрическая неустойчивость солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна (Физико-технический институт АН РУз, Национальный университет Узбекистана).

В настоящее время во многих странах мира ведутся широкомасштабные исследования по ряду приоритетных направлений, в том числе: нелинейной магнитооптики, сверхбыстрой спиновой электроники, а также физики сверхнизких температур и конденсации Бозе-Эйнштейна, формирования и распространения солитонов (акусто-плазмонных солитонов и поверхностных солитонов Шредингера) в нелинейно-дисперсионных наномасштабных гетероструктурах.

**Степень изученности проблемы.** Исследованиями флуктуационных и параметрических явлений в конденсированных и наноразмерных системах занимаются многие ученые ведущих научных центров мира, например, российские (В.И. Белотелов, Т.В. Михайлова, А.К. Звездин, В.В. Курин, А.С. Чиркин, А.И. Маймистов), израильские (Б.А. Маломед и др.), австралийские (Ю.С. Кившарь и др.), германские (А.В. Устинов, П. Ханги, Ж. Данкл, Р. Тауц), итальянские (М. Салерно и др.), английские (Ж.М. Элджин, Ж.П. Гордон), американские (С.А. Дарманян, Р. Хахим), узбекистанские (Ф.Х. Абдуллаев, А.А. Абдумаликов и др.).

В настоящее время достаточно подробно исследованы как экспериментально, так и теоретически флуктуационные и параметрические явления в конденсированных и наноразмерных системах. Благодаря этим исследованиям разработаны методы получения наноразмерных многослойных гетероструктур, а также, методы возбуждения и усиления нелинейных волн в этих системах (В.И. Белотелов, Т.В. Михайлова, А.К. Звездин). Результаты этих исследований нашли свое отражение в разработке управления электро- и магнитооптических свойств различных гибридных структур. Большое значение имели исследования, посвященные свойствам электромагнитных излучений в джозефсоновских линиях передачи, производимые флаксонами под действием случайного внешнего тока и различных диссипаций (Б.А. Маломед, Ю.С. Кившарь, А.В. Устинов, М. Салерно, В.В. Курин). Они позволили определить формы спектральных линий излучения флаксонных волн, а также влияние флуктуации на уширение частот электромагнитных излучений. Исследованы также начальные этапы эволюции случайно модулированных волновых полей, описываемых интегрируемыми нелинейными эволюционными уравнениями (Ж.М. Элджин, Ж.П. Гордон, А.С. Чиркин, А.И. Маймистов, Ф.Х. Абдуллаев, С.А. Дарманян, А.А. Абдумаликов). Исследованы свойства нелинейных волн в случайных и неупорядоченных средах (Е.Н. Пелиновский, Л. Васкес).

Заслуживают особого интереса работы, в которых развиваются теория релятивистского броуновского движения и теория релятивистского идеального газа (П. Ханги, Ж. Данкл, Р. Зигадло, Р. Хахим, Ф. Деббач, Р. Тауц). Благодаря результатам этих исследований удалось понять некоторые особенности поведения релятивистского броуновского движения и релятивистского идеального газа.

В то же время остается неясным решение некоторых проблем, а именно: существенное расхождение теории и эксперимента на порядок и более при определении характеристик частоты электромагнитного излучения, генерируемого флаксоном под действием конечных флуктуаций шумового внешнего тока. Так, в работе [If F., Christiansen P.L. et.al. Simulation studies of radiation linewidth in circular Josephson junction fluxon oscillators // Phys.rev. B, v.32, N.3, p. 1512 – 1518, (1985)] авторы не смогли объяснить причины этих расхождений; неоднозначность функции распределения скорости частицы, совершающей одномерное релятивистское броуновское движение, требует необходимости решения абсурдно-знаменитой трилеммы Ито, Стратоновича и Климонтовича-Хангги [A. Mukhopadhyay et.al. Theory of relativistic Brownian motion in the presence of electromagnetic field in (1+1) dimension// AIP Conference Proceedings, 1942, 110016 (2018)]; продолжающиеся «модификации» распределения Ютнера и работы в этом направлении [Cubero D., et.al. Thermal equilibrium and statistical thermometers in special relativity // Phys. Rev. Let. 99, 170601 (2007)]; определение условий осуществления Бозе-Эйнштейновской конденсации (БЭК) при конечных значениях отношения; нахождение наименьшего числа конденсируемых частиц при Бозе-Эйнштейновской конденсации; разработка резонансно-диссипативной теории эффекта Фарадея в немагнитных диэлектриках и определение условий усиления магнитооптических эффектов в многослойных наноразмерных системах; развитие метода анализа эволюции случайно модулированных начальных волновых импульсов в интегрируемых и почти интегрируемых системах, а также, определение функции распределения параметров солитонов генерируемых шумовыми источниками.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских работ Бухарского инженерно-технологического института по темам: ЁФ2-1 «Исследование магнитооптических свойств и фазовых переходов в ферритах граната с учётом ориентационных взаимодействий» (2016-2017); № 21-98 «Условия образования и свойства солитонных структур в нелинейных системах с переменными параметрами» (1998-1999); ОТ-Ф2-64 «Флуктуационные и параметрические явления в конденсированных и наноразмерных системах» (2017-2020), а также международных грантов CRDF ZM1-342 и ZM2-2095; INTAS 96-339.

**Целью исследования** является объяснение макроскопических свойств и их изменений для физических систем, находящихся под воздействием флуктуационных и параметрических сил, на основе нахождения функции распределения параметров, определяющих характер и природу их поведения.

**Задачи исследования:**

развить теории релятивистского броуновского движения квантов магнитного потока и релятивистского идеального газа броуновских флаксонов;

разработать альтернативную теорию релятивистского идеального газа (РИГ) Максвелла-Больцмана на основе релятивистской функции распределений скоростей частиц;

построить релятивистски инвариантную конечно-температурную теорию квантовых идеальных газов на основе релятивистской функции распределения импульсов частиц;

найти наименьшее число солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна;

разработать резонансно – диссипативную модель эффекта Фарадея в немагнитных диэлектриках;

предложить метод анализа эволюции случайно модулированных начальных волновых импульсов в интегрируемых и почти интегрируемых системах;

определить функцию распределения параметров солитонов, генерируемых шумовыми источниками в нелинейно-дисперсионных наноструктурах.

**Объектами исследования** являются неквантовый и квантовый релятивистский идеальный газ, конденсат Бозе-Эйнштейна, а также многослойные наноразмерные гетероструктуры.

**Предметом исследования** являются релятивистское броуновское движение квазичастиц и обычных частиц, характерные скорости частиц релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана, давление, плотность средней энергии и уравнения состояния неквантового и квантового релятивистского идеального газа, функция распределения параметров солитонов, образующихся из случайно модулированных начальных волновых импульсов.

**Методы исследования.** Используются методы теории случайных процессов; теория возмущений для солитонов; метод обратной задачи рассеяния; кумулянтный анализ; метод преобразования функции распределения; метод нахождения макроскопических величин, характеризующих релятивистские идеальные газы усреднением по функции распределения скоростей или импульсов частиц; методы численного моделирования; методы теоретической и статистической физики.

**Научная новизна исследований** заключается в следующем:

впервые получено уравнение для функции распределения импульсов релятивистских квантов магнитного потока (флаксонов), позволяющее определить временную зависимость функций распределения для анализа переходных процессов в различных физических системах с флуктуирующими параметрами;

впервые показано на основе релятивистской функции распределения скоростей частиц, что характерные скорости частиц релятивистского идеального газа не превышают скорость света и тем самым решена проблема Макса Планка;

впервые методом усреднения по релятивистской функции распределения импульсов частиц найдены макроскопические характеристики квантовых релятивистских идеальных газов;

найден наименьшее критическое число солитонов, формирующихся в конденсате Бозе-Эйнштейна на основе вариационного подхода;

развита теория стохастического параметрического резонанса солитонов, которые возникают в результате флуктуационного взаимодействия атомов в конденсате Бозе-Эйнштейна;

предложен метод анализа эволюции нелинейных волн, несущих шумовую составляющую, на основе метода обратной задачи рассеяния и кумулянтного анализа;

определена функция распределения параметров формирующихся из стохастических начальных условий солитонов, возбуждаемых частично когерентными сверхкороткими лазерными источниками излучения.

**Практические результаты исследований** состоят в следующем:

найден асимметричная и симметричная функция распределения скорости флаксонов;

впервые доказана ограниченность дисперсии частоты электромагнитного излучения, производимого флаксонами;

получено флуктуационно-диссипативное соотношение для одномерного релятивистского броуновского движения обычной частицы;

получены формулы для средней и среднеквадратичной скорости частиц, а также, уравнение состояния релятивистских идеальных газов;

выведены выражения для средней плотности числа частиц, плотности средней энергии и давления квантовых релятивистских идеальных газов, а также, вычислены показатели адиабат квантовых идеальных газов в ультрарелятивистском пределе;

найден нетривиальное резонансное управление и усиление магнитооптических эффектов в немагнитных диэлектриках под действием внешнего магнитного поля.

