

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.03/30.12.2019. FM.01.09 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

АБДУЛЛАЕВ БАХОДИР

КОНДЕНСАТ ҲОЛАТ ФИЗИКАСИДАГИ АНИОНЛАР

01.04.02- Назарий физика

Физика-математика фанлари бўйича доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2022

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

Contents of dissertation abstract of doctor of physical and mathematical sciences (DSc)

Оглавление автореферата диссертации доктора физико-математических наук (DSc)

Абдуллаев Баходир Конденсат холат физикасидаги анионлар.....	5
Abdullaev Bakhodir Anyons in the physics of condensed state.....	21
Абдуллаев Баходир Анионы в физике конденсированного состояния.....	35
Эълон қилинган ишлар рўйхати List of published works Список опубликованных работ.....	48

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ
ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.03/30.12.2019.
FM.01.09 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

АБДУЛЛАЕВ БАХОДИР

КОНДЕНСАТ ҲОЛАТ ФИЗИКАСИДАГИ АНИОНЛАР

01.04.02- Назарий физика

Физика-математика фанлари бўйича доктори (DSc) диссертацияси
АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2022

Физика-математика фанлари доктори (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2017.1.DSc/FM20 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Миллий Университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, инглиз, рус (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.nuu.uz) ва «Ziyounet» ахборот-таълим порталида (www.ziyounet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:

Мусаханов Мирзаюсуф Мирзамахмудович
Ўзбекистон ФА академиги, ф.-м. ф.д., профессор

Расмий оппонентлар:

Накамура Катсухиро
Фан доктори, профессор

Явидов Бахром Янгибаевич
физика-математика фанлари доктори, доцент,

Байзаков Бахтиер Байзакович
физика-математика фанлари доктори.

Етакчи ташилот:

Ядро физикаси институти Ўзбекистон ФА.

Диссертация ҳимояси Ўзбекистон Миллий Университети ҳузуридаги DSc.03/30.12.2019. FM.01.09 рақамли Илмий кенгашнинг 2022 йил 16 декабр соат 12:00 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Олмозор тумани, Университет кўчаси, 4 ўй. Тел. (+99871) 227-12-24; факс (+99871) 246-53-21; e-mail: nauka@nuu.uz).

Диссертация билан Ўзбекистон Миллий Университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). (Манзил: 100174, Тошкент шаҳри, Олмозор тумани, Университет кўчаси, 4 ўй. Тел. (+99871) 227-02-24).

Диссертация автореферати 2022 йил « 2 » декабр куни тарқатилди.
(2022 йил « 3 » декабрдаги 10 рақамли реестр баённомаси)



М. М. Мусаханов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, акад., ф.-м.ф.д., профессор

Б.А. Файзуллаев

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби ф.-м.ф.н., доцент

Б.Ж. Ахмедов

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

КИРИШ (докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Охирги бир неча ўн йилликдаги конденсат ҳолат физикаси бир неча қизиқарли ҳодисалар очилиши билан белгиланди. Булар Оғир Фермионлар Металлари (ОФМ), Касир Квант Холл Эффементи (ККХЭ) ва Юқори Температурали Ўтаутказғичлар (ЮТЎ) янги физика ҳодисалари дир.

2D системалар учун анионлар концепциясини кўллаш учун ноёб имконият мавжуд экан. Икки ўлчамли топологияси зарралар учун ихтирий статистикасига, бозонлар и фермионлар статистикалар билан бирга, эга бўлиш имкониятини яратиб берар экан ва шунинг учун зарралар 2Dда анионлар деб аталар экан. Анионлар 1D системаларда ҳам мовжуд бўлиши мумкин экан.

Одатда, кўп зарралар системаларни назарий изланишларида, зарралар статистикаси кўп зарралаи тўлқин функция симметрияси орқали киритилади. Система Гамильтониани эса статистика билан боғланган эмас. Шундай қилиб бозон статистикаси симметрик тўлқин функцияси орқали киритилади, Фермион статистикаси эса анти симметрик Слэтер детерминанти формасига эга бўлган тўлқин функцияси орқали киритилади.

Анион концепциясида, статистика анион вектор потенциал орқали Гамильтонианга кириталади ва зарралар статистика эффементи Шредингер тенгламасини ечимини изланишда тўғридан ўрганса бўлади.

Бу диссертацияда тавсирланган ильмий иш, бу катта активликнинг кичик қисми. Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон "Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида"ги Фармонида, 2018 йил 29 ноябрда Ўзбекистон Республикаси Ҳукумати томонидан чоп этилган "2019-2021 йилларда Ўзбекистонда тузилмали ислохотларнинг асосий йўналишларининг йўл харитаси"да ҳамда **ушбу соҳадаги бошқа меъерий-ҳуқуқий ҳужжатларда** белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялари ривожланиши П. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналишига мовофик бажарилган.

Ўзбекистон Республикасининг мустақиллик йилларида, конденсат мухит физикасидаги назарий ва экспериментал изланишларига ва уларнинг халқаро микнесидаги ривожланишига жуда катта этибор берилаяпти.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий тадқиқотлар шархи. ОФМ ва купратларда, ва бошқа компаундларда пайдо бўладиган ЮТЎ муаммолари, бу материаллардаги жуда каттиқ электрон корреляциялар физикаси билан боғлиқ. Бу материалларда электрон аро алмашув магнит таъсири жуда ката бўлади. Бу муаммоларнинг назарий изланиши жуда мураккаб ҳисобланади, шунинг учун бу соҳада ҳозиргача ҳеч қандай прогрессга эрилишмаган. ККХЭ физикаси ҳам каттиқ электронлар корреляцияланган системалар классига тегишли. Аммо бу ерда зарралар аро магнит таъсири камрок бўлади. Асосий дақиқат бизнинг диссертациямизда ЮТЎ ва ККХЭларга қаратилган бўлади. Лекин умид борки, ОФМ ва ЮТЎ физикалари 2D ўлчамда универсал деб ҳисобланади. Бизнинг группамизда ўтказилган анион концепциясини ОФМ физикасида қўлланишига доир дастлабки изланишлар шу умидга асос бўлади.

ЮТЎ ва 2D ўтаутқазгичларнинг но-Ферми суюқли хоссисалари билан боғлиқ фундаментал аспектларга доир назарий изланишлар жуда муҳим ва актуал ҳисобланади. Улар АКШ, Европа, Россия, Япония ва бошқа давлатлардаги етакчи илмий марказларида олиб борилдилар. Диссертациямизнинг ҳар бир бобининг охири кенг сонли илмий мақолалар рўйхати билан таъмирланган ва ундан профессорлар исми ва улар ишлайдиган университетлар ва институтлар тўғрисида информация топса бўлади. Қисқаси, жаҳон литературасида кенг муҳокама қилинаётган назарий изланишлар диссертацияда бажаралаётган ишларнинг илмий актуаллигини ифодалайди.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси.

Ҳозир юқорида айтилганидек, диссертацияда ўрганилаётган илмий муаммолар шунчалик мураккаб ҳисобланадики, бир неча ўнлик йиллари давомида улар ҳар биттасининг тушунишида ҳеч қандай муҳим прогрессга етилмаган. Гарчун, бир хил белгиланган вариацион ҳисоблардан пойдаланиб, сонли моделлаштириш методларини ишлатиб ва физикавий аргументларни ишлатиб келинган шунинг қўрсатилдики, ККХЭни физикаси анион статистикасига эга бўлган квазизарраларнинг квант суюқликлари бир дастаси билан тушунтирилса бўлар экан.

Диссертация тадқиқотининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Миллий Университетининг Амалий Физика Илмий-Текшириш Институти ва Ўзбекистон Миллий Университетининг режаларининг “Қаттиқ Таъсирли Системаларнинг Квант Механикаси,” (2003-2007 йиллар), Давлат Фан ва Технологиялар Қўмитаси, 2.1.10 коди; “Қаттиқ Таъсирли Системалардаги Квант Эффеқтлари,” (2007-2011 йиллар), Ўзбекистон Олий, Ўрта ва Ихтисослашган Таълим

Министирлиги (ОЎИТМ), ОТ-Ф2-082 коди; “Қаттик Корреляцион Квант Системалар Назарияси,” (2012-2016 йиллар), Ўзбекистон ОЎИТМ, Ф-2-60 коди; ва “Ночизикли, Кўп-Заррали, Квант ва Классик Системалар” (2017-2020 йиллар), Ўзбекистон Давлат коди ОТ-Ф2-10 илмий лойиҳалар доирасида бажарилган. Диссертациянинг атори ундан ташқари Германиянинг Фольксваген Фондига 2004-2006 йиллари "Studies of Two-Dimensional Coulomb Systems with the Anyon Concept" ва 2013-2019 йиллари "Anyon physics of ultracold atomic gases" проектларини қисман қўллаганлари учун узини миннатдорчилигини билдиради.

Тадқиқотнинг мақсади анионлар концепциясини 2D анионларни ва фермионларни моделлаш учун КМК методини яратишда қўллаш имкониятини ўрганишдан, гармоник потенциалда локалланган ва чексиз, ташқари магнит майдон ва шу майдонсиз ҳолатда 2D электрон системаларни асосий ҳолат энергиясини ўрганишдан, ва ЮТЎ ўтаутқазғичларнинг бир бозонли алтернатив механизмини, Купер паралардан ҳосил бўлган стандарт механизми ўрнига, яратишда қўллаш имкониятини ўрганишдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

2D анионларни ва фермионларни моделлаш учун КМК методини яратиш;

гармоник потенциалда локалланган ва чексиз, ташқари магнит майдон ва шу майдонсиз ҳолатда 2D электрон системаларни асосий ҳолат энергиясини ўрганиш;

ЮТЎ ўтаутқазғичларнинг бир бозонли алтернатив механизмини, Купер паралардан ҳосил бўлган стандарт механизми ўрнига, яратиш;

ЮТЎ компаундларнинг но-Ферми суюқли хоссисалари бир бозонли механизми доирасида ўрганиш.

Тадқиқотнинг объекти 2D реал электрон системалар: квант нукталар, чексиз 2D системалар ва 2D ЮТЎ ўтаутқазғичлар.

Тадқиқотнинг предмети бўлиб шу 2D системаларнинг ҳар хил физик хоссисалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Илмий муаммоларни ўрганиш учун диссертацияда конденсат мухитлар назариясини, квант ва статистик механиканинг ва қаттик жисм ҳолатнинг услублари ишлатилди.

Тадқиқотнинг илмий янгиллиги.

Биринчи марта янги Комплекс Диффузион Монте Карло методи таклиф қилинди.

2D фермионлар учун юқори температурали ўтаутқазғичларнинг янги бир бозонли механизми таклиф қилинди.

Туннел сканли микроскопда кўрсатилган заряди бирли бозонлар эканлиги диссертацияда исбот қилинди ва юқори температурали

Ўтаутқазғичларнинг фаза диаграммасини элементларини тушуниш учун Кулон бир бозонли ва бир фермионли икки суюқлик модели биринчи марта таклиф қилинди.

Купратларнинг но-Ферми суюқлик хоссалари тўплами шу Кулон икки суюқлик модели асосида биринчи марта тушунтириб берилди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

Биринчи бобидаги ривожланган КМК методи мовхум қисмга эга бўлган тўлқин функцияли 2D фермион ва электрон системаларни квант моделлаштиришда ишлатиши мумкин.

Диссертациянинг кегинги уч бобидаги квант нукталар ва 2D чексиз электрон системалар учун олинган асосий ҳолат энергияси аналитик ифодалари экспериментал малумотлар ва сонли квант моделлаштириш натижалари билан солиштириши мумкин.

