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

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

КАРИМБАЕВ ЭЛДОР ХАЛМУРАТОВИЧ

ЛЕГИРЛАНГАН КУПРАТЛИ ЮҚОРИ ҲАРОРАТЛИ ЎТА-ЎТКАЗГИЧЛАРДА ЭЛЕКТРОН ИССИҚЛИК СИҒИМИ АНОМАЛИЯЛАРИ

01.04.07 –Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Тошкент– 2021

УДК 537.312.62; 538.945

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

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

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

Каримбаев Элдор Халмуратович
Легирланган купратли юқори ҳароратли ўта-ўтказгичларда электрон иссиқлик сиғими аномалиялари 3

Каримбаев Элдор Халмуратович
Аномалии электронной теплоемкости в легированных купратных высокотемпературных сверхпроводниках 23

Karimbaev Eldor Xalmuratovich
Anomalies of electronic specific heat in doped high-T_c cuprate superconductors 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
List of published works 47

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

ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ

КАРИМБАЕВ ЭЛДОР ХАЛМУРАТОВИЧ

ЛЕГИРЛАНГАН КУПРАТЛИ ЮҚОРИ ҲАРОРАТЛИ ЎТА-ЎТКАЗГИЧЛАРДА ЭЛЕКТРОН ИССИҚЛИК СИҒИМИ АНОМАЛИЯЛАРИ

01.04.07 – Конденсирланган ҳолат физикаси

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

Тошкент– 2021

Физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида № B2017.2.PhD/FM70 рақами билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институтида бажарилган.

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

Илмий раҳбар:	**Джуманов Сафарали** физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	**Ашуров Мухсин Хуррамович** физика-математика фанлари доктори, профессор, академик
	Расулов Рустам Явкачович физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	**Андижон давлат университети**

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

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

Диссертация автореферати 2021 йил « » _____ куни тарқатилди.
(2021 йил “____”_____даги ____ рақамли реестр баённомаси)

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

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

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

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Ҳозирги кунда дунёда қатламли структурага эга бўлган янги легирланган кўп атомли мис-оксидли (купратли) $La_{2-x}(Ba,Sr)_xCuO_4$ ва $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) юқори ҳароратли ўта-ўтказгичларнинг (ЮҲЎЎ) нормал ва ўтаўтказувчан хоссаларини ўрганиш замонавий конденсирланган ҳолат физикаси ва материалшунослик (шу жумладан радиациявий материалшунослик) нинг муҳим ва устувор йўналишларидан бири ҳисобланади. Ноёб электрон хоссаларга эга бўладиган янги истиқболли ЮҲЎЎ-материалларни яратиш мақсадида бундай қатламли ЮҲЎЎ-купратларнинг янги экзотик хоссаларини турли хил ҳароратлар ва легирлаш даражаларида ўрганиш ҳам фундаментал ҳам амалий жиҳатдан долзарб масала ҳисобланади. Легирланган ЮҲЎЎ-купратларни жадал назарий ва экспериментал тадқиқ қилиш ишлари учинчи ўн йилликдан бери давом этиб келишига қарамасдан, бу материалларнинг кам легирланган, оптимал легирланган ва етарлича ўталегирланган режимларидаги ғайриоддий нормал (ўтаўтказувчанликнинг критик ҳарорати T_c дан юқорида) ва ўтаўтказувчан (T_c дан қуйида) хоссаларини тушунишга зарур бўладиган аниқлик йўқ. Шунинг учун кам легирланган ва оптимал легирланган $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (LSCO) ва YBCO ЮҲЎЎ-купратларнинг T_c дан юқори ҳароратлардаги ғайриоддий (аномалия) иссиқлик хоссаларини назарий тадқиқ қилиш жуда катта қизиқиш уйғотади ва ўта долзарб ҳисобланади.

Жаҳонда электрон иссиқлик сиғимининг псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* даги ва ўтаўтказувчанликнинг критик ҳарорати T_c даги ғайриоддийликлари кузатилган тажрибалар шуни кўрсатадики, ғайриоддий электрон-фонон ўзаро таъсирлашишлар ЮҲЎЎ-купратларда ҳал қилувчи аҳамиятга эга экан. Бунда иссиқлик хусусиятлари, хусусан, кам легирланган, оптимал легирланган ва етарлича ўталегирланган ЮҲЎЎ-купратларда ўтаўтказувчанликканинг критик ҳарорати T_c дан юқори ҳароратлардаги иссиқлик сиғими оддий ўтаўтказгичларнинг нормал ҳолатидаги худди шундай хусусиятларига нисбатан ғайриоддийдир. Бу фундаментал масалаларни T_c дан юқори ҳароратларда ток ташувчилар жуфтлашишининг ғайриоддий электрон-фонон механизмларига ва T_c дан қуйи ҳароратларда полярон Купер жуфтларининг тортишувчи Бозе-газининг ғайриоддий ўтаоқувчан конденсациясига асосланган ностандарт назарий ёндошувлар доирасида ечиш, легирланган ЮҲЎЎ-купратларда иссиқлик хусусиятлари муаммоларини ҳал қилиш билан биргаликда бу экзотик ўтаўтказгичларда псевдотирқиш ҳосил бўлишининг механизмларини ва янги ўтаўтказувчан ўтишларни аниқлашга имкон беради.