**Достоверность результатов исследований** обеспечивается использованием комплекса современных методов теоретической и статистической физики, методов теории уравнений Эйнштейна-Фоккера, согласием аналитических расчетов с результатами численного моделирования, а также, непротиворечивостью полученных результатов общефизическим представлениям и имеющимся литературным данным.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость представленных в диссертационной работе результатов заключается в том, что они уточняют и конкретизируют ряд важных аспектов теории релятивистского броуновского движения квазичастиц и обычных частиц, а также, теории неквантового и квантового релятивистского идеального газа.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что найденные функции распределения для параметров солитонов, генерируемых случайно модулированными начальными волновыми импульсами, могут найти важное применение при исследовании распространения акусто-плазмонных солитонов и плазмон-солитонов Шрёдингера в мультислойных структурах, возбуждаемых частично

когерентными сверхкороткими лазерными источниками излучения. В частности, они могут найти важное применение при разработке джозефсоновских генераторов и детекторов, созданных на основе высокотемпературных сверхпроводников, работающих в терагерцовом диапазоне частот электромагнитных излучений.

**Внедрения результатов исследования.** На основе полученных научных результатов по исследованию флуктуационных и параметрических явлений в конденсированных и наноразмерных системах:

полученное уравнение для функции распределения импульсов релятивистских квантов магнитного потока (флаксонов) (аналог уравнения Фоккера-Планка) было использовано при исследовании подобного этому уравнения Ландау - Халатникова в рамках научного проекта «Исследование фундаментальных термодинамических и релаксационных процессов при фазовых превращениях в перспективных магнитокалорических материалах» (письмо Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук №446 от 27.10.2020). Использование научных результатов позволило найти функции распределения скоростей квазичастиц в исследуемых системах;

результаты по решению фундаментальной проблемы Планка на основе релятивистской функции распределения скоростей частиц, а также метод усреднения по релятивистской функции распределения импульсов частиц для нахождения макроскопических характеристик квантовых идеальных газов используются в учебном процессе в рамках программы бакалавриата по курсу теоретической физики и программы магистратуры по специальным курсам «Избранные главы теоретической физики» и «Физика конденсированного состояния» (письмо Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан №446 от 18.01.2021). Использование результатов позволило расширить представления студентов о проблемах современной физики конденсированного состояния;

найденное критическое число солитонов в Бозе-Эйнштейновском конденсате использовалось при исследовании динамики солитонов в бинарном конденсате Бозе-Эйнштейна в случае разных масс атомов и потенциалов ловушки в рамках научно-исследовательского проекта по теме: «Развитие квантово-полевых методов и солитоны, фазовые переходы и критические явления, поиск принципиально новых эффектов геометрии и топологии в фермион-бозонных системах, метаматериалах, графеноподобных структурах и в спинорных конденсатах Бозе-Эйнштейна» (письмо Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук №17200-913 от 27.10.2020). Использование результатов позволило определить наименьшее число конденсируемых атомов в конденсате Бозе – Эйнштейна для формирования солитона Гросса – Питаевского;

развитая теория стохастического параметрического резонанса солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна была использована в рамках испанского проекта по поддержке исследования нелинейных проблем (письмо Мадридского Университета от 03.11.2020). Использование научных

результатов позволило найти средние значения искомым параметров солитонов;

предложенный метод анализа эволюции нелинейных волн, несущих шумовую составляющую, и определенная функция распределения параметров солитонов, эволюционирующих из стохастических начальных условий были использованы для проведения исследований распространения оптических солитонов в нелинейных волоконных линиях связи (письмо Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» от 29.10.2020), а также зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах *Physical Review*, E, 78, 031120 (2008); *Physical Review*, E, 79, 051128 (2009); *Physical Review*, E, 81, 011141 (2010); *Journal of Modern Physics B*, 10, 1142 (1991); *Physical Review*, A, 63, 053603 (2001); *Journal of the Physical Society of Japan*, 65, 3426 (1996); *Physical Review*, E, 58, 4166 (1998); *Journal of Statistical Physics*, 10, 1023 (2001); *Physical Review*, E, 54, 6313 (1996); *Progress of Theoretical Physics*, 10, 1088 (2009); *Physical Review*, E, 71, 056205 (2005); *Physical Review*, E, 71, 056205 (2005); *Physica D*, 113, 115 (1998); *Chaos, Solitons and Fractals*, 39, 1645 (2009); *Computational mathematics and theoretical physics*, 10, 1134 (2013)). Использование научных результатов позволило определить функцию распределения параметров оптических солитонов, генерируемых шумовыми источниками, когда распространение солитонов описывается нелинейным уравнением Шрёдингера

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных и республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследований.** По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, 1 монография, 10 научных статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 6 в зарубежных научных журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 230 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулирована цель задачи, выявлены объекты и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологии Республики Узбекистан, изложена научная новизна исследования, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов, представлены сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе “Теория релятивистского броуновского движения квантов магнитного потока” впервые представлена теория релятивистского броуновского движения квантов магнитного потока, а также теория необычного газа - релятивистского идеального газа броуновских флаксонов.

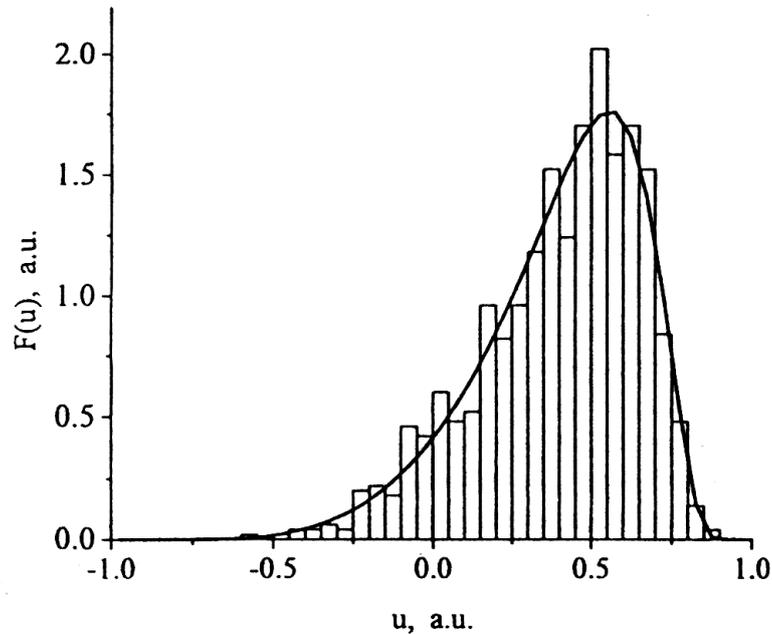
В начале найдена асимметричная функция распределения скорости флаксонов (см. рис.1)

$$\phi(u) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} \cdot \frac{1}{(1-u^2)^{\frac{3}{2}}} \exp \left[ -a \left( \frac{u}{\sqrt{1-u^2}} - b \right)^2 \right], \quad a = \frac{\alpha}{2D}, \quad b = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\gamma_0}{\alpha}. \quad (1)$$

где  $u$  - скорость флаксона нормированная на предельную скорость в рассматриваемой системе – на скорость Свихарта,  $\alpha$  - коэффициент диссипации,  $\gamma_0$  - постоянная составляющая внешнего тока нормированная на максимальный критический ток Джозефсона,  $D$  - относительная интенсивность токовых флуктуаций.

Эта функция распределения скорости флаксонов не является гауссовой и приводит к нетривиальной вольтамперной характеристике джозефсоновского перехода с шумовым током.

$\Delta u$  меняется немонотонным образом при возрастании  $b$ , т.е. при увеличении постоянного нормированного тока  $\gamma_0$  и имеет максимум при  $b=0.5$  или когда  $\gamma_0 = \frac{2\alpha}{\pi}$ . Значение  $\Delta u_m$  прямо пропорционально относительной интенсивности токовых флуктуаций  $D$  и обратно пропорционально коэффициенту диссипации  $\alpha$  (см. рис.2).