Агарда келажакда учта кегинги бобиларда ривожланган ЮТЎ физикасининг бир бозонли механизмнинг интрепретациясига алтернативаси йуклигини экспериментал ва назарий томонидан исботлаб берилса, кенг класс 2D ўтаутқазғичларнинг физикасининг янги фундаментал тушунчаси пайдо бўлиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги КМК моделлаштириш методлари, локалланган ва чексиз 2D электрон системаларнинг асосий ҳолат энергияси ҳисоблаш ва ўтаутқазғичлик ва ўтаутқазғичларнинг нормал ҳолат хоссаларини изланишларда замонавий ва яхши малум бўлган усулларининг қўлланганлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти қанчалик улар илмий назар тарафдан янгиклиги билан аниқланади. Уларнинг бошқа аҳамияти қанчалик таклиф қилинган изланиш усуллари янгиллигига боғлиқ. Мураккаб 2D электрон системалар учун анион концепцияси бу янги аналитик (яқинлашув бўлса ҳам) усули. Бу концепцияни қўллашнинг амалий аҳамияти унинг соддалигида дир.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Диссертация ишида ишлаб чиқилган усуллар ЎзМУнинг “Ночизикли кўп заррали квант ва классик системалар” мавзусидаги илмий лойиҳасини бажарилишда фойдаланди.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертацион ишнинг асосий натижалари ҳисобот, доклад ва тезис формаларда 8 халқаро ва 2 республика илмий анжуманларда муҳокама қилинди.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертацион ишнинг асосий натижалари чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 7 та мақолалар хорижий журналларда, 4 мақолалар хорижий нашриетларда чоп

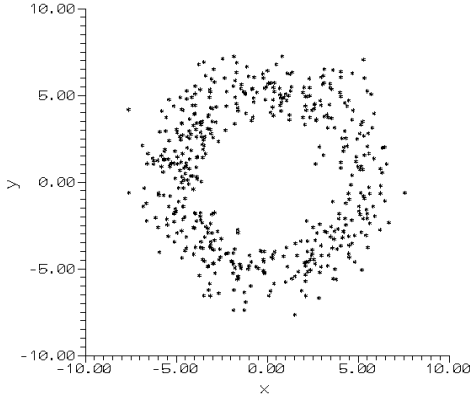
этилган китобларда ва AgXiv электрон препринтлари тўпламида 5 мақолалар нашр қилинган. Биз диссертацияда ундан ташқари халқаро ва республика анжуманларда 10 чоп этилган докладлар тезисларини кўрсатдик. Бу ҳамма мақолалар Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда нашр қилинган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, 7 та боб, хулоса ва 185 ишлардан ташкил топган адабиётлар рўйхатидан иборат (чоп этилган абстрактлар ва AgXiv электрон препринтлар бу рўйхатга киритилган). Диссертациянинг умумий ҳажми 169 бетни ташкил этади.

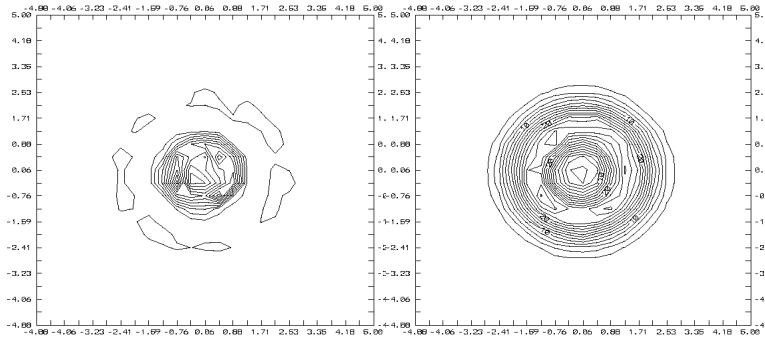
ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

“Комплекс Диффузион Монте Карло методи” деб номланган биринчи бобда, биз комплекс тўлқин функциясига эга бўлган квант системалар моделлаштириш учун янги Комплекс Диффузион Монте Карло (КДМК) методини таклиф қилияпмиз. КДМКда, бошқа методларга қараганда, тўлқин функциясининг ҳам модули, ҳам фазаси, иккаласи моделлаштирилади. 2D электронни магнит майдонида ҳамда параболик чуқурликда ва 2D фермион-анионларни параболик чуқурликда КДМК тест моделлаши ижобий натижани кўрсатди.

Расм (1) расмда моделлашдан олинган орбитал квант сони $m = 13$ тенг бўлган бир электронни асосий ҳолат реал фазодаги таъсимоти берилган. Солиштириш учун, аниқ ечимдан (мисол учун Л.Д. Ландау ва Е.М. Лифшиц, Нерелятивистская Квантовая Механика китобидан) келиб чиқадиган фазовий таъсимоти халқа формасига эга бўлиб, унинг радиуси $(2m + 1)^{1/2}$ га ва кенглиги 1 га (магнетик a_c узунлик бирлигида) тенг. Бу солиштириш КДМК моделлаш яхши натижани беришини кўрсатади.



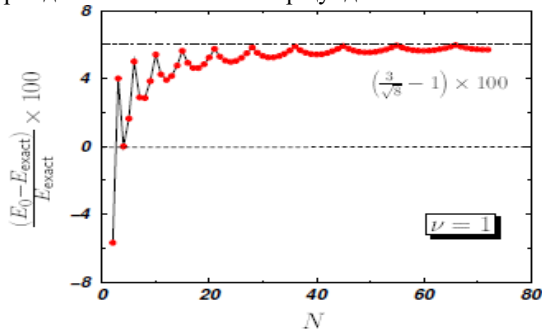
Расм 1. Бир электроннинг моделлашдан олинган бир жинсли магнит майдонидаги асосий ҳолат реал фазодаги таъсимоти, агарда $m = 13$ бўлса. Бу ерда узунлик бирлиги a_c ва моделлаш бошланғич нукталар сони $N_c = 500$.



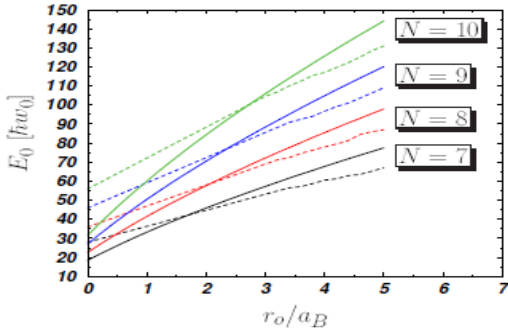
Расм 2 ва 3. 2D гармоник потенциалдаги 6 фермионлар учун бир заррали асосий ҳолат тўлқин функциясининг модулининг квадрати $|\Psi(\vec{r})|^2 = \int |\Psi(\vec{r} = \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_6)|^2 d\vec{r}_2 d\vec{r}_3 \dots d\vec{r}_6$. Моделлаштиришдан ва Слэтер детерминанти ишлатилган ҳисобдан олинган натижалар.

“Локалланган Кулон анион газнинг асосий ҳолати” номли диссертациянинг иккинчи бобда, биз N Кулон потенциали таъсирли, статистикаси ν , $0 \leq |\nu| \leq 1$ тенг, икки ўлчамли чуқурлигда (чуқурлик

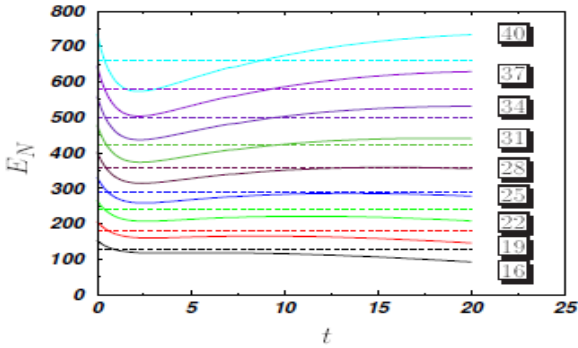
частотаси ω_0 билан) локаллашган ва ташқи магнетик майдон (майдон циклотрон частотаси ω_c билан) остига қўйилган анионларнинг асосий ҳолат энергиясини аналитик, аппроксимацияли ифодасини аниқлаймиз. Шунинг учун биз вариацион принципини регуларизация процедураси комбинацияси билан бирга ишлатамиз. Регуларизация процедурасида чексизга интилаётган кесил параметри, таъсирсиз ҳолда, аниқ аналитик натижаларга мослаш асосида ва, квант нукталардаги таъсир электронлар ҳолда, сонли ҳисоблардан олинган натижаларга мослаш асосида аниқланади. Натижада олинган энергиянинг ифода-формуласи система параметрилари $|\nu|$, N , ω_0 , r_0 , a_B ва ω_c , қаерда ўртача r_0 масофа характеристик бирлик Бор радиуси a_B билан боғлиқ, орқали ифодаланadi. Натижанинг чинлиги литературадан олинган аниқ, аппроксимация ва сонли натижалар билан солиштириш асосида критик баҳо берилди. Олинган натижалар қуйдагича.



Расм 4. Параболик локалтирадиган потенциалда $N=72$ гача таъсирсиз ($\nu = 1$) фермионлар учун диссертацияда олинган аппроксимация асосий ҳолат E_0 энергиясини аниқ асосий ҳолат E_{exact} энергиясидан нисбий (процентларда) айрими. Тире-нукта чизик асимптотик ($N \rightarrow \infty$) қийматини кўрсатади.

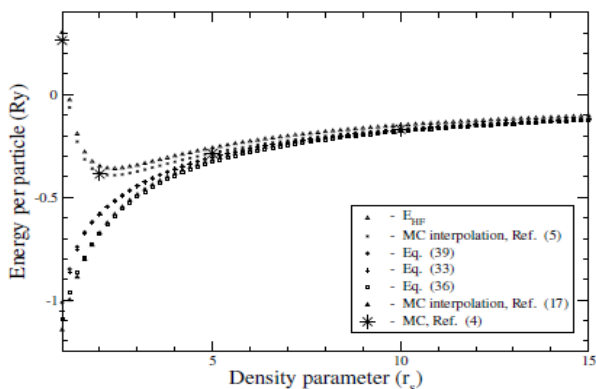


Расм 5. Квант нуктада 7 – 10 электронлар учун ҳисобланган асосий ҳолат энергиянинг Кулон таъсир параметер r_0/a_B функцияси. Бу ерда вариацион ва илдиизи-фиксация қилинган квант Монте Карло методида олинган натижа - тире эгри чизик (иккита методларда олинган натижалар орасида фарқи ажралмасли кичик) ва бизнинг аппроксимация формуламиз - тўла эгри чизик (вариацион ва Монте Карло ҳисобланган маълумот учун адабиет: Б. Абдуллаев докторлик диссертацияси еки В. Abdullaev et al., Phys. Rev. B, 2003, vol. 68, P. 165105(1-9)).



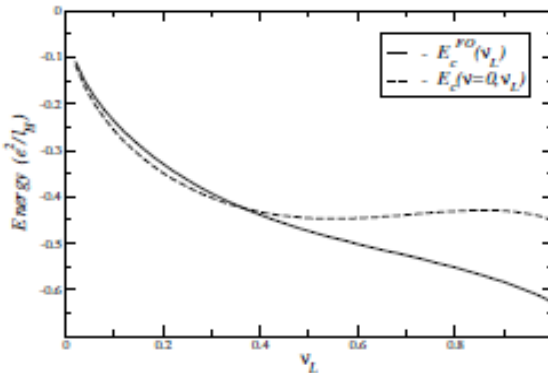
Расм 6. Диссертацияда олинган $E_N = (E_0 - N\hbar\omega)/(\hbar\omega_0)$ формулани ишлатиб, $r_0/a_B = 1.911$ ва $|v| = 1$ параметрларда, квант нуктадаги 16 - 40 электронлар учун асосий ҳолат энергиясини ҳисоблаш - тўла эгри чизик ва классик электронлар учун энергия - тире эгри чизик. Бу ерда $\omega = (\omega_0^2 + \omega_c^2/4)^{1/2}$ ва $t = \omega_c/\omega_0$ (классик электронлар энергияси маълумоти учун адабиет: Б. Абдуллаев докторлик диссертацияси еки В. Abdullaev et al., Phys. Rev. B, 2003, vol. 68, P. 165105(1-9)).

“Зарядланган анионлар газлар асосий ҳолати” номли учинчи бобда, зарядланган анионлар газлар асосий ҳолати энергияси учун аппроксимация аналитик формуласини аниқлаймиз. Бизнинг усулимиз гармоник локаллашган икки ўлчамли (2D) Кулон анион гази ва локаллаш сўниши регуляция процедурасига асосланган. Қасрли статистикасини ва Кулон таъсирини ҳисобга олиш учун, биз иккита, статистика ва жичлик (ν ва r_s), параметлари билан болиқ функция киритамиз. Бу функцияни аниқлаш учун, биз уни жуда катта r_s ларда классик электрон кристалл (2D Вигнер кристалл), жуда кичик r_s ларда спин-поляризация бўлган 2D электрон газнинг Хартри-Фок (ХФ) энергияси ва жич 2D Кулон Бозе газнинг асосий ҳолат энергияларга мослаймиз. Охириги энергия Боголюбов яқинлашишни ишлатиб ҳисобланган. Бозонлар ($\nu = 0$) учун олинган бизнинг натижа Монте Карло (МК) асосида ҳисобланган натижага жуда яқин. Спин-поляризация бўлган электрон системар ($\nu = 1$) учун бизнинг солиштиришимиз ХФ ва Монте Карло энергияси олинган жичлик соҳасининг сифатини критик баҳолашни беради. Агарда $r_s > 1$ бўлса, ν қийматига нисбатан бизнинг аналитик формуламиздан олинган асосий ҳолат энергия бозон чегарасидан фермион чегарасигача монотон равишда ўсиб боради. $r_s \leq 1$ соҳасида эса у монотонсиз хусусиятини кўрсатади. Бу хусусият ν параметр ўзгарганда бозонлар фермионларга узлуксиз трансформацияси бузилишини кўрсатади. Олинган натижалар қуйдагича.



Расм 7. Бир заррага келтирилган асосий ҳолат энергиянинг зичлик параметр r_s функцияси, қаерда $1.0 \leq r_s \leq 15$, фермионлар учун ($\nu = 1$) ва бозонлар ($\nu = 0$) учун.

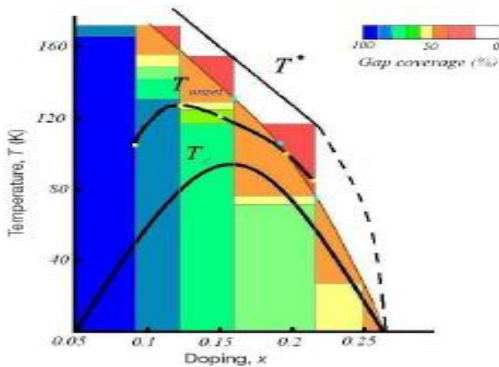
“Қаттиқ магнит майдондаги зарядланган анионлар газларнинг асосий ҳолати” номли тўртинчи бобда, қаттиқ магнит майдондаги (Ландау сатхларнинг тўлдириш фактори $\nu_L \leq 1$) икки ўлчамли (2D) анионлар газининг асосий ҳолат энергиясининг аналитик формулаларини ҳисоблаб чиқамиз. Бу формулаларни чиқаришда биз гармоник локалланган 2D Кулон анион газини ва локаллаш сўниши регуляция процедурасини билан пойдаландик. Кулон таъсири йўқ ҳолда, бизнинг аналитик натижамиз аниқ ечимни ифодалайди. У ν параметри билан характерланган анион майдон калибровкасини ва $\nu_L \leq 1$ ҳиссаларини ичига олади. Кулон таъсири мовжуд ҳолда, биз ν , $\nu_L \leq 1$ параметрлар ва зичм r_s параметрдан ташкил топкан функцияни киритамиз. Бу функцияни аниқлаш учун, биз уни спин-поляризацияланган электронларнинг касрли квант Холл режими ҳолда Фано-Артолани интерполяция формуласига, ва қаттиқ магнит майдонда 2D Кулон Бозе газининг асосий ҳолат энергиясига мослаймиз. Бизнинг формуларимиз чинлигини пақат фермионлар ($\nu = 1$) учун эмас, балким умумий ҳолда, ҳамма анионлар ($0 \leq \nu \leq 1$) учун кўрсатамиз. Олинган натижалар қуйдагича.



Расм 8. Паст Ландау сатхлардаги спин-поляризацияланган фермионлар учун e^2/l_H бирликда ўлчалган бир заррага келаётган корреляцион энергиясининг ν_L функцияси. Бу ерда фермионлар учун $E_c(\nu = 1, \nu_L) = E_c^{FO}(\nu_L)$, (тўла эгри чизик) ва бозонлар учун $E_c(\nu = 0, \nu_L)$, (тире эгри чизик).

“Юқори температурали ўтаутқазгичларнинг бир бозонли механизми” номли бешинчи бобда, биз бу механизмни ишлашини яқинда Gomes et al., Nature 447, 569 (2007)да чоп этилган мақолада юқори-Тс ўтаутқазгичнинг Тс дан юқори температура соҳасида $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ купратда нано масштаб реал фазо регионда (НР) энергия спектрда бўшлик

Ўлчаш (визуализациялаш) экспериментда кўзатишган факт асосида намоён қиламиз. Бу эксперимент шуни аниқладики, температура пасайса, НРлар но-бир жинсли бутун хажим ўтаутқазғич холат регионига кенгайр экан. ЮТЎлардаги но-бир жинсли НРларнинг размер (S.H. Pan et al., Nature 413, 282 (2001)) катталиги (S.H. Pan et al., Nature 413, 282 (2001)) мақолада аниқланган НРнинг минимал размерига яқинлиги шу хулосага келтирадики, ўтаутқазғич фазаси бу НРларни бир бировини билан бирлаштириш натижаси. Бу мақолада, биз НРларни заряди ва перколяция режимининг анализини келтирамиз ва шуни кўрсатамизки, ўтаутқазғични пайдо бўлиш биринчи критик x_{c1} допированиесида (зарядни материалга критик концентрациясида) хар бир НРнинг заряди плюс бирга (электроннинг бирлик зарядида) тенг экан, шунинг учун биз НРни бир тешикдан хосил бўлган бозон (бир бозон) деб белгилаб оламиз, ва бу бозонларни бирлаштирадиган перколяция чизиклар пайдо бўлади. Ўтаутқазғични йўқолиш иккинчи критик x_{c2} допированиесида, бизнинг анализимиз хар бир НРнинг заряди плюс иккига тенглигини кўрсатади. x_{c2} табиатини тушуниш учун, НРларга қўшимча нормал фазодаги тешик фермионларни киритишимиз лозим, уларнинг коннцентрацияси x_{c1} дан юқорида пайдо бўлиб допированиени оширганда текис равишда ўсиб боради ва x_{c2} критик допированиесида бозонларни перколяция чизикларини узиб юборади.



Расм 9. $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ компаунднинг бир тешик бозонли схемали фаза диаграммаси.

x	$(10 \text{ \AA}/r_0)^2$	$(13 \text{ \AA}/r_0)^2$	$\xi_{coh}(\text{\AA})$	$(\xi_{coh}/r_0)^2$	ξ_{coh}/r_0	N_{ob}
0.28	1.939	3.277	10	1.939	1.393	~ 1

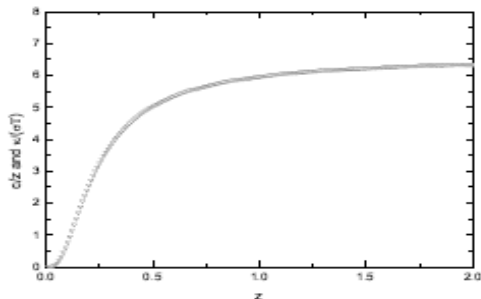
0.22	1.524	2.575	10	1.524	1.235	~ 2
0.16	1.108	1.873	11	1.341	1.158	~ 3
0.14	0.969	1.638	12	1.396	1.182	~ 3
0.10	0.693	1.170	13	1.170	1.082	~ 6
0.05	0.346	0.585	17	1.000	1.000	
0.04	0.277	0.468	18	0.897	0.947	
0.02	0.139	0.234	20	0.554	0.744	

Таблица 1. НР зарядларнинг x допирование функцияси. Бу зарядлар фиксацияланган $\xi_{coh}=10 \text{ \AA}$, $\xi_{coh}=13 \text{ \AA}$ ва экспериментдан олинган когерент ξ_{coh} узунликлардан ҳисобланган. Охириги ξ_{coh} учун заряд $(\xi_{coh}/r_0)^2$ ва перколяция ξ_{coh}/r_0 параметрлари берилган. Охириги устунда ҳар бир фермионнинг отрофидаги бозонлар N_{ob} сони берилган. Қора ажратилган рангда критик x_{c1} ва x_{c2} нинг миқдорлари ва бу допированидаги мос НР зарядлар берилган.

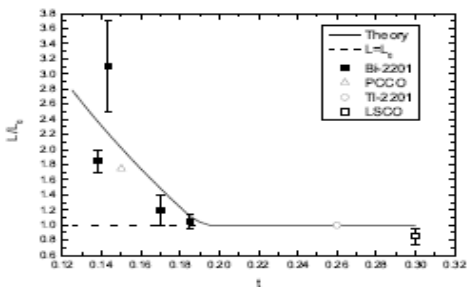
Шу бобнинг охирида, мис-оксидларда кузатиладиган юкори температурали ўтаутқазғичларнинг (ЮТЎ) **Кулон бир бозонли ва бир фермионли икки суяқлик моделини** асосий пунктларини таклиф қилдик.

Диссертациянинг олтинчи ва еттинчи боблари **“Қупратларнинг но-Ферми суяқли хоссалари I”** ва **“Қупратларнинг но-Ферми суяқли хоссалари II”** нинг ифодалашига бағишланган. Биринчи бобда, куплатларнинг ПБ фазасининг электронли паст- T (паст температурали) иссиқлик утқазғичлиги κ , энтропия S ва диэлектрик асосий ҳолатини (ДАХ) ва паст- T металл-диэлектрик ўтишини (МДЎ) анионлар-боғланган бозонлар умумлашган моделда кўриб чиқиш ҳаракати рўебга оширилди. Биз аргументларни ишлатиб шуни кўрсатаёймизки, экспериментда кузатилган $\kappa \sim T^{3.6}$ ва $\kappa \sim T$ функциялар назарияда ҳисобланган $c \sim T^4$ ва $c \sim T$ иссиқлик сизими функциялар орқали тушинса бўлар экан, экспериментдаги $i > 1$ лардаги $S \sim T^1$ энтропия функцияси учун назариядан келиб чиқадиган $c \sim T^4$ иссиқлик сизими функциясини ишлатиш мумкин экан. Охириги иссиқлик сизими функциясининг табиати 2D Кулон таъсирли бозонлар учун Боголюбов квазизарралар идеал газ (БКИГ) учун ҳисобланган иссиқлик сизими c функцияси экан. Шу сонли ва сифатли аргументларни ҳисобга олиб, иссиқлик утқазғичлиги κ нинг пасаиб кетиш хусусиятини биз системани МДЎ ва ДАХ га ўтишини билан боғладик. Агарда ПБ фазаси БКИГлар ва

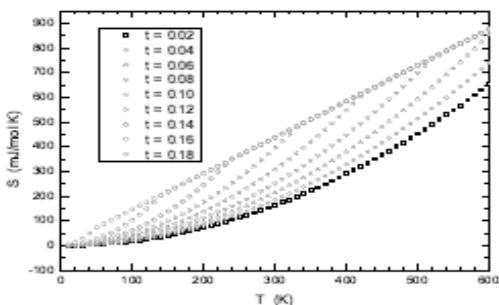
Ландау суюклик назарияси квазизарралари (ЛСНК) аралашмасидан ҳосил бўлганини фараз қилсак, биз экспериментда кузатилган Wiedemann – Franz қонунининг Lorentz нисбатининг миқдорларини келтириб чиқарамиз.



Расм 10. $q^2/(8\pi\hbar^2)$ ва $k_B m v l / (2\pi\hbar^2 \sigma)$ бирликларда ўлчалган иссиқлик сиғим c/z ва $\kappa/(\sigma T)$ ларнинг z функцияси. Аргумент z нинг белгиси: $z = T/(aq)^{1/2}$ функция c/z учун ва $z = K^{1/3} T/(aq)^{1/2}$ функция $\kappa/(\sigma T)$ учун, бу ерда $K \sim 10^{12}$.



Расм 11. L/L_0 нисбатлиги (диссертациянинг (6.14) формуласи) допирование параметри t функцияси. Бу ерда ЛСНК сонли катталиклар сунъий равишда кўшилган. Нукталар экспериментлардан олинган (улар учун адабиетлар диссертациядан олса бўлади).



Расм 12. Энтропия S нинг температура T функцияси (хар хил фиксацияланган t кийматларида). S нинг кийматлари ночизикли ва чизикли функциялар учрашув нуктаси орқасида сунъий равишда кўшилган.

Хулоса

"Конденсат ҳолати физикасидаги анионлар" мавзусидаги докторлик диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар натижасида қуйидаги хулосалар тақдим этилади:

1. Биринчи марта муҳим қисмга эга бўлган тўлқин функцияли квант системалар моделлаштириш учун янги Комплекс Диффузион Монте Карло (КДМК) методи таклиф қилинди.

2. 2D электронларни гармоник локаллашган чуқурлигид ва ташқи магнетик майдон остита ва чексиз электронлар системаси ташқи магнетик майдон ва ташқи магнетик майдонсиз ҳолатда асосий ҳолат энергиясининг аппроксимация аналитик ифодалари ҳисоблаб чиқилди.

3. 2D фермионлар ва анионларнинг биринчи марта реал бозонизацияси аниқланди ва бунинг асосида қупратлардаги юқори температурали ўтаутқазғичларни (ЮТЎ) тушинтурувчи янги бир бозонли механизми таклиф қилинди.

4. Туннел сканли микроскопда (ТСМ) ЮТЎ қупратлардаги Купер жуфтликларни визуализация (кўрсата бериш) эксперименти анализи нормал псевдо бўшлиқ ва ЮТЎ ҳолатлар реал фазодаги нанорегионлардан ҳосил бўлишини биринчи марта қурсатди ва уларнинг заряди бирга (электронлар зарядлар бирлигида) тенг экан. Бу аниқланган нанорегионлар бирли бозонлар эканлиги диссертацияда аргументлаб исбот қилинди.

5. Хулосаларнинг олдинги пуктида айтилган ТСМ эксперименти ўрганиб анализ қилингандан кегин ва ЮТЎни тушинтириш учун бирли бозон механизми қўлланилгандан кегин қупратларнинг температура – допирование

фаза диаграммасини ҳамма элементларини тушуниш учун Кулон бир бозонли ва бир фермионли икки суюқлик модели биринчи марта таклиф қилинди.