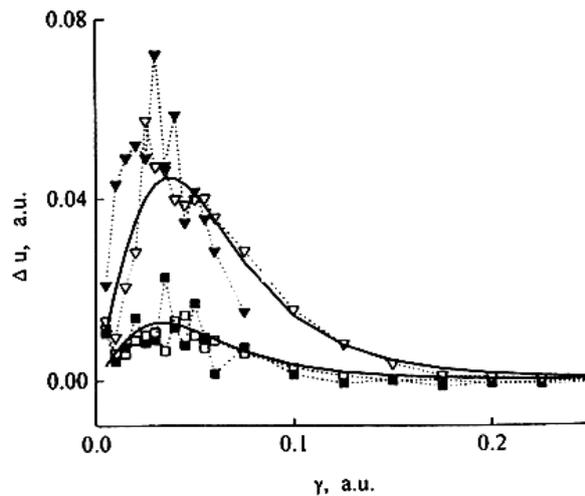
Кривая – теория, гистограмма – численный расчёт

**Рис. 1. Асимметричная функция распределения скорости**

$$\Delta u = u_d - \langle u \rangle = \frac{3}{4a} \cdot \frac{b}{(1+b^2)^{\frac{5}{2}}}, \quad \Delta u_m = \frac{24\sqrt{5}}{125} \cdot \frac{D}{\alpha} \quad (2)$$

Далее получена симметричная релятивистская функция распределения скорости (РФРС) флаксонов под действием чисто случайного тока и диссипации, которая имеет следующий вид (см.рис.3):

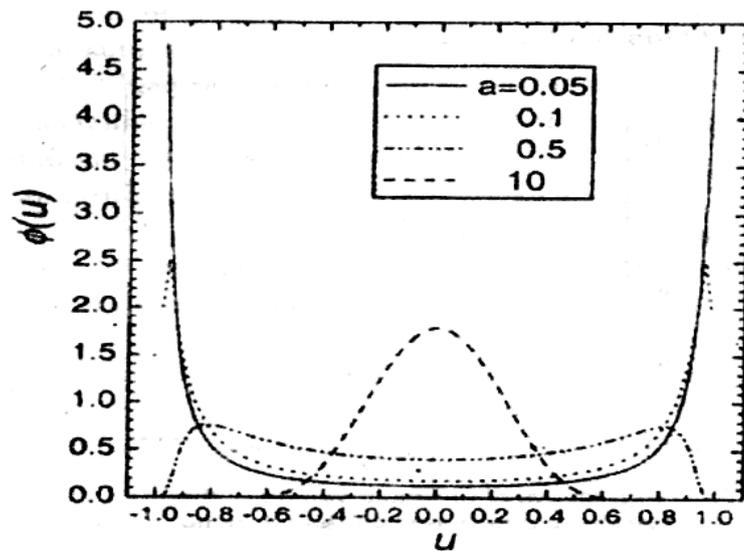
$$\Phi(u) = \sqrt{\frac{a}{\pi}} (1-u^2)^{\frac{3}{2}} \exp[-au^2(1-u^2)^{-1}] \quad (3)$$



**Рис. 2. Зависимость разности напряжений от значений постоянного тока. Сплошные линии - теория, тёмные и светлые значки - численный расчёт ( $\sigma$  :  $\square$  – 0,1;  $\nabla$  – 0,05)**

Анализ РФРС флаксонов показывает, что существует область параметров диссипации и интенсивностей флуктуаций тока, при которых график РФРС флаксонов становится двугорбым и имеет максимум при

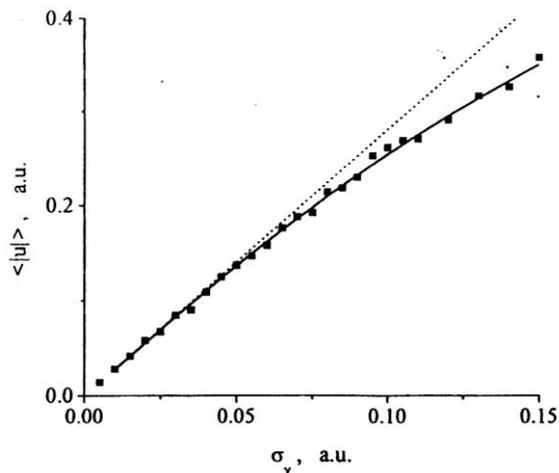
$$u = \pm \sqrt{1 - \frac{2a}{3}}. \quad (4)$$



**Рис. 3. Релятивистская функция распределения скорости броуновских флаксонов**

Такое невероятное поведение релятивистской функции распределения скорости – неочевидно, поскольку импульс является однозначной, монотонной функцией скорости. Следовательно, эту особенность ФР заранее предвидеть было невозможно. Это есть последствия нелинейного преобразования функции распределения. Затем на основе этой необычной функции распределения вычислена средняя квадрата скорости флаксонов, которая является нелинейной функцией интенсивности токовых флуктуаций (см.рис. 4).

$$\langle |u| \rangle = [1 - \operatorname{erf}(\sqrt{a})] \exp a, \quad \langle |u|^2 \rangle = 1 - \sqrt{a\pi} \langle |u| \rangle. \quad (5)$$



**Рис. 4. Зависимость среднеарифметической скорости флаксона от относительных флуктуаций тока  $\sigma$ . ■- численный расчёт; сплошная кривая - формула (5), пунктир - результат нерелятивистской теории**

Эти формулы в точности совпадают с результатами теории нерелятивистского броуновского движения, которые справедливы только при выполнении следующих условий:

$$\langle |u|^2 \rangle \approx \frac{1}{2a} \ll 1, \quad a = \frac{\alpha}{2D} = \frac{E_0}{2kT} \gg 1, \quad E_0 = \frac{I_c \Phi_0}{2\pi}. \quad (6)$$

где  $E_0$  – энергия покоя флаксона,  $I_c$  – максимальный критический ток Джозефсона,  $kT$  – тепловая энергия,  $T$  – эффективная температура системы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\Phi_0$  – квант магнитного потока

В ультрарелятивистском пределе, что соответствует очень малым значениям параметра  $a$  ( $a \ll 1$ ), мы получаем

$$\langle |u| \rangle \approx 1 - 2\sqrt{\frac{a}{\pi}}, \quad \langle |u|^2 \rangle \approx 1 - 2a \quad (a \ll 1). \quad (7)$$

Следовательно, найденное нами выражение (5) для среднеквадратичной скорости можно рассматривать релятивистским обобщением соотношения Эйнштейна для броуновского движения частицеподобной релятивистской квазичастицы – квантов магнитного потока.

В конце главы найдены выражения плотности средней энергии  $\rho$ , давления  $P$  и получено уравнение состояния релятивистского идеального газа флаксонов.

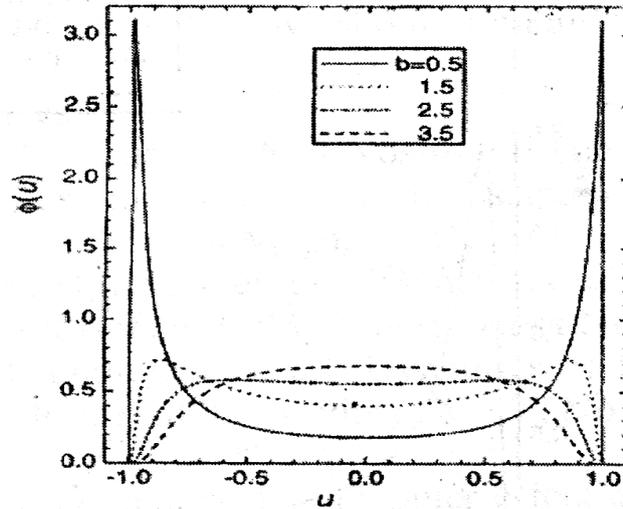
Во второй главе “Альтернативная теория релятивистского идеального газа Максвелла – Больцмана” представлены теория одномерного релятивистского броуновского движения обычных частиц, теория одномерного релятивистского идеального газа, а также альтернативная теория релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана.

Сначала найдена функция распределения скорости  $F(u)$  обычных частиц, которые совершают одномерное релятивистское броуновское движение

$$F(u) = \frac{1}{2k_1(b)} (1-u^2)^{-\frac{3}{2}} \exp\left[-b(1-u^2)^{-\frac{1}{2}}\right]. \quad b = \frac{mc^2}{kT} \quad (8)$$

Как следует из этого выражения свойства функции распределения скорости  $F(u)$  и ее статистические характеристики определяются параметром  $b$ , равному отношению энергии покоя частицы  $E_0 = mc^2$  к характерной флуктуационной энергии  $E_{\phi} = \frac{D}{\alpha}$  (напомним, что здесь  $D$  – интенсивность случайных сил действующих на частицу,  $\alpha$  – коэффициент диссипации). Далее получена функция распределения нормированной скорости частиц одномерного релятивистского идеального газа в следующем виде (см.рис.5):

$$\Phi(u) = \tilde{A}(1-u^2)^{-\frac{3}{2}} \exp\left[-b(1-u^2)^{-\frac{1}{2}}\right], \quad \tilde{A} = \frac{1}{2k_1(b)}, \quad u = \frac{g_x}{c}. \quad (9)$$



**Рис. 5. Функция распределения скорости частиц одномерного релятивистского идеального газа**

Следовательно, найденная функция распределения нормированной скорости частиц одномерного релятивистского идеального газа  $\Phi(u)$  полностью аналогична функции распределения нормированной скорости  $F(u)$  релятивистской частицы совершающей одномерное броуновское движение.

Далее в этой главе разработана альтернативная теория релятивистского идеального газа Максвелла – Больцмана.