6. Купратларнинг но-Ферми суюқлик хоссалари тўплами шу Кулон икки суюқлик модели асосида биринчи марта тушунтириб берилди.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019. FM.01.09 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE
NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

ABDULLAEV BAKHODIR

ANYONS IN THE PHYSICS OF CONDENSED STATE

01.04.02- Theoretical Physics

**DISSERTATION ABSTRACT
of the doctor of science (DSc)
on Physical and Mathematical sciences**

Tashkent – 2022

The theme of the doctoral dissertation (DSc) was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.1.DSc/FM20.

Doctoral dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation was posted in three languages (Uzbek, English, Russian (resume)) on the website of the Scientific Council at www.nuu.uz and on the website of "Ziyonet" informational and Educational Portal www.ziyonet.uz.

Scientific consultant: **Musakhanov Mirzayousuf Mirzamakhmudovich**
Academician of AS of Uzbekistan, Doctor of sciences in physics and mathematics, Professor

Official opponents: **Nakamura Katsuhiko**
Doctor of Sci, Professor

Yavidov Bakhrom Yangibaevich
Doctor of sciences in physics and mathematics, Assoc. Prof.

Bakhtier Baizakovich Baizakov
Doctor of sciences in physics and mathematics

Leading organisation: **Institute of Nuclear Physics of AS of Uzbekistan.**

The defense of the dissertation will be held on "16" Dec 2022 at 12:00 at the meeting of the Scientific council No DSc.03/30.12.2019. FM.01.09 at the National University of Uzbekistan (Address: 100174, Tashkent city, Almazar Dst., University Str., 4. Tel. (+99871) 227-12-24; fax: (+99871) 246-53-21; e-mail: nauka@nuu.uz).

The doctoral (DSc) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of National University of Uzbekistan (registered under No. _____. Address: 100174, Tashkent city, Almazar Dst., University Str., 4. Tel. (+99871) 227-02-24

Abstract of dissertation was distributed on "2" Dec 2022.
(Registry record No 10 dated "3" Dec 2022).

M.M. Musakhanov
Chairman of the Scientific Council on award of Scientific degrees, Acad., D.Ph.-M.S., Professor

B.A. Fayzullaev
Scientific secretary of the Scientific Council on award of Scientific degrees, D.Ph.-M.S., Associate Professor

B.J. Akhmedov
Chairman of the scientific seminar of the Scientific Council on award of Scientific degrees, D.Ph.-M.S., Professor



INTRODUCTION (annotation of the doctoral dissertation)

Actuality and importance of the dissertation content. Recent several decades are characterized by observation of several interesting phenomena in the condensed state physics. Among them heavy fermion metals (HFM), fractional quantum Hall effect (FQHE) and high temperature superconductivity. In the concept of anyons, the statistics, through the anyon vector potential, is introduced in the Hamiltonian and the effect of particle statistics can be investigated directly by solution of the Schrodinger equation.

In our Republic, great attention is paid to the fundamental investigation of the condensed matter physics, in which the theoretical research is considered as most important. The directions of these fundamental studies, which have a great importance for the development of science in our country, are related to the Strategy of Actions for the further development of the Republic of Uzbekistan for 2017-2021. The scientific subjects described above are very challenging, since they provide the new highlights into fundamental aspects of physics. This is why the leading world centres are actively work in these directions of physics. The work, described in the dissertation, is the tiny part of this activity. It, to a certain extent, serves as an implementation of tasks in accordance with state normative documents, Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan PF-4947 "On the Strategy for the further development of the Republic of Uzbekistan" dated February 7, 2017, as well as the "Road map of the main directions of structural reforms in Uzbekistan for 2019-2021", published by the government of the Republic of Uzbekistan on November 29, 2018.

Conformity of the research to the main priorities of science and technology development of the Republic. The dissertation research has been carried out in accordance with the priority areas of science and technology in the Republic of Uzbekistan: II. "Power, energy and resource saving".

During the years of Independence of the Republic of Uzbekistan, great attention has been devoted to the development of experimental and theoretical researches in the field of condensed matter physics, as well as research in this direction at the international level.

Review of international scientific researches on dissertation subject.

Problems, appeared in HFM, HTS in cuprates and other compounds, related to the physics of strongly correlated electron materials, materials, in which the exchange magnetic interaction between electrons is very strong. The theoretical study of these problems is too complicated and therefore, no progress was achieved in this field so far. The FQHE physics belongs also to the class of strongly correlated electron systems, but with less magnetic interaction between particles. In our dissertation, we will pay attention to physics of HTS and FQHE. There is belief that it for the HFM and the HTS of 2D superconductors is universal. A

preliminary estimate of application of the anyon concept to the HFM, made in our group, displays its productivity.

Theoretical studies of fundamental aspects of the HTS and Non-Fermi liquid properties of 2D superconductors are highly important and actual. They are conducted by world leading centres in the USA, Europe, Russia, Japan and other countries. Each chapter of our dissertation will be provided by as possible big set of references, where names of professors and institutes and universities they present will be reflected. Briefly saying, theoretical studies are widely discussed in the world scientific literature and they justify the relevance of scientific research in the dissertation to the global level.

Degree of studiedness of the problem.

As we said just before, the scientific problems, studied in the dissertation are so complicated that during several decades almost no substantial progress was achieved in the understanding of each of ones. It was shown in the variational level, by involving some numerical methods and physical arguments, that the FQHE may be understood as set of novel quantum liquids, consisted from exotic quasi-particles with anyon statistics.

Connection of the topic of the dissertation to the scientific works of higher educational and research institutions, where the dissertation is carried out. The thesis was carried out in the Institute of Applied Physics, the National University of Uzbekistan and in the National University of Uzbekistan itself within the following scientific research projects: in 2003-2007 years, within the project "Quantum Mechanics of Strongly Interacting Systems," the Uzbekistan State Committee on Science and Technology code 2.1.10; in 2007-2011 years, within the project "Quantum Effect in Strongly Interacting Systems," the Ministry of Uzbekistan on Higher and Middle Specialized Education (MUHMSE) code OT-F2-082; in 2012-2016 years, within the project "Theory of Strongly Correlated Quantum Systems," the Uzbekistan MUHMSE code F-2-60 and, at present, during 2017-2020 years, within the project "Nonlinear, Many-Body, Quantum and Classical Systems," the Uzbekistan State code OT-F2-10. Author of dissertation also gratefully acknowledges the Volkswagen Foundation of Germany for the partial support of the research activity, when the "Studies of Two-Dimensional Coulomb Systems with the Anyon Concept" in 2004-2006 project and the "Anyon physics of ultracold atomic gases" in 2013-2019 project have been carried out.

The aim of the research is to study the possibility of application of the anyon concept for the creation of a QMC method for the simulation of 2D anyons and fermions, investigation of the ground state energy of 2D electron systems, as confined in the harmonical trap so and infinity ones, with and without external magnetic field, for the creation of alternative single boson mechanism of superconductivity for the HTS, instead of standart Cooper pair mechanism.

The following **tasks of the research** were formulated to achieve these aims: to create a QMC method for the simulation of 2D anyons and fermions;

to investigate of the 2D electron systems ground state energy, as confined in the harmonical trap so and infinity ones, with and without of the external magnetic field;

to create an alternative single boson mechanism of superconductivity for the HTS, instead of standart Cooper pair mechanism;

to investigate the Non-Fermi liquid properties of HTS compounds in the framework of the single boson mechanism.

The objects of the research are the 2D real electronic systems: quantum dots, infinite 2D systems and 2D HTS superconductors.

The subjects of the research are the various physical properties of these 2D systems.

The methods of the research. For the investigation, there have been used in the dissertation methods of the condensed matter theory, the quantum and statistical mechanics and solid state physics.

The scientific novelty of the research. The new Complex Diffusion Monte Carlo method for the simulation of quantum systems has been first in the time suggested.

For the 2D fermions the new single boson mechanism of the high-temperature superconductivity has been suggested.

It was proven in the dissertation that charges observed in the scanning tunneling microscopy are the single bosons, and the Coulomb single boson and single fermion two liquid model for understanding of all elements of the temperature – doping phase diagram of cuprates first in the time suggested.

The set of non-Fermi liquid properties of cuprates on the base of this Coulomb two liquid model has been first in the time clarified.

Practical results of the research are as follows:

The developed in the chapter one QMC method can be applied for the quantum simulation of 2D fermion systems and electron systems in the external magnetic field, when the system wave function contains the imaginary part.

Analytically obtained in the next three chapters of dissertation expressions for the ground state energy of quantum dots and 2D infinite electronic systems can be used for a comparison with experimental data and numerical quantum simulations.

If it will experimentally and theoretically be proven in the future, that there is no alternative to the developed in the following three chapters boson mechanism for the interpretation of the HTS physics, the new fundamental insight for the understanding of the physics of wide class of 2D superconductors will be obtained.

The reliability of the results of the study is proved by using modern and

well- known methods of a QMC simulation, calculation of the ground state energy of trapped and infinite 2D electrons, and methods of investigation of superconducting and normal state properties of superconductors.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific importance of the research results is determined by fact whether these results are new or not from scientific point of view. Other importance of obtained results relates with novelty of suggested methods of investigation. Anyon concept is new approach for the analytic (approximate) investigation of complex 2D electron systems. The practical significance of this concept application is in its simplicity.

Application of the research results. As we mentioned above obtained in the dissertation results are devoted to actual problems of the condensed matter physics. Each investigation work in this field extends our understanding of this physics nature, which is a goal of the scientific research activity.

Approbation of the research results. Methods, developed in the dissertation, have been used in the realization of a NUU project “Nonlinear many body quant and classic systems.”

Publication of the research results. The main results of the thesis are published in 10 scientific papers in the peer-reviewed international journals, as reviews in the 4 books of the international publishing companies. We also indicated 10 published thesises of talks in the international and local conferences. All these papers have recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publication of the main scientific results of doctoral thesis and abstracts in the proceedings of international and regional conferences.

Volume and structure of the dissertation. The thesis consists of an Introduction, seven chapters, conclusion and a list of 185 references (including published abstracts and ArXiv e-preprints). The thesis is presented in 169 pages.

THE MAIN CONTENT OF THE DISSERTATION

In the first chapter “**Complex Diffusion Monte-Carlo method,**” we propose a new Complex Diffusion Monte Carlo (CDMC) method for the simulation of quantum systems with complex wave function. In CDMC the modulus and phase of wave function are simulated both in contrast to other methods. We successfully test CDMC by the simulation of the ground state for 2D electron in magnetic field and 2D fermions-anyons in parabolic well.

In the Fig. (1) we display the ground state spatial distribution of electron after simulation for $m = 13$, where m is the orbital quantum number, From this Fig. we see good correspondence with exact solution for the spatial distribution,

which is a ring with mean radius $(2m + 1)^{1/2}$ and wide 1 in a_c magnetic length units (see, for example, the L. D. Landau and E. M. Lifshitz textbook on Nonrelativistic Quantum Mechanics).

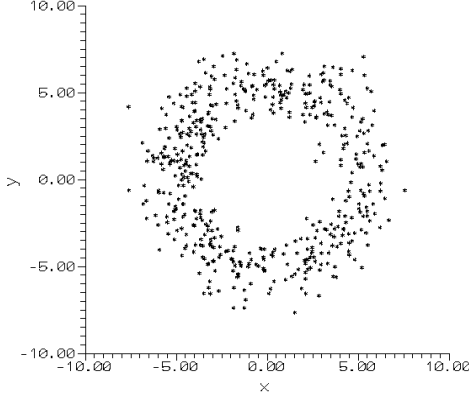
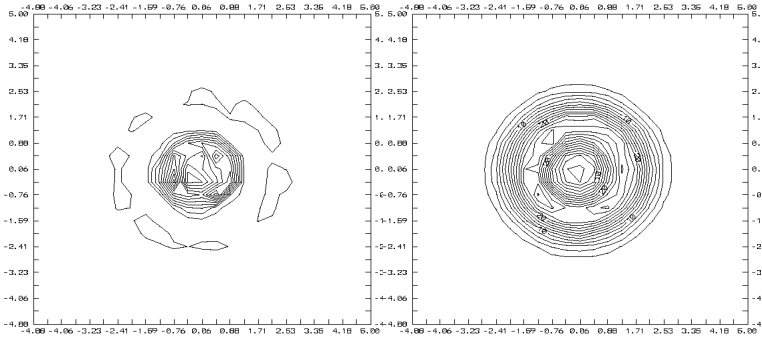


Fig. 1 The simulation result for ground state spatial distribution of the electron in uniform magnetic field at $m = 13$. The length unity is a_c , initial number of simulation points was $N_c = 500$.



Figs 2 and 3 Square of module of one particle ground state wave function for 6 fermions in 2D harmonic potential $|\Psi(\vec{r})|^2 = \int |\Psi(\vec{r} = \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_6)|^2 d\vec{r}_2 d\vec{r}_3 \dots d\vec{r}_6$. Results of the simulation and calculations with Slater determinant.

In the second Chapter “Ground state of a confined Coulomb anyon gas” we derive an analytic, approximate, expression for the ground state energy of N

Coulomb interacting anyons with fractional statistics ν , $0 \leq |\nu| \leq 1$, confined in a two-dimensional well (with characteristic frequency ω_0) and subjected to an external magnetic field (with cyclotron frequency ω_c). We apply a variational principle combined with a regularization procedure which consists of fitting a cutoff parameter to existing exact analytical results in the noninteracting case, and to numerical calculations for electrons in quantum dots in the interacting case. The resulting expression depends upon parameters of the system $|\nu|$, N , ω_0 , r_0 , a_B and ω_c , where r_0 represents a characteristic unit length and a_B the Bohr radius. Validity of the result is critically assessed by a comparison with exact, approximate, and numerical results from the literature. The obtained results are as follows.

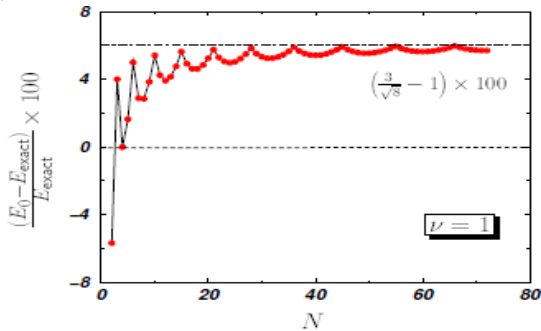


Fig. 4 Relative deviation (in percent) of the derived approximate ground state energy E_0 , from the exact ground state energy, E_{exact} , for up to $N=72$ noninteracting fermions ($\nu = 1$) in a parabolic confining potential. The dashed-dotted line indicates the asymptotic ($N \rightarrow \infty$) value.

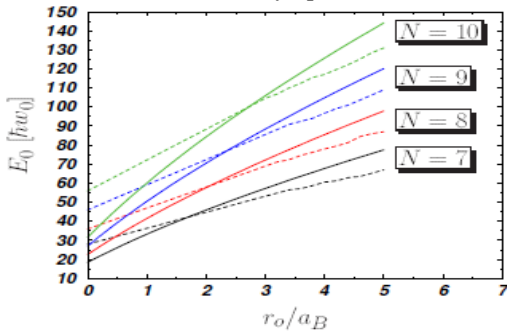


Fig. 5 Coulomb interaction parameter r_0/a_B dependence of the ground state

energy for 7 – 10 electrons calculated by variational and fixed-node quantum Monte Carlo methods - dashed curves (results of both calculations are indistinguishable in these curves) and by obtained approximate formula - solid curves. (See DrSc Thesis or B. Abdullaev et al., Phys. Rev. B, 2003, vol. 68, P. 165105(1-9) for references on Variational and Monte Carlo calculation data.)

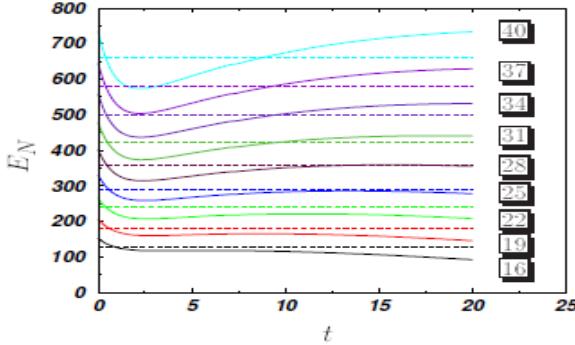


Fig. 6 Ground state energy $E_N = (E_0 - N\hbar\omega)/(\hbar\omega_0)$ for 16 - 40 electrons calculated using obtained in the thesis expression for $r_0/a_B = 1.911$ with $|v| = 1$ - solid curves, and energy for classical electrons - dashed lines. Here $\omega = (\omega_0^2 + \omega_c^2/4)^{1/2}$ and $t = \omega_c/\omega_0$. (See DrSc Thesis or B. Abdullaev et al., Phys. Rev. B, 2003, vol. 68, P. 165105(1-9) for the reference on the energy of classical electron calculation.)

In the third Chapter “**Ground-state of charged anyon gases,**” we derive an approximate analytic formula for the ground-state energy of the charged anyon gas. Our approach is based on the harmonically confined two-dimensional (2D) Coulomb anyon gas and a regularization procedure for vanishing confinement. To take into account the fractional statistics and Coulomb interaction we introduce a function, which depends on both the statistics and density parameters (ν and r_s , respectively). We determine this function by fitting to the ground-state energies of the classical electron crystal at very large r_s (the 2D Wigner crystal), and to the Hartree-Fock (HF) energy of the spin-polarized 2D electron gas, and the dense 2D Coulomb Bose gas at very small r_s . The latter is calculated by use of the Bogoliubov approximation. Applied to the boson system ($\nu = 0$) our results are very close to recent results from Monte Carlo (MC) calculations. For spin-polarized electron systems ($\nu = 1$) our comparison leads to

a critical judgment concerning the density range, to which the HF approximation and MC simulations apply. In dependence on ν , our analytic formula yields ground-state energies, which monotonously increase from the bosonic to the fermionic side if $r_s > 1$. For $r_s \leq 1$, it shows a nonmonotonous behavior indicating a breakdown of the assumed continuous transformation of bosons into fermions by variation of the parameter ν . The obtained results is as follows.

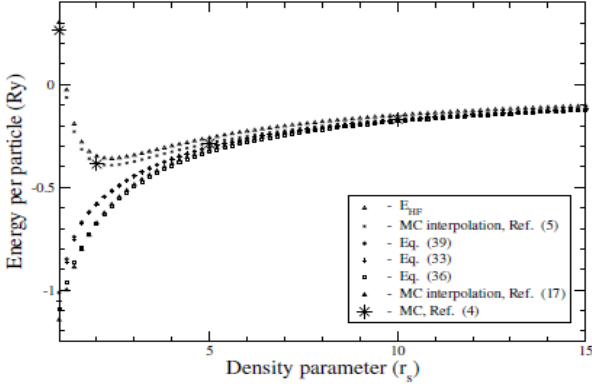


Fig. 7 Ground-state energies per particle vs density parameter r_s for range $1.0 \leq r_s \leq 15.0$ for fermions ($\nu = 1$) and bosons ($\nu = 0$).

In the fourth Chapter “**Ground state of charged anyon gas in strong magnetic field**” We present analytic formulas for the ground state energy of two-dimensional ($2D$) anyon gas in strong magnetic field (Landau level filling factor $\nu_L \leq 1$). The formulas are obtained by applying harmonic potential regularization for the vanishing confinement to harmonically confined Coulomb anyon gas. In a case of absence of the Coulomb interaction our analytic result provides an exact solution. It contains a contribution of the anyon gauge field characterized by the anyon parameters ν and $\nu_L \leq 1$. In a case of presence of the Coulomb interaction we introduce a function depending on the parameters ν , $\nu_L \leq 1$ and the density parameter r_s . The function is determined by fitting the Fano-Ortolani interpolation equation in the fractional quantum Hall effect regime for spin-polarized electrons and by consistence requirement with known results for the ground state energy of the $2D$ Coulomb Bose gas in strong magnetic field. We show that our formulas are valid not only for fermions ($\nu = 1$) but quite generally for anyons ($0 \leq \nu \leq 1$). The obtained results is as follows.

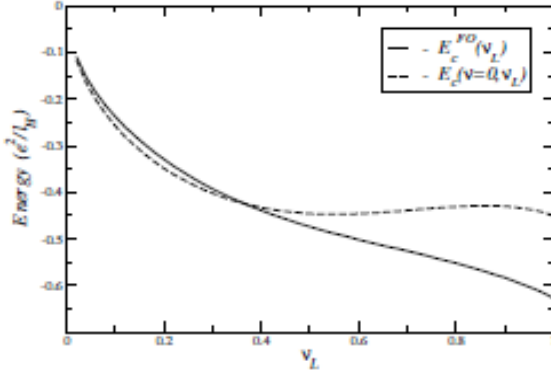


Fig. 8 Correlation energy per particle in the low Landau level (LLL) (expressed in e^2/l_H units) vs. ν_L for spin-polarized fermions, $E_c(\nu = 1, \nu_L) = E_c^{FO}(\nu_L)$, (solid line) and for bosons, $E_c(\nu = 0, \nu_L)$, (dashed line).

In the fifth Chapter “**Single boson mechanism of high temperature superconductivity**” we demonstrate this mechanism in recently visualized by Gomes et al., Nature 447, 569 (2007) the gap formation in nanoscale regions (NRs) above the critical temperature T_c in the high- T_c superconductor $\mathbf{Bi}_2\mathbf{Sr}_2\mathbf{CaCu}_2\mathbf{O}_{8+\delta}$. It has been found that, as the temperature lowers, the NRs expand in the bulk superconducting state consisted of inhomogeneities. The fact that the size of the HTS inhomogeneity (S.H. Pan et al., Nature 413, 282 (2001).) is close to the minimal size of the NR (Gomes et al., Nature 447, 569 (2007)) leads to a conclusion that the superconducting phase is a result of these overlapped NRs. In the present paper we perform the charge and percolation regime analysis of NRs and show that at the first critical doping \mathbf{x}_{c1} , when the superconductivity starts on, each NR carries the positive electric charge one in units of electron charge, thus we attribute the NR to a single hole boson, and the percolation lines connecting these bosons emerge. At the second critical doping \mathbf{x}_{c2} , when the superconductivity disappears, our analysis demonstrates that the charge of each NR equals two. The origin of \mathbf{x}_{c2} can be understood by introducing additional normal phase hole fermions in NRs, whose concentration appearing above \mathbf{x}_{c1} increases smoothly with the doping and breaks the percolation lines of bosons at \mathbf{x}_{c2} .

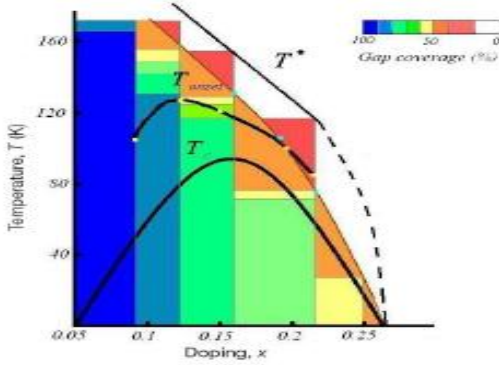


Fig. 9 Schematic single hole bosonic phase diagram for $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$.

x	$(10 \text{ \AA}/r_0)^2$	$(13 \text{ \AA}/r_0)^2$	$\xi_{coh}(\text{\AA})$	$(\xi_{coh}/r_0)^2$	ξ_{coh}/r_0	N_{ob}
0.28	1.939	3.277	10	1.939	1.393	~ 1
0.22	1.524	2.575	10	1.524	1.235	~ 2
0.16	1.108	1.873	11	1.341	1.158	~ 3
0.14	0.969	1.638	12	1.396	1.182	~ 3
0.10	0.693	1.170	13	1.170	1.082	~ 6
0.05	0.346	0.585	17	1.000	1.000	
0.04	0.277	0.468	18	0.897	0.947	
0.02	0.139	0.234	20	0.554	0.744	

Table 1 The doping x dependencies of NR charges. These charges calculated at fixed $\xi_{coh}=10 \text{ \AA}$ and $\xi_{coh}=13 \text{ \AA}$, respectively, for the coherent length ξ_{coh} , and for ξ_{coh} , taken from experiment. For last ξ_{coh} , charge $(\xi_{coh}/r_0)^2$ and percolation parameter ξ_{coh}/r_0 are presented. The values for the number N_{ob} of bosons surrounding every fermion are shown in the last column. The bold numbers are values of critical x_{c1} and x_{c2} and corresponding to these dopings NR charges. In summary of this chapter, we have formulated **the Coulomb single boson and single fermion two liquid model** positions for high temperature superconductivity (HTS) copper oxides:

The sixth and seventh sections of the dissertation are devoted to the

description of Chapters “**Non-Fermi liquid properties of cuprates I**” and “**Non-Fermi liquid properties of cuprates II**,” respectively. In the first Chapter we have carried out an attempt to describe in the unified anyon-related boson approach the PG phase electronic low- T (low-temperature) heat conductivity κ , entropy S and the insulating ground state (IGS), and low- T metal-insulating crossover (MIC) of cuprates. We have argued that the observed $\kappa \sim T^{3.6}$ and $\kappa \sim T$ is a result of $c \sim T^4$ and $c \sim T$ dependencies for the specific heat, respectively, while $S \sim T^i$ with $i > 1$ originates from $c \sim T^4$ of the specific heat c for ideal gas of Bogoliubov quasiparticles (IGBQ) of 2D Coulomb-interacting boson gas. Providing by the qualitative and quantitative arguments, we have attributed the downturn behavior of κ to the MIC and transition into the IGS. Assuming that the PG phase consisted from the mixture of IGBQ and 2D LFLT QP (Landau Fermi liquid theory quasiparticles) gas, we have obtained the Lorentz ratio values of Wiedemann – Franz law (WFL) , which were close to experimental ones.