Сначала получена трехмерная функция распределения скорости частиц релятивистского идеального газа с помощью преобразования функции распределения Максвелла-Больцмана – для импульсов к скоростям частиц релятивистского идеального газа, воспользовавшись переходом от функции распределения импульсов частиц к функции распределения их скоростей

$$\int f(P_x, P_y, P_z) dP_x dP_y dP_z = \int \varphi(v_x, v_y, v_z) D |dv_x dv_y dv_z|. \quad (10)$$

где  $D$ – детерминант преобразования от импульсов  $P_x, P_y, P_z$  к скоростям  $v_x, v_y, v_z$  определяется следующим выражением:

$$D = m^3 \gamma^5 = m^3 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{5}{2}}. \quad (11)$$

Отметим, что найденный детерминант преобразования  $D$  от импульсов к скоростям сохраняет силу при произвольной функции распределения импульсов частиц релятивистского идеального газа.

Теперь определим функцию распределения скорости частиц релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана, используя распределение Больцмана для импульсов частиц релятивистского идеального газа:

$$f(\vec{p}) = f(p_x, p_y, p_z) = B \exp\left[-\frac{\sqrt{E_0^2 + p^2 c^2}}{kT}\right]. \quad (12)$$

где  $E_0 = mc^2$  – энергия покоя частиц газа,  $kT$  – тепловая энергия,  $B$  – постоянная, которая определяется, как всегда, условием нормировки функции распределения.

Далее найдена приведенная функция распределения модулей нормированных скоростей частиц релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана, которую можно записать в следующем компактном виде:

$$\Phi(u) = \frac{b}{k_2(b)} u^2 (1-u^2)^{\frac{5}{2}} \exp\left[-b(1-u^2)^{\frac{1}{2}}\right]. \quad (13)$$

Отметим, что в нерелятивистском пределе – энергия теплового движения  $kT$  намного меньше чем энергия покоя частиц  $mc^2$ , т.е. параметр  $b = \frac{mc^2}{kT} \gg 1$  и скорости частиц пренебрежимо малы по сравнению со скоростью света т.е.  $\frac{v}{c} \ll 1$ , из функции распределения  $\Phi(u)$  следует

$$F_M(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left[-\frac{mv^2}{2kT}\right]. \quad (14)$$

Это и есть распределение Максвелла – основа нерелятивистской кинетической теории и статистической физики.

Таким образом, найденная нами функция распределения скорости частиц релятивистского идеального газа в нерелятивистском пределе переходит в знаменитое распределение Максвелла, сыгравшее фундаментальную роль для построения нерелятивистской кинетической теории идеального газа.

В следующем разделе впервые найдены формулы для средней и среднеквадратичной скоростей частиц релятивистского идеального газа, которые имеют вид:

$$\langle u \rangle = \frac{2e^{-b}}{k_2(b)} \left(\frac{1+b}{b^2}\right), \quad u_{кв} = \sqrt{\langle u^2 \rangle} = \sqrt{1 - \frac{k_1(b) - k_{i_1}(b)}{k_2(b)} b} \quad (15)$$

Найденные выражения среднего модуля и среднего квадрата модуля нормированной скорости частиц (15) позволяют нам определить еще одну

важнейшую характеристику релятивистского распределения - среднеквадратичную флуктуацию скорости частиц газа

$$Dv = \langle v^2 \rangle - \langle v \rangle^2 = c^2 [\langle u^2 \rangle - \langle u \rangle^2] = c^2 Du, \quad (16)$$

которая описывает характерный разброс скоростей частиц релятивистского идеального газа.

При  $b \gg 1$  получаем следующие формулы для среднего квадрата скорости, а также, для средней скорости:

$$\langle v^2 \rangle \approx c^2 \cdot \frac{3}{b} \left( 1 - \frac{45}{(8b)^2} \right) \approx \frac{3kT}{m}, \quad \langle v \rangle \approx c \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{b}} \approx \sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot \frac{kT}{m} \quad (17)$$

Это результаты вытекают также из максвелловского распределения скоростей.

При малых значениях параметра т.е.  $b \ll 1$  (или  $b \rightarrow 0$ ), получаем следующие результаты

$$\langle u \rangle = 1 - b^2, \quad \langle u^2 \rangle \approx 1 - \frac{1}{2} b^2. \quad (18)$$

Следовательно, в ультрарелятивистском пределе средняя и среднеквадратичная скорости частиц релятивистского идеального газа стремятся к скорости света – предельной скорости в природе.

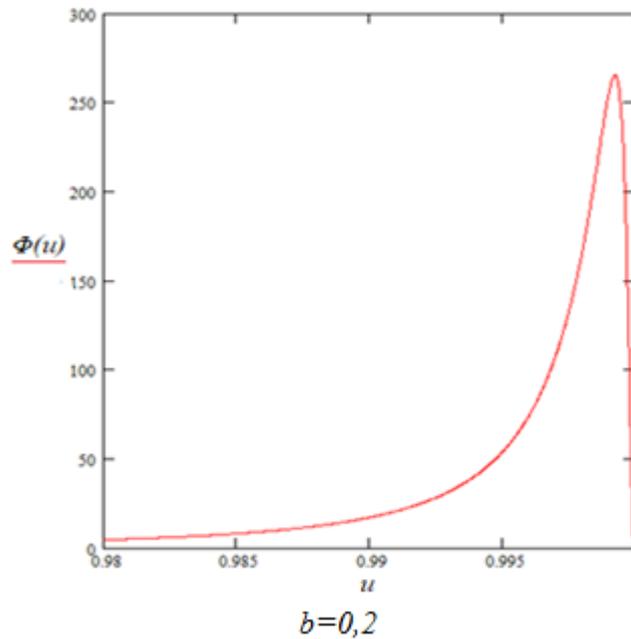
Здесь также впервые доказано переходом к безмассовому пределу, что приведенная функция распределения модулей нормированных скоростей частиц релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана будет дельтаобразной (рис.6).

Таким образом, характерные скорости частиц релятивистского идеального газа (РИГ) не превышают предельную скорость в природе – скорость света. Кроме того, учитывая недостижимость абсолютного нуля температуры, доказанную Нернстом, приходим к заключению, что только безмассовые частицы при любой температуре имеют характерную скорость равную скорости света. Безусловно, эти выводы имеют важное концептуальное значение, так как, доказывают справедливость постулатов специальной теории относительности и в релятивистской статистической физике.

Иначе говоря, «световые» или безмассовые частицы РИГ имеют одинаковую по модулю скорость равную скорости света, а направления их скоростей совершенно равновероятны, т.е. распределены изотропно.

В тоже время максвелловское распределение скоростей (14) в безмассовом пределе «вырождается» и будет равняться нулю при любой отличной от нуля температуре. Это вполне естественно, так как, согласно нерелятивистской физике, не могут существовать частицы с равной нулю

массой покоя, т.е. такая вероятность равна нулю – которую и показывает максвелловское распределение скоростей.



**Рис. 6. Функция распределения модулей нормированных скоростей частиц релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана ( $b=0,2$ )**

В конце главы приведен оригинальный вывод уравнения состояния релятивистского идеального газа на основе статистического усреднения макроскопических характеристик РИГ по функции распределения скоростей их частиц.

Исходным основанием развиваемой нами ниже теории является следующие релятивистски-инвариантные выражения, определяющие плотность средней энергии и давления идеального газа релятивистских частиц:

$$\rho = nE_0 \left\langle \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\rangle, \quad (A) \quad P = \frac{nE_0}{3} \left\langle \frac{\frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\rangle, \quad (B) \quad (19)$$

где  $n$  – плотность числа частиц газа,  $E_0$  – энергия покоя частицы газа, а скобки означают усреднения по функции распределения скорости частиц релятивистского идеального газа.

Используя выражения (19, А) и (19, В), а также функцию распределения скоростей частиц РИГ получено следующее уравнение состояния релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана, связывающее его давление, плотность средней энергии и температуру

$$\rho - 3P = nmc^2 \frac{k_1(b)}{k_2(b)}, \quad b = \frac{mc^2}{\kappa T}. \quad (20)$$

Здесь плотность средней энергии  $\rho$  релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана определяется следующим выражением

$$\rho = nmc^2 \left[ \frac{k_1(b)}{k_2(b)} + \frac{3}{b} \right], \quad b = \frac{mc^2}{kT}, \quad (21)$$

и давление релятивистского идеального газа

$$P = nkT. \quad (22)$$

Используя выражение для плотности средней энергии  $\rho$  релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана получаем, в частности, следующую формулу для определения средней кинетической энергии одной частицы (или атома) РИГ

$$\frac{\langle E_k \rangle}{kT} = b \cdot \left[ \frac{k_1(b)}{k_2(b)} + \frac{3}{b} - 1 \right]. \quad (23)$$

Последняя формула дает нетривиальную возможность определения энергия покоя частицы на основе измерения средней кинетической энергии и температуры системы.