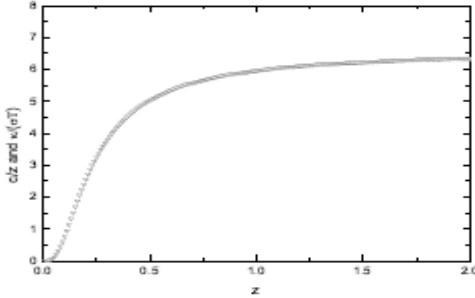


Fig. 10 The specific heat c/z (in $q^2/(8\pi\hbar^2)$ units) and $\kappa/(\sigma T)$ (in $k_B m v l / (2\pi\hbar^2 \sigma)$ units) as function of z . The definition of z : $z = T/(aq)^{1/2}$ for c/z and $z = K^{1/3}T/(aq)^{1/2}$ for $\kappa/(\sigma T)$, where $K \sim 10^{12}$.

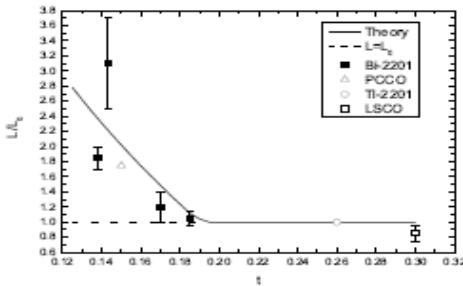


Fig. 11 The Lorentz ratio L/L_0 (Eq. (6.14)) vs. doping parameter t . Observed dots

are taken from experiments.

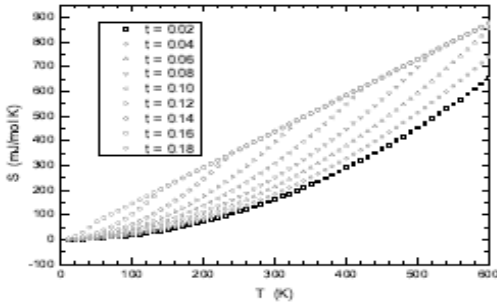


Fig. 12 The entropy S vs. T at various t .

Main results and conclusion

According to the results of the research carried out on the theme of the doctoral (DSc) dissertation "Anyons in the physics of condensed state" the following conclusions are drawn:

1. The new Complex Diffusion Monte Carlo (CDMC) method for the simulation of quantum systems, whose wave function contains the imaginary part, has been first in the time suggested.

2. The approximate analytic expressions for the ground state energy of 2D electrons in the harmonic trap and external magnetic field, and also of the infinite system of electrons with and without external magnetic field have been derived.

3. There was first in the time discovered the real bosonization of 2D fermions and anyons, on the base of which the new single boson mechanism for an explanation of the high-temperature superconductivity (HTS) in cuprates has been suggested.

4. After analysis of the scanning tunneling microscopy (STM) experiment on the visualization of a Cooper paring in HTS cuprates, it was first in the time found that the normal pseudogap and HTS states of cuprates consist from real space nanoregions with the charge one in the electron charge unity. It was proven that these observed nanorions are the single bosons.

5. After the study and analysis of the STM experiment, mentioned in the previous point of the conclusion, and application of the single boson mechanism for an explanation of the HTS, there was first in the time suggested the Coulomb single boson and single fermion two liquid model for understanding of all elements of the temperature – doping phase diagram of cuprates.

6. The set of non-Fermi liquid properties of cuprates on the base of this Coulomb two liquid model has been first in the time clarified.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019. FM.01.09 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
УЗБЕКИСТАНА**

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

АБДУЛЛАЕВ БАХОДИР

АНИОНЫ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

01.04.02 – Теоретическая физика

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

Ташкент–2022

Тема диссертации доктора (DSc) физико-математических наук зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.1.DSc/FM20.

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана.

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

Научный консультант: **Мусаханов Мирзаюсуф Мирзамахмудович**
Академик АН Узбекистана
профессор

Официальные оппоненты: **Накамура Катсумиро**
доктор наук, профессор

Явидов Бахром Янгигаевич,
доктор физико-математических наук, доцент,

Байзаков Бахтиер Байзакович,
доктор физико-математических наук.

Ведущая организация: **Институт ядерной физики АН Узбекистана.**

Защита докторской диссертации состоится “16” декабрь 2022 г. в 12:00 часов на заседании Научного совета DSc.03/30.12.2019. FM.01.09 при Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100174, г. Ташкент, Алмазарский район, ул. Университетская, дом 4. Тел. (+99871) 227-12-24; факс (+99871) 246-53-21; e-mail: nauka@nuu.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Национального Университета Узбекистана (регистрационный номер _____). (Адрес: 100174, г. Ташкент, Алмазарский район, ул. Университетская, дом 4. Тел. (+99871) 227-02-24).

Автореферат диссертации разослан “2” декабрь 2022 г.
(Реестр протокола рассылки № 10 от “3” декабрь 2022 г.)



М.М.Мусаханов,
председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, акад., д.ф.-м.н., профессор

Б.А. Файзуллаев,
ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, к.ф.-м.н., доцент

Б.Ж. Ахмедов,
председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и важность содержания диссертации. Последние несколько десятилетий характеризуются открытиями нескольких интересных явлений в физике конденсированного состояния. Среди них тяжелые фермионные металлы (ТФМ), дробный квантовый Холл эффект (ДКХЭ) и высокотемпературная сверхпроводимость (ВТС). В концепции анионов, статистика через анионный вектор потенциал вводится в Гамильтониан и эффект статистики частиц может быть исследован прямо при решении уравнения Шредингера. .

В нашей республике большое внимание уделяется фундаментальному исследованию физики конденсированных веществ, в котором теоретическое изучение рассматривается как очень важное. Направления этих фундаментальных исследований, которые имеют важное значение для развития науки в нашей стране, связаны со Стратегией Действий для дальнейшего развития Республики Узбекистан на 2017-2021. Научные объекты описанные выше являются очень вызывающими, так как они обеспечивают новое понимание фундаментальных аспектов физики. По этой причине лидирующие центры в мире активно работают в этих направлениях физики. Работа, описанная в диссертации, есть маленькая часть данной активности. Она служит, в определенной степени, как применение задач в соответствии с государственными нормативными документами, Указами Президента Республики Узбекистан за № УП-4947 “ О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан,” от 7 февраля 2017 года, также как “Дорожная карта основных направлений структурных реформ в Узбекистане на 2019-2021 годы,” опубликованной правительством Республики Узбекистан от 29 ноября 2018 года.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.

Диссертационное исследование было выполнено в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологии в Республики Узбекистан: II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

В годы независимости Республики Узбекистан, огромное внимание было уделено развитию теоретических и экспериментальных исследований в физике конденсированного вещества, а также их развитию в международном уровне.

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. Проблемы, возникающие в ТФМ и ВТС в купратах и других компаундах, связаны с физикой сильно коррелированных электронных материалов, в материалах, в которых обменное магнитное взаимодействие между

электронами является очень сильной. Теоретическое исследование этих проблем слишком сложно и поэтому до сих пор не было достигнуто никакого прогресса в нем. Физика ДКЭХ также принадлежит к классу сильно коррелированных электронных систем, однако, с меньшим магнитным взаимодействием между частицами. В нашей диссертации внимание будет уделено к физике ВТС и ДКЭХ. Существует надежда, что физика ТФМ и ВТС для 2D является универсальной. Предварительная оценка применения концепции анионов для ТФМ, произведенная нашей группой, показывает ее продуктивность.

Теоретические изучения фундаментальных аспектов ВТС и не Ферми жидкостных свойств 2D сверхпроводников являются крайне важными и актуальными. Они ведутся в лидирующих центрах мира в США, Европе, России, Японии и других стран. Каждая глава нашей диссертации будет обеспечена обширным набором ссылок, в которых можно найти имена профессоров и университеты и институты, где они работают. Кратко говоря, широко обсуждаемые в мировой литературе теоретические исследования показывают научную актуальность работ, выполненных в диссертации.

Степень изученности проблемы.

Как было сказано только что выше, научные проблемы, исследуемые в диссертации являются настолько сложными, что в течении нескольких десятилетий не было достигнуто почти никакого существенного прогресса в понимании каждого явления. Хотя, после определенных вариационных расчетов с применением численных методов и физических аргументов, было показано, что ДКЭХ может быть объяснен как набор квантовых жидкостей, состоящих из экзотических квазичастиц с анионной статистикой.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами высших образовательных и научно-исследовательских учреждений, где выполнена диссертация. Диссертация была выполнена в Институте Прикладной Физики Национального Университета Узбекистана и в самом Национального Университета Узбекистана в рамках следующих научных исследовательских проектов: в 2003-2007 годах в рамках проекта “Квантовая Механика Сильно Взаимодействующих Систем,” Государственного Комитета по Науке и Технологям, код 2.1.10; в 2007-2011 годах в рамках проекта “Квантовые Эффекты в Сильно Взаимодействующих Системах” Министерства Высшего и Среднего Специализированного Образования (МВССО) Узбекистана, код ОТ-Ф2-082; в 2012-2016 годах в рамках проекта “Теория Сильно Коррелированных Квантовых Систем” МВССО Узбекистана, код Ф-2-60 и в настоящее время, в течении 2017-2020 годах, в рамках проекта “Нелинейные, Много-Частичные, Квантовые и Классические Системы” с государственным кодом Узбекистана ОТ-Ф2-10. Автор

диссертации также признателен Фонду Фольксваген Германии за частичную поддержку исследовательской работы, когда проект "Studies of Two-Dimensional Coulomb Systems with the Anyon Concept" в 2004-2006 годах и проект "Anyon physics of ultracold atomic gases" в 2013-2019 годах были выполнены.

Целью исследования является изучение возможности применения концепции анионов для создания КМК метода для моделирования 2D анионов и фермионов, исследование энергии основного состояния для 2D электронных систем, локализованных в гармоническом потенциале и бесконечных, с и без внешнего магнитного поля, для создания альтернативного одно бозонного механизма сверхпроводимости ВТС, вместо стандартного механизма Куперовских пар.

Следующие **задачи исследования** были сформулированы для достижения данных целей: создать КМК метод для моделирования 2D анионов и фермионов;

исследовать энергию основного состояния для 2D электронных систем, локализованных в гармоническом потенциале и бесконечных, с и без внешнего магнитного поля;

создать альтернативный одно бозонный механизм сверхпроводимости ВТС, вместо стандартного механизма Куперовских пар;

исследовать не Ферми жидкостные свойства ВТС компаундов в рамках одно бозонного механизма.

Объектами исследования являются 2D реальные электронные системы: квантовые точки, бесконечные 2D системы и 2D ВТС сверхпроводники.

Предметом исследования являются различные физические свойства этих 2D систем.

Методы исследования. Для исследования в диссертации были использованы методы теории конденсированных веществ, квантовой и статистической механики и физики твердого состояния.

Научная новизна исследования. Впервые предложен новый Комплексный Диффузионный Монте Карло метод для моделирования квантовых систем.

Для 2D фермионов одно бозонный механизм высокотемпературной сверхпроводимости был впервые предложен.

Было доказано в диссертации, что заряд, обнаруженный в сканирующей туннельной микроскопии, есть одиночный бозон и чтобы понять все элементы фазовой диаграммы высоко температурных сверх проводников впервые предложена кулоновская двух жидкостная модель, состоящая из одно бозонов и одно фермионов.

Набор не Ферми жидкостных свойств купратов было впервые объяснено на основе этой кулоновской двух жидкостной модели.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Развитый в первой главе КМК метод может быть использован для квантового моделирования 2D фермионных систем и электронных систем, когда волновая функция системы имеет мнимую часть.

Аналитически полученные в следующих трех главах диссертации выражения для энергии основного состояния для квантовых точек и 2D бесконечных электронных систем могут быть использованы для сравнении с экспериментальными данными и результатами численных квантовых моделирований.

Если в будущем будет доказано экспериментально и теоретически, что не существует альтернативы развитому в следующих трех главах бозонному механизму интерпретации ВТС физики, будет получено новое фундаментальное понимание физики широкого класса 2D сверхпроводников.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных и хорошо известных методов КМК моделирования, расчета энергии основного состояния локализованных и бесконечных 2D электронных систем и методов исследования сверхпроводимости и свойств нормального состояния сверхпроводников.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная важность результатов исследования определяется фактом насколько эти результаты новые или нет с научной точки зрения. Другая их важность связана с новизной предложенных методов исследования. Анионный концепт есть новый подход для аналитического (хотя приближенного) исследования сложных 2D электронных систем. Практическая значимость применения этого концепта есть в его простоте.