В качестве приложения развитой альтернативной теории РИГ найдено среднеквадратичное эффективное сечение сталкивающихся частиц ультра РИГ, которое определяется следующей формулой

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \sqrt{\langle u_1^2 \rangle + \langle u_2^2 \rangle - \langle u_1^2 \rangle \langle u_2^2 \rangle \frac{2}{3}}. \quad (24)$$

где  $\sigma_{\max}$  - максимальное эффективное сечение сталкивающихся частиц при столкновении с неподвижной частицей,  $u_1$  и  $u_2$  - скорости сталкивающихся частиц нормированные на скорость света. В частности, из последней формулы для ультра релятивистских частиц, т.е. при  $b \rightarrow 0$  получаем

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\max}} = \sqrt{\frac{4}{3}} \quad (25)$$

Следовательно, последняя формула определяет предельное среднеквадратичное эффективное сечение сталкивающихся частиц ультра-РИГ.

В третьей главе **“Инвариантная конечно – температурная релятивистская теория квантового идеального газа”** представлена инвариантная конечно-температурная релятивистская теория квантовых газов. В ней альтернативная теория РИГ МБ обобщена для РИГ подчиняющихся квантовой статистике и все макроскопические величины

описывающие квантовые РИГ (КРИГ) впервые получены на основе усреднения по инвариантной функции распределения импульсов частиц газа.

Особо подчеркиваем, что теория КРИГ впервые была разработана Ф. Ютнером, который основал свою теорию на выражении свободной энергии для квантовых идеальных газов.

В начале найдено следующее выражение для средней плотности числа частиц КРИГ:

$$n = \frac{4\pi g}{h^3} (mc)^3 \frac{1}{b} \left[ k_2(b) + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \frac{k_2[(n+1)b]}{n+1} \right], \quad b = \frac{mc^2}{kT} \quad (26)$$

Последнее выражение позволяет определить среднюю плотность числа частиц КРИГ при любом отношении тепловой энергии  $kT$  и энергии покоя частиц  $mc^2$ . Здесь  $\varepsilon = -1, 0, +1$  – соответственно для распределения Ферми-Дирака, Максвелла – Больцмана и Бозе – Эйнштейна.

В ультрарелятивистском пределе  $b \ll 1$  или  $b \rightarrow 0$  в случае безмассовых частиц получаем, что

$$\begin{aligned} n_{\text{ФД}} &= 4\pi g_{-1} \left( \frac{kT}{hc} \right)^3 \cdot 2 \cdot \frac{3}{4} \xi(3), & n_{\text{МБ}} &= 4\pi g_0 \left( \frac{kT}{hc} \right)^3 \cdot 2, \\ n_{\text{БЭ}} &= 4\pi g_1 \left( \frac{kT}{hc} \right)^3 \cdot 2 \xi(3) \end{aligned} \quad (27)$$

В обратном нерелятивистском пределе (или образно говоря для сверхтяжелых частиц), т.е.  $b \gg 1$ , имеем

$$\begin{aligned} n_{\text{ФД}} &= 4\pi g_{-1} \left( \frac{kT}{hc} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b}, & n_{\text{МБ}} &= 4\pi g_0 \left( \frac{kT}{hc} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b} \\ n_{\text{БЭ}} &= 4\pi g_1 \left( \frac{kT}{hc} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b} \end{aligned} \quad (28)$$

Как видно из выражений (28), средняя плотность числа частиц для статистик Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна пропорциональна следующему множителю  $\sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{3}{2}} e^{-b}$ , который показывает экспоненциальное «подавление» вкладов тяжелых нерелятивистских частиц в среднюю плотность числа частиц. Следовательно, наибольший вклад в среднюю плотность числа частиц КРИГ вносят безмассовые частицы.

Далее получено для плотностей средних энергий квантового релятивистского идеального газа следующее выражение

$$\rho = 4\pi g \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot (\kappa T) b^4 \times \left\{ \frac{k_2(b)}{b} + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \cdot \frac{k_1[(n+1)b]}{(n+1)b} + 3 \cdot \frac{k_2(b)}{b^2} + 3 \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \cdot \frac{k_2[(n+1)b]}{(n+1)^2 b^2} \right\}, \quad (29)$$

которое справедливо независимо от того, какой статистике подчиняются частицы этого газа.

В ультрарелятивистском пределе средняя плотность энергии определяется следующими выражениями ( $b \ll 1$  или  $b \rightarrow 0$ )

$$\rho_{MB} \equiv 6g_0 A, \quad \rho_{ФД} = 6g_{-1} A \cdot \frac{7}{8} \xi(4), \quad \rho_{БЭ} = 6g_1 A \cdot \xi(4), \quad (30)$$

$$A = 4\pi \left( \frac{\kappa T}{hc} \right)^3 \cdot (\kappa T) \quad (31)$$

Плотность средней энергии для статистик Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака и Бозе-Эйнштейна при  $mc^2 \gg \kappa T$  (или  $b \gg 1$ ) пропорциональны множителю  $\sqrt{\frac{\pi}{2}} b^{\frac{5}{2}} e^{-b}$ , который показывает экспоненциальную «малость» вкладов тяжелых нерелятивистских частиц в плотность средней энергии.

В конце главы получено уравнение состояния КРИГ.

В качестве приложения развитой теории КРИГ рассмотрим условия равновесия политропных звезд, т.е. звезд, состоящих из «вырожденных» ультрарелятивистских квантовых газов. Согласно условию устойчивости звезд, если показатель адиабаты газа  $\gamma$  – из которых состоит звезда,  $\gamma \leq 4/3$  – то она теряет устойчивость. Она будет равновесной только при условии, если  $\gamma > 4/3$  [Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Теория тяготения и эволюция звезд. - М.: Наука, 1971. -С. 235].

Далее находя показатели адиабат ( $\gamma = 1 + \frac{k}{c_v}$ ,  $c_v = \frac{dU}{dT}$ ,  $U = \frac{\rho}{n}$ ) для всех

КРИГ придем к выводу, что при  $b \rightarrow 0$ :

$$\gamma_{БЭ} = 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{\xi(3)}{\xi(4)} \approx 1,37; \quad \gamma_{MB} = \frac{4}{3}; \quad \gamma_{ФД} = 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{6\xi(3)}{7\xi(4)} \approx 1,3173 \quad (32)$$

где  $\xi(x)$  - дзета функция Римана.

Таким образом, мы приходим к фундаментальному заключению, что политропная звезда будет устойчивой только и только в том случае, если она состоит из «вырожденного» квантового ультрарелятивистского газа Бозе-Эйнштейна.

В четвертой главе **“Критическое число солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна”** изучено условие формирования солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна и найдена критическая плотность числа частиц при реализации Бозе-Эйнштейновской конденсации (БЭК).

В конце главы изучен стохастический параметрический резонанс солитонов в конденсате Бозе-Эйнштейна, который обусловлен случайностью потенциала взаимодействия атомов образующих БЭК. Показано, что под действием этого взаимодействия ширина солитона испытывает медленный рост флуктуаций, которые сопровождаются быстрыми колебаниями, согласно следующему закону:

$$Dx(\tau) = \langle x^2(\tau) \rangle - \langle x(\tau) \rangle^2 = \frac{c^2}{2} \left\{ (e^{\sigma^2 \omega_0^2 \tau} - 1) + \cos(2\omega_0 \tau) \left[ 1 - e^{-\frac{\sigma^2 \omega_0^2 \tau}{2}} \right] \right\} \quad (33)$$

В пятой главе **“Резонансно диссипативная теория эффекта Фарадея в немагнитных диэлектрических наноструктурах”** разработана резонансно-диссипативная теория эффекта Фарадея в немагнитных диэлектриках, а также найдено условие усиления магнитооптических эффектов в многослойных наноструктурах.

В частности, показано, что при частоте светового поля равной частоте собственных колебаний электронов модуль фарадеевского угла вращения будет определяться следующим образом (см. рис.7):

$$|\varphi(d)| = \frac{Ne^2 d}{2\varepsilon_0 c} \cdot \frac{eB}{b^2 + e^2 B^2}. \quad (34)$$

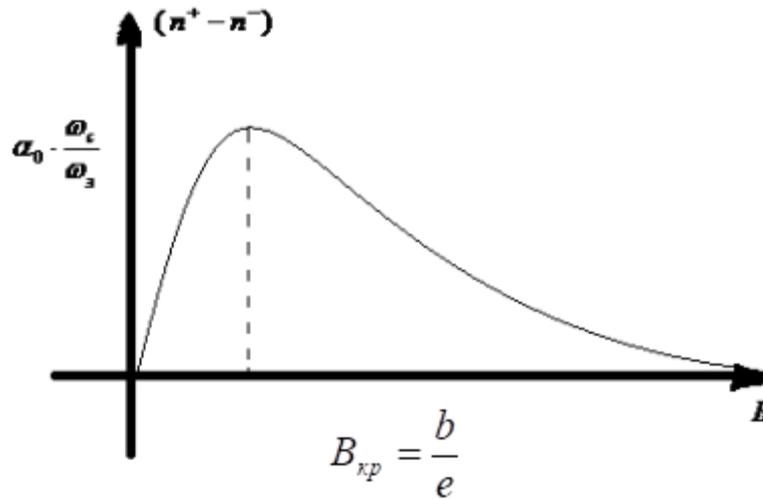
Из последнего выражения вытекает, что модуль фарадеевского угла вращения будет максимальным при значении индукции внешнего магнитного поля, который называем критическим:

$$B_{кр} = \frac{b}{e}. \quad (35)$$

Максимальное значение модуля фарадеевского угла вращения при этом будет равно

$$|\varphi_{макс}| = \frac{Ne^2 d}{4\varepsilon_0 bc}. \quad (36)$$

В конце главы найдено условие усиление магнитооптических эффектов в многослойных нано структурах.



**Рис. 7. Зависимость разности показателей преломления право и лево поляризованных электромагнитных волн от индукции магнитного поля**

В шестой главе “Метод анализа эволюции случайно модулированных начальных волновых импульсов в интегрируемых и почти интегрируемых системах” предложен метод анализа эволюции случайно модулированных начальных волновых импульсов в интегрируемых системах.

Нами впервые найдена ФР параметров солитонов, генерируемых случайным источником, которая имеет следующий вид

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( 1 - \frac{1}{2} \gamma y \left( 1 - \frac{1}{3} y^2 \right) \right) \exp \left( -\frac{y^2}{2} \right), \quad y = \frac{\Delta - k_1}{\sqrt{k_2}}, \quad \gamma = \frac{k_3}{k_2^2}. \quad (37)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  - кумулянты первого, второго и третьего порядка, которые определяются случайными вариациями начального импульса и видом нелинейного эволюционного уравнения рассматриваемого волнового процесса.

Используя ФР найдено рекуррентное соотношение для моментов произвольного порядка случайной величины  $y$ :

$$M_{2k} = \langle y^{2k} \rangle = (2k - 1)!!, \quad M_{2k+1} = \langle y^{2k+1} \rangle = \frac{\gamma}{3} k(2k + 1)!!, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (38)$$

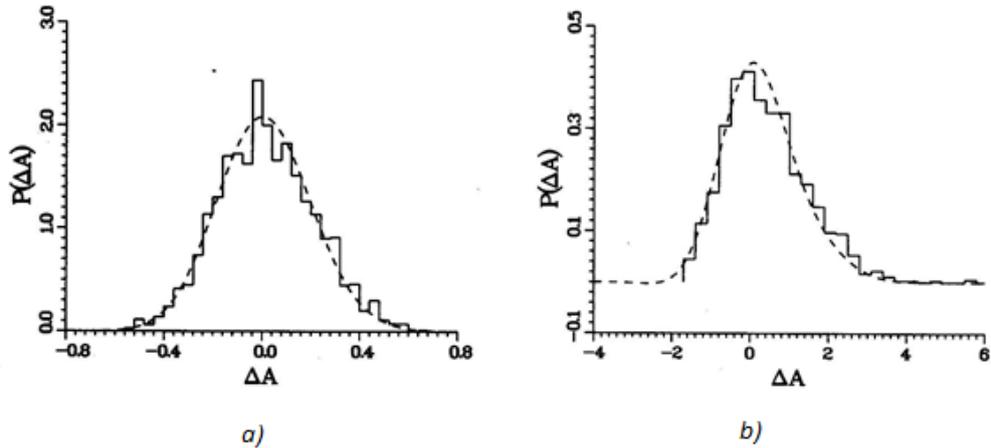
Мы можем найти следующие статистические характеристики поправок к параметрам образующихся солитонов из случайно модулированных исходных импульсов:

$$\Delta_{mp} = k_1 - \left( \frac{k_3}{2k_2} \right) \quad (a) \quad \langle \Delta \rangle = k_1 \quad (b) \quad \langle \Delta \rangle - \Delta_{mp} = \frac{k_3}{2k_2} \quad (c) \quad (39)$$

где а) наиболее вероятная поправка, б) средняя поправка, с) разность между средней и наиболее вероятной поправки. Отметим, что последние три

формулы применимы только при малых значениях коэффициента асимметрии  $\gamma$ .

На рисунке 8 приведены функции распределения  $P(\Delta A)$ , полученные посредством численного моделирования, которые с хорошей точностью подтверждают теоретический расчет.



**Рис. 8 Функция распределения  $P(\Delta A)$  (а-  $\sigma=0,1$  и б -  $\sigma=0,5$ ).  
Гистограмма – численный счет, пунктирная кривая - теоретический расчет**

Далее проанализирована эволюция случайно модулированных начальных акусто-плазмонных солитонов (АПС) в гибридных металло-ферромагнитных многослойных структурах, в рамках уравнения Кортевега-де Вриза. Исследована также динамика перехода случайно генерированных начальных АПС в автосолитонное состояние в активных слабо диспергирующих наноразмерных системах.

Показано, что ФР амплитуды в конечной стадии эволюции становится дельтаобразной, т.е.  $P_{st}(A) = \delta(A - A_{st})$ , где  $A_{st} = \frac{5\varepsilon_0}{4\gamma}$  – стационарная амплитуда солитона, обусловленная балансом диссипации и низкочастотной подкачки ( $\varepsilon_0, \gamma > 0$ ). С физической точки зрения установление стационарной ФР амплитуды обусловлено наличием в системе автоволнового состояния, к которому стремятся все солитонно-подобные шумовые волны (см. рис.9).

Седьмая глава “**Случайно модулированные плазмон-солитоны Шредингера в нелинейных наноразмерных гетероструктурах**” посвящена анализу эволюции случайно модулированных плазмон-солитонов Шредингера (ПСШ) в нелинейных наноразмерных гетероструктурах.

Исследована корреляция амплитудных и фазовых случайных модуляций, когда распространение ПСШ описывается НУШ следующего вида:

$$iu_t + \frac{1}{2}u_{xx} + |u|^2u = 0 \quad (40)$$

Предположим, что начальный импульс слабо отличается от односолитонного решения и имеет вид

$$u(t = 0, x) = u_s [1 + \varepsilon_1(x)] \exp[i\varepsilon_2(x)] \quad (41)$$

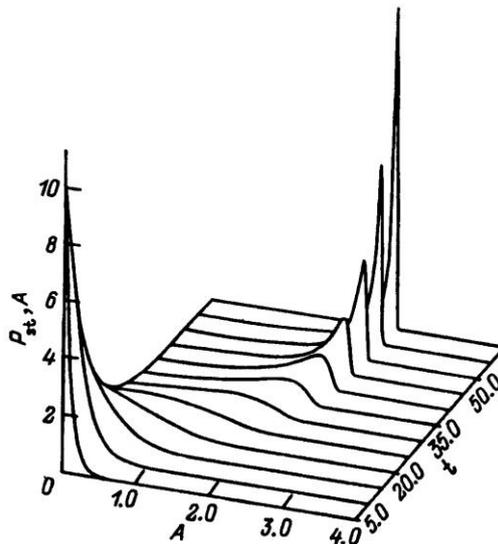
где  $\varepsilon_1(x)$  и  $\varepsilon_2(x)$  - выражают случайную модуляцию амплитуды и фазы исходного импульса.

Проведенный анализ эволюции случайно модулированных плазмон-солитонов Шредингера показал, что если интенсивность флуктуаций амплитуды  $\sigma_A^2 < 1$ , то существует критическая интенсивность фазовых флуктуаций

$$\sigma_{\phi,кр}^2 = \ln \frac{\sqrt{1+3\sigma_A^2}}{2-\sqrt{1+3\sigma_A^2}}, \quad (42)$$

которая приведет к нулевому значению коэффициента асимметрии  $\gamma=0$ . Иными словами это условие можно рассматривать как режим оптимального управления ПСШ, генерируемых случайно модулированными импульсами в нелинейных магнитооптических системах.

Затем изучена эволюция аддитивного шума и регулярного начального импульса в наноразмерных гетероструктурах в области нормальной дисперсии, а также, исследовано распространение ПСШ в активных нелинейно дисперсионных системах с учетом диссипации, дисперсии и нелинейностей высших порядков.