Внедрение результатов исследования. Как было упомянуто выше, полученные в диссертации результаты посвящены актуальным проблемам физики конденсированного состояния. Каждая исследовательская работа в этом поле расширяет наше понимание природы физики, что является целью научной работы.

Апробация работы. Методы, развитые в диссертации, были использованы при выполнении проекта НУУ “Нелинейные, много частичные, квантовые и классические системы.”

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 реферируемых научных статьях международных журналов, как обзоры в 4 книгах, опубликованными международными издательствами, и также выложены 5 статей как электронные препринты в ArXiv. Все эти статьи рекомендованы Высшей аттестационной комиссией

Республики Узбекистан для публикаций основных научных результатов докторских диссертаций и абстрактах в трудах международных и местных научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка из 175 работ использованной литературы (опубликованные абстракты и некоторые электронные препринты ArXiv не указаны в этом списке). Объем диссертации составляет 169 страниц.

Основное содержание.

В первой главе диссертации мы предлагаем новый “**Комплексный Диффузионный Монте-Карло**” (КДМК) метод для моделирования квантовых систем с комплексной волновой функцией. В КДМК модуль и фаза волновой функции моделируются одновременно по сравнению с другими методами. Мы успешно тестируем КДМК моделированием основного состояния 2D электрона в магнитном поле и 2D фермионов-анионов в параболической яме. На Рис. (1) представлено пространственное распределение основного состояния электрона после моделирования с $m = 13$, где m есть орбитальное квантовое число. Из этого рисунка мы видим хорошее соответствие с точным решением для пространственного распределения, которое есть кольцо со средним радиусом $(2m + 1)^{1/2}$ и шириной 1 в единицах a_c магнитной длины (смотри, к примеру, учебник Нерелятиисткая Квантовая Механика Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц).

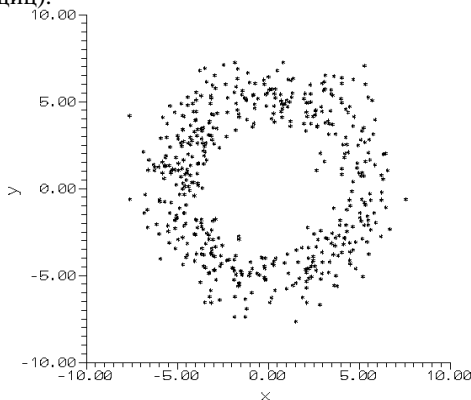
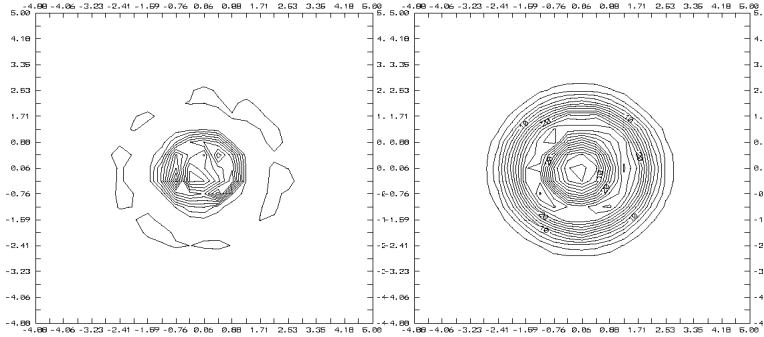


Рис. 1. Результат моделирования для пространственного распределения основного состояния электрона в равномерном магнитном поле с $m = 13$. Единица длины есть a_c , а начальное число моделируемых точек есть $N_c = 500$.



Рисунки 2 и 3. Квадрат модуля для основного состояния одной частицы для системы 6 фермионов в 2D гармоническом потенциале $|\Psi(\vec{r})|^2 = \int |\Psi(\vec{r} = \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_6)|^2 d\vec{r}_2 d\vec{r}_3 \dots d\vec{r}_6$. Результаты для моделирования и расчеты с использованием детерминанта Слэтера.

Во второй главе под названием “**основное состояние локализованного кулоновского анионного газа**” мы определяем аналитическое, приближенное выражение для энергии основного состояния для N анионов с кулоновским взаимодействием с дробной статистикой ν , $0 \leq |\nu| \leq 1$, локализованного в двумерной яме (с характерной частотой ω_0) во внешнем магнитном поле (с циклотронной частотой ω_c). Мы используем вариационный принцип, в комбинации с процедурой регуляризации, которая состоит в подгонке параметра обрезания с точными аналитическими результатами для невзаимодействующего случая и с численными расчетами для электронов в квантовых точках в случае со взаимодействием. Результирующее выражение зависит от параметров системы $|\nu|$, N , ω_0 , r_0 , a_B и ω_c , r_0 представляет характерную единицу длины и a_B есть Боровский радиус. Точность результатов критически оценивается сравнением точного, приближенного и численными результатами, взятыми из литературы. Полученные результаты имеют вид.

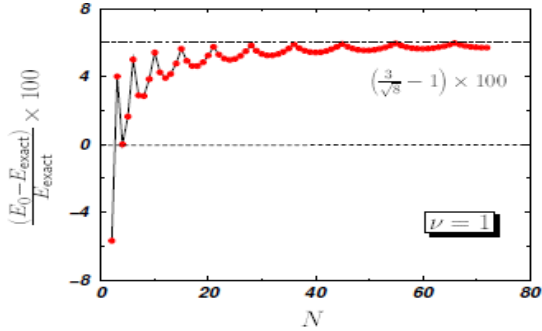


Рис. 4. Относительное отклонение (в процентах) полученной приближенной энергии основного состояния E_0 от точной энергии основного состояния E_{exact} для $N=72$ не взаимодействующих фермионов ($\nu = 1$), локализованных в параболической яме. Линия точка-тере указывает на асимптотическое значение ($N \rightarrow \infty$).

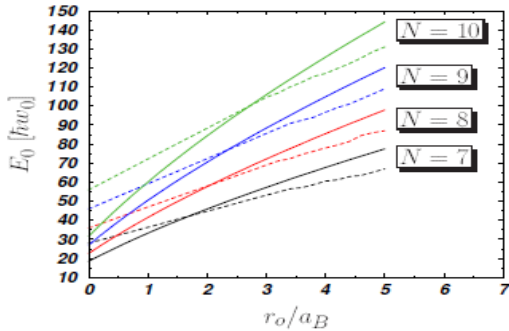
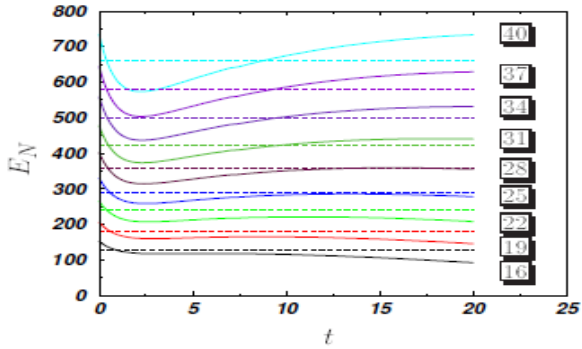


Рис. 5. Зависимость энергии основного состояния для 7 – 10 электронов как функция параметра взаимодействия r_0/a_B , рассчитанной в вариационном и фиксированном узлы Монте-Карло – кривые в тире -



методах.

Рис. 6. Энергия основного состояния $E_N = (E_0 - N\hbar\omega)/(\hbar\omega_0)$ для 16 - 40 электронов, рассчитанных используя полученное в диссертации выражение с $r_0/a_B = 1.911$ и $|v| = 1$ – сплошные кривые, и энергия для классических электронов – линии тире. Здесь $\omega = (\omega_0^2 + \omega_c^2/4)^{1/2}$ и $t = \omega_c/\omega_0$.

В третьей главе “**основное состояние заряженных анионных газов**” мы выводим приближенную аналитическую формулу для энергии основного состояния для газа из заряженных анионов. Наш подход основан на 2D кулоновском анионном газе, локализованном в гармоническом потенциале, при исчезающем потенциале локализации. Чтобы учесть наличие дробной статистики и кулоновского взаимодействия, мы ввели функцию (ν и r_s , соответственно). Мы определили эту функцию подгоняя энергию основного состояния к энергии классического электронного (2D Вигнеровского) кристалла для очень больших r_s , и энергии Хартри-Фока для спин поляризованного 2D электронного газа и 2D кулоновского Бозе газа для очень малых r_s . Полученные результаты имеют вид.

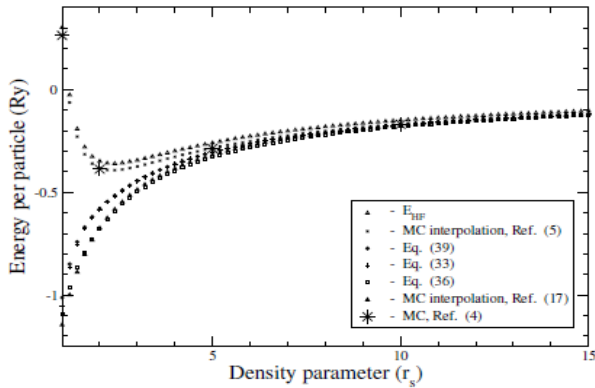


Рис. 7. Энергии основного состояний на частицу как функция параметра r_s для области $1.0 \leq r_s \leq 15.0$ для фермионов ($\nu = 1$) и бозонов ($\nu = 0$).

В четвертой главе “**основное состояние заряженного анионного газа в сильном магнитном поле**” мы определяем аналитическую формулу для энергии основного состояния для $2D$ анионного газа в сильном магнитном поле (факторы заполнения уровней Ландау $\nu_L \leq 1$). Эти формулы получены используя регуляризацией гармоническим потенциалом при его обнулении для удержания кулоновского анионного газа. В случае отсутствия кулоновского взаимодействия наш аналитический результат обеспечивает точное решение. Он содержит анионным калибровочное поле, которое характеризуется анионным параметром ν и $\nu_L \leq 1$. При наличии кулоновского взаимодействия мы вводим функцию, зависящую от ν , $\nu_L \leq 1$ и параметра плотности r_s . Эта функция определяется подгонкой к интерполяционной формуле Фано-Ортолани в режиме дробного квантового эффекта Холла для спин поляризованных электронов и энергии основного состояния $2D$ кулоновского бозевского газа в сильном магнитном поле. Мы показываем, что наша формула применима не только для фермионов ($\nu = 1$), но и для анионов ($0 \leq \nu \leq 1$).

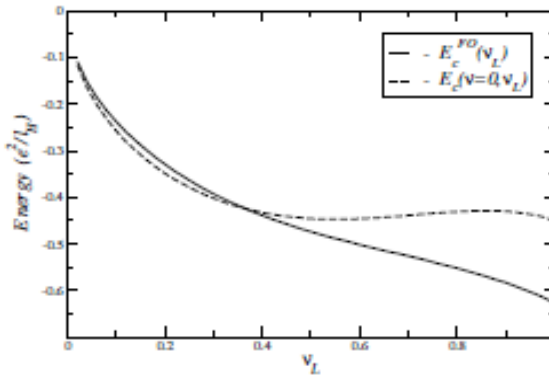


Рис. 8. Корреляционная энергия на частицу в наинижем уровне Ландау (выраженный в единицах e^2/l_H) как функция v_L для спин-поляризованных фермионов, $E_c(v = 1, v_L) = E_c^{FO}(v_L)$, (сплошная линия) и для бозонов, $E_c(v = 0, v_L)$, (штриховая линия).

В пятой главе “однобозонный механизм для высоко температурной сверхпроводимости” мы демонстрируем этот механизм в недавно обнаруженном Гомесом и др. Nature 447, 569 (2007) щели в нано области выше критической температуры T_c в ВТС $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$. Было показано, что при понижении температуры нано области расширяются, образуя объемную сверхпроводимость в виде неоднородностей. Тот факт, что размер ВТС неоднородностей близок к минимальным размерам этих неоднородностей Гомеса и др. ведет к заключению, что ВТС фаза есть результат их перекрытия. В настоящей работе мы делаем анализ зарядового и перколяционного режимов этих неоднородностей и показываем, что при первом критическом допировании x_{c1} , когда сверхпроводимость начинается, каждый нано регион несет положительный электрический заряд равный единице в единицах абсолютного электронного заряда. Поэтому мы приписываем этот заряд к единичному бозону дырке с перколяцией этих дырок. При втором критическом допировании x_{c2} , когда сверхпроводимость исчезает наш анализ показывает, что заряд каждого нано региона равняется двум. Происхождение x_{c2} можно понять введя нормальную фазу в нано области из дырок фермионов, чья концентрация, возникающая выше x_{c1} плавно увеличивается с допированием и нарушает линии перколяции бозонов при x_{c2} .