**Рис.9. Установление автосолитонного состояния**

Проведенный анализ привел к выводу, что в рассматриваемом случае из случайных начальных электромагнитных импульсов образуется последовательность ПСШ с одинаковыми амплитудами и скоростями, фазы которых распределены случайным образом. Отметим, что амплитуда ПСШ в этом случае имеет стационарное значение, определяемое соотношением  $A_{st} =$

$\frac{3\gamma_0}{4\gamma}$ , обусловленная балансом низкочастотной подкачки и высоко частотной диссипации ( $\gamma_0, \gamma > 0$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме докторской диссертации «Флуктуационные и параметрические явления в конденсированных и наноразмерных системах», сделаны следующие основные выводы:

1. Впервые разработана теория броуновского движения релятивистских квантов магнитного потока и теория релятивистского идеального газа броуновских флаксонов. Показано, что функция распределения скорости флаксонов не является гауссовой и приводит к нетривиальной вольтамперной характеристике джозефсоновского перехода с шумовым током.
2. Предложена альтернативная теория релятивистского идеального газа Максвелла-Больцмана, в частности, найдены формулы для средней и среднеквадратичной скоростей частиц релятивистского идеального газа, которые позволяют определить характерный разброс скоростей частиц релятивистского идеального газа.
3. Построена инвариантная конечно-температурная релятивистская теория квантовых идеальных газов, в том числе, определены показатели адиабат квантовых идеальных газов в ультрарелятивистском пределе. На их основе получено фундаментальное заключение, что политропная звезда будет устойчивой только в том случае, если она состоит из «вырожденного» квантового ультрарелятивистского газа Бозе-Эйнштейна.
4. Найдено наименьшее число конденсируемых частиц при Бозе-Эйнштейновской конденсации.
5. Разработана резонансно-диссипативная теория эффекта Фарадея в немагнитных диэлектриках, которая позволяет определить условие усиления магнитооптических эффектов в многослойных наноструктурах.
6. Предложен метод анализа эволюции случайно модулированных начальных волновых импульсов в интегрируемых и почти интегрируемых системах.
7. Найдена функция распределения параметров солитонов, генерируемых шумовыми источниками, в частности определено условие режима оптимального управления плазмон-солитонов Шредингера, генерируемых случайно модулированными импульсами.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ON AWARDING  
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**  

---

**BUKHARA ENGINEERING TECHNOLOGICAL INSTITUTE**

**MUSTAQIM JUMAEV**

**FLUCTUATIONAL AND PARAMETRIC  
PHENOMENA IN CONDENSED AND NANOSCOPIC SYSTEMS**

**01.04.07-Condensed matter physics**

**DISSERTATION ABSTRACT**  
**of the doctor of science (DSc) on physical and mathematical sciences**

**Tashkent - 2021**

**The topic of the dissertation of a doctor (DSc) in physical and mathematical sciences is registered with the Higher Attestation Commission under the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under the number B2020.3.DSc/FM165.**

The work was carried out at the Bukhara Engineering Technological Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, Russian, English (resume)) languages on the website of the Scientific Council at [www.inp.uz](http://www.inp.uz) and on the website of "Ziyonet" Information and Educational portal at [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Official opponents:**

**Kamilov Ibrahimkhan Kamilovich**

doctor of physical and mathematical sciences, professor,  
corresponding member RAS

**Nuriddinov Izzatillo**

doctor of physical and mathematical sciences, professor

**Yavidov Bahram Yangibaevich**

doctor of physical and mathematical sciences

**Lead organization:**

**Bashkir State University (Ufa, Russia)**

The defense of the thesis will take place "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2021 at \_\_\_ hours at a meeting of the Scientific Council DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: 100124, Tashkent, Ulugbek settlement, Institute of Nuclear Physics; tel.: (+99871) 289-31-41, fax (+99871) 289-36-65, e - mail : info @ inp . uz

The dissertation is available at the Information Resource Center of the Institute of Nuclear Physics (registered No. \_\_\_\_\_). (Address: 100124, Tashkent, Ulugbek settlement, INP; tel.: (+99871) 289-31-19).

The abstract of the dissertation was sent out "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2021.  
(Register of the mailing protocol No. \_\_\_ dated "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2021)

**M.Yu. Tashmetov**

Chairman of scientific council on award of scientific  
degree of doctor of sciences D.Ph.M.S., professor

**O.R. Tojiboev**

Scientific Secretary of scientific council on award  
of scientific degree of doctor of sciences, PhD. Ph.M.S.

**I. Nuriddinov**

Chairman of scientific seminar under scientific  
council on award of scientific degree  
of doctor of sciences, D.Ph.M.S., professor

## INTRODUCTION (doctoral dissertation abstract (DSc))

**The aim of the research** is to explain the macroscopic properties and their changes in physical systems under the influence of fluctuation and parametric forces-based on finding the distribution function of parameters that determine the character and nature of their behavior.

**The tasks of the research:**

to develop the theory of relativistic Brownian motion of magnetic flux quanta and the theory of relativistic ideal gas of Brownian fluxons;

to develop an alternative theory of the Maxwell-Boltzman relativistic ideal gas (RIG) based on the velocity distribution function;

to develop an invariant finite-temperature theory of relativistic quantum ideal gases based on the relativistic momentum function of particles;

find the smallest number of solitons in the Bose-Einstein condensate;

to propose a resonant-dissipative model of the Faraday effect in non-magnetic dielectrics;

to propose a method for analyzing the evolution of randomly modulated initial wave impulses in integrable and almost integrable systems;

to determine the distribution function of the parameters of solitons generated by noise sources in nonlinear dispersive nanostructures.

**The objects of research** are non-quantum and quantum relativistic ideal gas, Bose-Einstein condensate, as well as multilayer nanosized heterostructures.

**The subject of research** is the relativistic Brownian motion of quasiparticles and ordinary particles, the characteristic velocities of particles of the Maxwell-Boltzmann relativistic ideal gas, pressure, average energy density and equations of state of non-quantum and quantum relativistic ideal gas, the distribution function of the parameters of solitons formed from randomly modulated initial wave pulses.

**The scientific novelty of the research** is as follows:

for the first time, an equation for the momentum distribution function of relativistic magnetic flux quanta (fluxons) is obtained, which allows us to determine the time dependence of the distribution functions for the analysis of transients in various physical systems with fluctuating parameters;

for the first time it was shown on the basis of the relativistic distribution function of particle velocities that the characteristic velocities of particles of a relativistic ideal gas do not exceed the speed of light, and thus the Max Planck problem is solved;

macroscopic characteristics of quantum relativistic ideal gases are found for the first time by averaging over the relativistic particle momentum distribution function;

based on the variational approach the smallest critical number of solitons formed in the Bose-Einstein condensate is found;

the theory of stochastic parametric resonance of solitons, which arises as a result of the fluctuation interaction of atoms in the Bose-Einstein condensate is developed;

a method for analyzing the evolution of nonlinear waves carrying a noise component based on the inverse scattering problem and cumulative analysis is proposed;

the distribution function of the parameters of solitons formed from the stochastic initial conditions and excited by partially coherent ultrashort laser radiation sources is determined.

**Implementation of research results.** Based on the scientific results obtained on the study of fluctuation and parametric phenomena in condensed and nanoscale systems:

the obtained equations for the temporal change of the distribution function of the pulses of the relativistic quantum of the magnetic flux (fluxons) (analogue of the Fokker-Planck equation) were used in the framework of the scientific project "Investigation of fundamental thermodynamic and relaxation processes during phase transformations in promising magnetocaloric materials" (Letter from the Institute of Radio Engineering and Electronics. V.A.Kotelnikov of the Russian Academy of Sciences No. 446 dated 27.10.2020). The use of scientific results made it possible to find the distribution functions of the velocities of quasiparticles in the studied systems;

results on the solution of the fundamental Planck problem based on the relativistic distribution function of particle velocities, as well as the method of averaging over the relativistic distribution function of particle momenta to find the macroscopic characteristics of quantum ideal gases are successfully used by undergraduate students in teaching courses in theoretical physics, as well as undergraduates in teaching special courses "Selected chapters of theoretical physics" and "Physics of condensed matter" (letter from the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No.89-03-264 dated January 18, 2021). The use of the results allowed students to expand their understanding of the problems of modern physics of condensed matter;

the found the macroscopic properties of quantum ideal gases, the method of averaging the relativistic distribution function of particle moments was used as a bachelor's program in theoretical physics and as a master's program in special courses "Selected chapters of theoretical physics" and "Condensed matter Physics" (letter from the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan No.89-03-264 dated January 18, 2021). The use of the results allowed students to expand their understanding of the problems of modern physics of condensed matter;

the found critical number of solitons in the Bose-Einstein condensate was used in the framework of a research project on the topic: "Development of quantum field methods and solitons, phase transitions and critical phenomena, the search for fundamentally new effects of geometry and topology in fermion-boson systems, metamaterials, graphene-like structures and in Bose-Einstein spinor condensates (letter from the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences No. 17200-913 of 27.10.2020). Using the results, it was possible to determine the smallest number of condensed atoms in the Bose – Einstein condensate for the formation of the Gross-Pitaevsky soliton;

the developed theory of stochastic parametric resonance of solitons in a Bose-Einstein condensate was used in the framework of a Spanish project to support the study of nonlinear problems (Letter from the University of Madrid, 03.11.2020). The use of scientific results made it possible to find the average values of the sought parameters of solitons;

the proposed method for analyzing the evolution of nonlinear waves carrying a noise component and a certain distribution function of the parameters of solitons evolving from stochastic initial conditions were used to study the propagation of optical solitons in nonlinear fiber communication lines (Letter from the National Research Nuclear University "MEPhI" dated October 29, 2020) and were also used by foreign researchers (references in international scientific journals Physical Review, E, 78, 031120 (2008); Physical Review, E, 79, 051128 (2009); Physical Review, E, 81, 011141 (2010); Journal of Modern Physics B, 10, 1142 (1991); Physical Review, A, 63, 053603 (2001); Journal of the Physical Society of Japan, 65, 3426 (1996); Physical Review, E, 58, 4166 (1998); Journal of Statistical Physics, 10, 1023 (2001); Physical Review, E, 54, 6313 (1996); Progress of Theoretical Physics, 10, 1088 (2009); Physical Review, E, 71, 056205 (2005); Physical Review, E, 71, 056205 (2005); Physica D, 113, 115 (1998); Chaos, Solitons and Fractals, 39, 1645 (2009); Computational mathematics and theoretical physics, 10, 1134 (2013)). The use of scientific results made it possible to determine the distribution function of the parameters of solitons generated by noise sources, when the propagation of solitons was described by the Korteweg - de Vries equation, the sine Gordon equation and the nonlinear Schrödinger equation;

**Volume and structure of the dissertation.** The dissertation consists of an introduction, 7 chapters, conclusion, list of references. The volume of the dissertation is 230 pages.

**ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I бўлим (Часть I; Part I)**

1. Жумаев М.Р. Релятивистский идеальный газ и первичное космическое излучение. Монография. – Бухара: изд. ”Дурдона”, 2015. - 184 с.
2. Abdullaev F.Kh., Djumaev M.R. Evolution of random initial signals in nonlinear media described by nearly integrable systems // *Technical Physics*. – Springer, 1995. - N 40 (8). - pp. 749-753. (№ 11. Springer; IF = 0.563)
3. Abdullaev F.Kh., Darmanyan S.A., Djumaev M.R., Majid A.J., Sørensen M.P. Evolution of randomly perturbed Korteweg-de Vries solitons // *Physical Review E*. – American Physical Society (USA), 1995. – N 52 (4). - pp. 3577-3583. (№ 4. Journal Citation Reports; IF = 2.296)
4. Джумаев М.Р., Носирова Н.К. Флюксон как пример релятивистского осциллятора Дюффинга // *Узбекский физический журнал*. –Ташкент, 1999. - № 1 (6). - С. 445-448. (01.00.00. № 5).
5. Abdullaev F.Kh., Jumaev M.R., Tsoi É.N. Dynamics of fluxons in Josephson junctions under the noise current action // *Technical Physics*. - Springer, 2000. - N 45 (5). - pp. 566-570. (№ 11. Springer, IF = 0.563)
6. Джумаев М.Р., Носирова Н.К., Мукимов К.М. Нелинейное преобразование случайно модулированных оптических солитонов с большими радиусами корреляции// *Доклады Академии наук Республики Узбекистан*. – Ташкент, 2000. - № 10. - С. 14-16. (01.00.00. № 7).
7. Jumaev M.R. Nonlinear fluctuation mechanism for matter creation and reminds of the universe // *Scientific reports of Bukhara University*. – Bukhara, 2005. - No. 1. - pp. 66-76. (01.00.00. № 3)
8. Jumaev M.R., Sharipov M.Z., Mirzhonova N.N. Critical number of soliton in the Bose-Einstein condensate // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. -New York (USA), 2017. - Vol. 11, No. 3. - pp. 570-574. (№ 11. Springer, IF = 0.359)
9. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Миржонова Н.Н. Релятивистик идеал газ зарралари тезликларнинг тақсимот функцияси // *Бухоро давлат университети илмий ахбороти*. - Bukhara, 2020.-№1 (77).- С. 14-18. (01.00.00. № 3).
10. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Коледов В.В., Шавров В.Г. Частотная зависимость магнитооптических явлений в диэлектрических наноструктурах. // *Журнал радиоэлектроники*. - Москва, 2020. - № 1. - С. 1-8. (№ 1. Web of Science, IF = 0.423).
11. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Коледов В.В., Шавров В.Г. Ограниченность дисперсии частоты электромагнитного излучения, производимого флюксонами // *Журнал радиоэлектроники*. - Москва, 2020. - № 12. - С. 1-15. (№ 1. Web of Science, IF = 0.423).

## II бўлим (Часть II; Part II)

12. Abdullaev F.Kh., Darmanyan S.A., Djumaev M.R. Stochastic parametric resonance of solitons // *Physics Letters A*. – Elsevier, 1989. - N141 (8-9). - pp. 423-426.
13. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Резонансное усиление эффекта Фарадея в диэлектрических многослойных наноструктурах // *Вестник Челябинского государственного университета*. – Челябинск (Россия), 2015. - № 22 (377). Физика. Вып. 21. - С. 83-88.
14. Zhumaev M.R., Sharipov M.Z. Resonant dissipative model of the Faraday effect in a dielectric multilayer nanostructures // *Eurasian Physical Technical Journal*. - Karaganda (Kazakhstan), 2016. - Vol.13, № 2(26). - p. 30 – 38.
15. Abdullaev F.Kh., Darmanyan S.A., Djumaev M.R. Stochastic parametric resonance of solitons // “Solitons and Applications”: IV Int. Workshop, 24-26 August 1989, Dubna, Russia. – Singapore: World Scientific, 1990. - pp. 327-336.
16. Abdullaev F.Kh., Djumaev M.R. Evolution of Random Fields in the Integrable and a Nearly Integrable Systems // XI International Congress of Mathematical Physics, July 18-23, 1994. - Paris (France), 1994. - p. 16.
17. Жумаев М.Р., Носирова Н.К. Функция распределения скорости флюксона в длинном Джозефсоновском контакте с диссипацией и током смещения // «Международный научный семинар по магнетизму»: Тез. докл. 3-5 ноября 1997. - Бухара, 1997. - С. 20-21.
18. Djumaev M.R., Nosirova N.K., Abdumalikov A.A. Correlation of the amplitude and phase random modulations in nonlinear medium // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Nonlinearity and Disorder: Theory and Applications, II. Mathematics, Physics and chemistry*. – Kluwer Academic Publishers (Netherlands), 2001. -Vol. 45. - p. 55-60
19. Djumaev M.R. The Doppler effect and form of the profile of radiation spectral lines // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Nonlinearity and Disorder: Theory and Applications, II. Mathematics, Physics and chemistry*. - Kluwer Academic Publishers (Netherlands), 2001. -Vol. 45. - p. 411-414.
20. Djumaev M.R. Nontrivial possibility to define parameters of fluctuations // *NATO Advanced Research Workshop on vortex dynamics in high temperature superconductors*, May 17-22, 2002. – Tashkent (Uzbekistan), 2002. - p. 18.
21. Jumaev M. Theory of relativistic ideal gas for quasi and ordinary particles // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Non-Linear Dynamics and Fundamental international*, II. Mathematics, Physics and chemistry. – Springer (Netherlands), 2006. -Vol. 213. - p. 155-165.
22. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Резонансное усиление эффекта Фарадея в диэлектрических многослойных наноструктурах // «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах»: Тезисы докладов Международной конференции, 24-28 августа 2015. - Челябинск (Россия), 2015, - с. 139

23. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Гигантское усиление магнитооптического эффекта Фарадея при частотной зависимости показателя преломления и коэффициента поглощения // Магнитные фазовые переходы: Сб. тр. XI Межд. семинара, 19-21 ноября 2015. – Институт физики: Махачкала (Дагестан), 2015. - р. 128-131.
24. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Миржонова Н.Н. Критическое число солитонов Бозе-Эйнштейновской конденсации // L школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния: Сб. тезисов, 14-19 марта 2016.- Гатчина (Россия), 2016. – С.181.
25. Jumaev M.R., Sharipov M.Z. Resonant amplification the Faradey effect in multi-dimensional nano structures // The International Symposium “New Tendencies of Developing Fundamental and Applied Physics: Problems, Achievements and Prospects”, 10-11 November 2016. - Tashkent, Uzbekistan. 2016. - р. 345-347
26. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Спектральные особенности эффекта Фарадея в немагнитных диэлектрических наноструктурах // XVII Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, 15-22 ноября 2016. – Екатеринбург (Россия), 2016, - р. 89.
27. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Влияние токовых флуктуаций на излучательные характеристики высокотемпературных сверхпроводниковых джозефсоновских линий передачи // LI школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния: Сб. тезисов, 11-16 марта 2017.- Гатчина (Россия), 2017. – С.189.
28. Жумаев М.Р., Шарипов М.З. Изменение равновесной ориентации в магнетиках при ориентационных взаимодействиях // «Фазовые переходы, критические и нелинейные явления в конденсированных средах»: Сб. трудов межд. конф., 6-9 сентября 2017. - Махачкала (Россия), 2017. - С. 381-382.
29. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Миржонова Н.Н. Средняя плотность чисел частиц квантовых релятивистских идеальных газов // “Хаос и структуры в нелинейных системах”: Материалы 11-й межд. научн. конф. 22-23 ноября 2019. – Караганда (Казахстан), 2019. – С. 38-43.
30. Жумаев М.Р., Шарипов М.З., Ризокулов М.Н. Сверхбыстрое переключение спинов в резонансном режиме // LIV школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния: Сб. тезисов, 16-21 марта 2020.- Гатчина (Россия), 2020. – С.84.