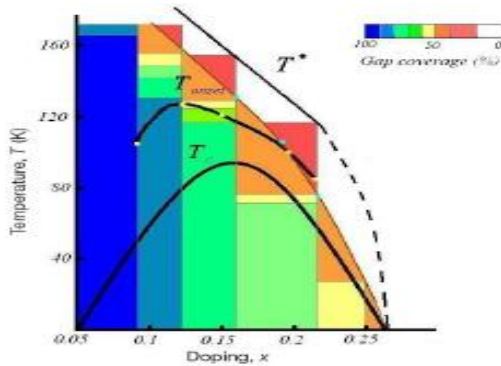


Рис. 9. Схематическая однодырочная, бозонная фазовая диаграмма для $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$.

x	$(10 \text{ \AA}/r_0)^2$	$(13 \text{ \AA}/r_0)^2$	$\xi_{coh}(\text{\AA})$	$(\xi_{coh}/r_0)^2$	ξ_{coh}/r_0	N_{ob}
0.28	1.939	3.277	10	1.939	1.393	~ 1
0.22	1.524	2.575	10	1.524	1.235	~ 2
0.16	1.108	1.873	11	1.341	1.158	~ 3
0.14	0.969	1.638	12	1.396	1.182	~ 3
0.10	0.693	1.170	13	1.170	1.082	~ 6
0.05	0.346	0.585	17	1.000	1.000	
0.04	0.277	0.468	18	0.897	0.947	
0.02	0.139	0.234	20	0.554	0.744	

Таблица 1. Допинг x зависимые нано региональные заряды. Эти заряды рассчитаны при фиксированных $\xi_{coh}=10 \text{ \AA}$ и $\xi_{coh}=13 \text{ \AA}$, соответственно, для когерентной длины ξ_{coh} , и для ξ_{coh} , взятых из эксперимента. Для последнего ξ_{coh} , зарядовый $(\xi_{coh}/r_0)^2$ и персоляционный параметры ξ_{coh}/r_0 представлены. Значения N_{ob} для числа бозонов, окружающих каждый фермион, показаны в последней колонке. Жирные числа есть значения критических допингов x_{c1} и x_{c2} и соответствующие этим допированиям заряды нано регионов.

В конце этой главы мы сформулировали положения **кулоновской одно**

бозонной и одно фермионной двух жидкостной модели для ВТС купратов.

Шестая и седьмые главы диссертации посвящены описанию глав “Не Ферми жидкостные свойства купратов I” and “Не Ферми жидкостные свойства купратов II,”соответственно. В первой главе мы сделали попытку описать в едином анионном, одно бозонном подходе псевдо щелевые электронные низко-температурные проводимость тепла κ , энтропию S и диэлектрическое основное состояние, и низко-температурный метал-диэлектрическое кроссовер купратов. Мы аргументируем, что найденные $\kappa \sim T^{3.6}$ и $\kappa \sim T$ есть результат $c \sim T^4$ и $c \sim T$ зависимостей для теплоемкости, соответственно, в то время как $S \sim T^i$ с $i > 1$ происходит от $c \sim T^4$ для теплоемкости c идеального газа Боголюбовских квазичастиц 2D бозоновского газа с кулоновским взаимодействием. Обеспечивая качественными и количественными аргументами мы связали провальное свойство коэффициента проводимости тепла κ с переходом метал-диэлектрик. Мы также вывели экспериментальные значения соотношения Лоренца закона Видемана-Франца.

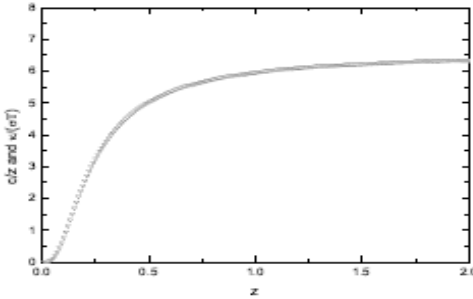


Рис. 10. Теплоемкость c/z (в единицах $q^2/(8\pi\hbar^2)$) и $\kappa/(\sigma T)$ (в единицах $k_B m v l / (2\pi\hbar^2 \sigma)$) как функция z . Определения z : $z = T/(aq)^{1/2}$ для c/z и $z = K^{1/3} T / (aq)^{1/2}$ для $\kappa/(\sigma T)$, где $K \sim 10^{12}$.

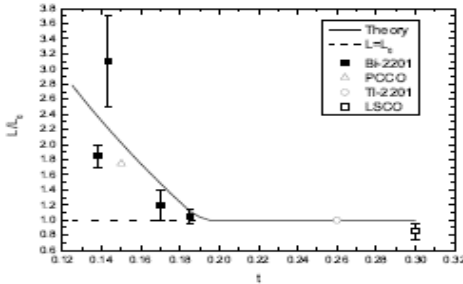


Рис. 11. Соотношение Лоренца L/L_0 как функция параметра допинга t . Точки, найденные в эксперименте значения.

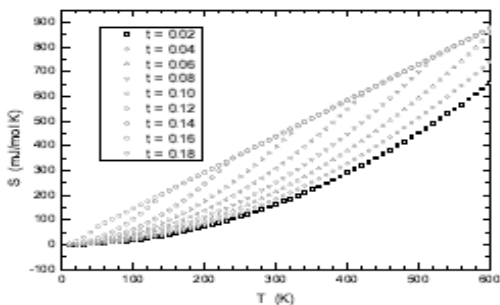


Рис. 12. Энтропия S как функция температуры T для различных t .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме докторской диссертации «Анионы в физике конденсированного состояния», представлены следующие выводы:

1. Впервые предложен новый Комплексный Диффузионный Монте Карло (КДМК) метод для моделирования квантовых систем, чья волновая функция содержит мнимую часть.

2. Было получено приближенное, аналитическое выражение для энергии основного состояния 2D электронов в гармоническом локализирующем потенциале и во внешнем магнитном поле, а также бесконечной системы электронов с и без внешнего магнитного поля.

3. Впервые была обнаружена реальная бозонизация 2D фермионов и анионов, на основе которой новый одно бозонный механизм высокотемпературной сверхпроводимости (ВТС) в купратах был предложен.

4. После анализа результатов эксперимента по визуализации Куперовских пар в ВТС купратах, используя сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), впервые было обнаружено, что нормальные псевдощелевые и сверхпроводящие состояния в ВТС купратах состоят из нанорегионов в реальном пространстве с зарядом один в электронных единицах заряда. Было доказано, что обнаруженные в эксперименте нанорегионы являются одно бозонами.

5. После изучения и анализа СТМ эксперимента, упомянутого в предыдущем пункте данного заключения, и применения одно бозонного механизма для объяснения ВТС, была впервые предложена кулоновская двух

жидкостная модель, состоящая из одно бозонов и одно фермионов, для понимания всех элементов фазовой диаграммы допирование-температура купратов.

6. Набор не Ферми жидкостных свойств купратов было впервые объяснено на основе этой кулоновской двух жидкостной модели.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ LIST OF PUBLISHED WORKS

І бЎлим (І part, І часть)

[1] B. Abdullaev, G. Ortiz, U. Rössler, M. Musakhanov, and A. Nakamura, "Approximate ground state of a confined Coulomb anyon gas in an external magnetic field" // Phys. Rev. B, 2003, vol. 68, P. 165105(1-9).

[2] Abdullaev B., Park C. -H. "Bosonization of 2D Fermions due to Spin and Statistical Magnetic Field Coupling and Possible Nature of Superconductivity and Pseudogap Phases Below E_g " // J. Korean Phys. Soc., 2006, vol. 49, P. S642–S646, 10 pages.

[3] Abdullaev B., Roessler U., Musakhanov M. "An analytic approach to the ground state energy of charged anyon gases" // Phys. Rev. B, 2007, vol. 76, P. 075403(1-7).

[4] Abdullaev B., Park C. -H., Musakhanov M.M. "Anyon bosonization of 2D fermions and single boson phase diagram implied from experiment on visualizing pair formation in superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ " // Physica C, 2011, vol. 471, P. 486–491. 6 pages.

[5] Abdullaev B., Abdullaev D.B. Park C. -H., Musakhanov M.M. "Intra pseudogap- and superconductivity-pair spin and charge fluctuations and underdome metal-insulator (fermion-boson)-crossover phenomena as keystones of cuprate physics" // Nanosystems: Phys. Chem. Math., 2015, vol. 6, P. 803–824, 22 pages **(01.00.00. № 5)**.

[6] Abdullaev B., Park C. -H., Park K. -S., Kang I. -J. "Metal-insulator (fermion-boson)-crossover origin of pseudogap phase of cuprates I: anomalous heat conductivity, insulator resistivity boundary, nonlinear entropy" // Nanosystems: Phys. Chem. Math., 2017, vol. 8, P. 48-58, 11 pages, **(01.00.00. №5)**.

[7] B. Abdullaev, D. B. Abdullaev, C. -H. Park, M. M. Musakhanov, "Normal state pair nematicity and hidden magnetic order and metal-insulator (fermion-boson)-crossover origin of pseudogap phase of cuprates II" // Nanosystems: Phys. Chem. Math., 2017, vol. 8, P. 59–70, 12 pages, **(01.00.00. №5)**.

- [8] B. Abdullaev, U. Roessler, and C.-H. Park, "Analytic approach to ground state energy of charged anyon gas in strong magnetic field" // Bull NUU 2020, vol. 3, P. 412-426, 15 pages, **(01.00.00. №8)**.
- [9] Abdullaev B., Musakhanov M., Nakamura A., "Complex diffusion Monte-Carlo method: test by the simulation of the 2D fermions" // Bull NUU 2020, vol. 3, P. 427-437, 11 pages. **(01.00.00. №8)**.
- [10] B. Abdullaev, U. Roessler, C.-H. Park, M.M. Musakhanov, "Possible fractional quantum Hall effect and Wigner crystal states in two-dimensional Coulomb gases as a result of anyon correlations" // Uzb J Phys, 2021 vol.23, P.1-7, 7 pages **(01.00.00. №5)**.

II бўлим (II part, II часть)

- [1] B. Abdullaev, M.~Musakhanov, A. Nakamura, Complex Diffusion Monte-Carlo method: tests by the simulations of 2D electrons in magnetic field and 2D fermions-anyons on parabolic well, Proc. of the Collaboration Meeting Quantum Monte Carlo: Recent Advances and Common Problems in Condensed Matter and Particle Physics,ECT, Trento(Italy),3 - 6 July, 2001, Editors: M. Camprostrini, Maria Paola Lombardo, Francesco Pederiva. EDIZIONI ETS, Pisa, pp. 12-24, 13 pages.
- [2] B. Abdullaev, Implicit Anyon or Single Particle Boson Mechanism of HTCS and Pseudogap Regime, in "Trends in Boson Research", edited by A. V. Ling, Nova Science Publisher Inc. N. Y., 2006, pp. 139-161, 23 pages.
- [3] B. Abdullaev and U. Roessler, Studies of Two-Dimensional Coulomb Systems with the Anyon Concept, Proc. of International Symposium of Volkswagen Foundation: Zwischen Europa und Orient - Mittelasiem/ Kuakasuk im Fokus der Wissenschaft, Berlin 29.11-1.12, 2006, pp. 96-97, 2 pages.
- [4] Abdullaev B. "Anyon Bosonized 2D Fermions or a Single Boson Physics of Cuprates: Experimental Evidences. In Low Dimensional Functional Materials" // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics 2013. Netherlands, Springer, 2013, pp. 251-268, 18 pages.
- [5] S.Z.Kanokova and B. Abdullaev, "Static and dynamic ground- state anyonic properties of 2D ultracold atomic gas with contact interaction in harmonic tra"// Abstract of Intern. School/Workshop "Anyon Physics of Ultracold Atomic Gases", Kaiserslautern 12-15 Decemb. 2014, Germany, 1 page.
- [6] B. Abdullaev, "Anyon Bosonized 2D Fermions or a Single Boson Physics of Cuprates: Experimental Evidences" // Abstract of Intern. School/Workshop "Anyon Physics of Ultracold Atomic Gases", Kaiserslautern 12-15 Decemb. 2014, Germany, 1 page.

[7] B. Abdullaev, “Single Boson Ground-State of Arbitrary 2D Fermi Systems: Prediction for Ultracold Gases and Its Experimental Evidences in Physics of High-Temperature Superconductors” // Abstract of Intern. Confer. “Quo vadis BEC? V”, Bad Honnef, 16-20 Decemb. 2014, Germany, 1 page.

Автореферат Ўзбекистон Республикаси Экология ва атроф-муҳитни муҳофаза қилиш давлат қўмитаси хузуридаги Атроф-муҳит ва табиатни муҳофаза қилиш технологиялари илмий-тадқиқот институтининг “Экология хабарномаси” илмий журнали таҳририятидан ўтказилди.

Бичими 60x84 1/16, “Times New Roman” гарнитурасида терилган.
Шартли босма табағи 2,5. Адади 40 нусхада.
“ADG copy center” босмахонасида чоп этилди.
100031, Тошкент шаҳар, Афросиёб кўчаси, 12