Ўзбекистонда сўнги йилларда конденсирланган ҳолат физикаси (хусусан, нанотаркибли ва ўтаўтказувчан материаллар физикаси ҳамда яримўтказгичлар физикаси) ва бу йўналишда дунё миқёсида эътиборга молик фундаментал тадқиқотларни ўтказишга катта эътибор қаратилмоқда. Ушбу фундаментал тадқиқотлар мамлакатимиз илм-фанининг ривожланишида катта аҳамиятга эгадир. Уларнинг амалий татбиғи 2017–2021 йилларда Ўзбекистон

Республикасини янада ривожлантириш бўйича ҳаракатлар стратегиясида[1] акс эттирилган.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”, 2017 йил 16 февралдаги ПФ-4958-сон “Олий ўқув юртидан кейинги таълим тизимини янада такомиллаштириш тўғрисида” фармонлари, 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-2789-сон “Фанлар академияси фаолиятини янада такомиллаштириш, илмий ишларни ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштириш бўйича чора тадбирлар тўғрисида”, 2019 йил 21 ноябрдаги ПҚ-4526-сон “Ядро физикаси институти илмий-тадқиқот фаолиятини қўллаб-қувватлаш чора-тадбирлари тўғрисида” қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишда ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот иши республика фан ва технологиялар ривожланишининг II. «Энергетика, энерготежамкорлик ва муқобил энергия манбалари» устувор йўналишига мувофиқ бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Ҳозирги вақтда жаҳонда легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон структураси, иссиқлик хусусиятлари, хусусан, электрон иссиқлик сиғимини назарий ва тажрибада ўрганиш бўйича кўплаб олимлар иш олиб бормоқда, жумладан, америкалик (P.W. Anderson, J.R. Schrieffer, D. Pines, S.A. Kivelson, P.A. Lee, C.M. Varma, D. Emin, A. Yazdani, A.C. Fang ва бошқ.), англиялик (A.S. Alexandrov, A. Carrington, J.R. Cooper, N.E. Hussey, J.W. Loram, J.L. Tallon, V.J. Emery, T. Rice ва бошқ.), швейцариялик (Ø. Fischer, Ch. Renner, C. Berthod ва бошқ.), канадалик (A. Damascelli, A. Kapitulnik), бельгиялик (J.T. Devreese ва бошқ.), хитойлик (H. When, L. Yu, Zhao ва бошқ.), японияли к (S. Uchida, Y. Koike, S. Ono, Y. Ando, M. Ido, A. Matsuda, T. Kato ва бошқ.), ҳиндистонлик (G. Baskaron, Inderhees ва бошқ.), россиялик (A.I. Larkin ва бошқ.) ва бошқа олимлар ишлаганлар. Ўзбекистонлик олимлар (С. Джуманов, Б.Я. Явидов, П.Ж. Байматов, Б. Абдуллаев) томонидан купратларнинг юқори ҳароратли ўтаўтказувчанлик механизмлари ва турли хил электрон хусусиятлари бўйича қатор тадқиқотлар олиб борилган.

Бу тадқиқотларнинг натижасида хитойлик олимлар (Zhao ва бошқ.) купратли ўтаўтказгичларнинг солиштирма электрон иссиқлик сиғимининг ҳароратга боғлиқлигидаги БКШ-симон ғайриоддийлик (кескин (сакраб) ўзгариш) нормал ҳолатда ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c дан юқори ҳароратларда намоён бўлишини тахмин қилдилар. Юқори ҳароратли ўтаўтказувчан купратларнинг юқорида келтирган хусусиятларини тушунтириш учун турли хил назарий моделлар таклиф этилди (Wu, Zhao,

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

С.Джуманов, Tallon, Садовский, Damascelli ва бошқ.). Кўп экспериментаторлар эса (Lee, Kresin ва бошқ.) ЮҲЎЎ-купратлардаги псевдотирқиш ҳодисасига ва юқори ҳароратли ўтаўтказувчанликда ностандарт электрон-фонон ўзаро таъсирлашувлар (полярон эффектини ҳисобга олган ҳолда) иштирок этишлари мумкинлигини кўрсатдилар. Баъзи тадқиқотчилар (С.Джуманов, Timusk, Tallon, Садовский, Lee, Kresin ва бошқ.) ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ҳолатидаги турли хил ғайриоддийликлар уларнинг уйғониш спектрларида маълум бир характеристик ҳарорат T^*дан қуйи ҳароратларда ҳосил бўладиган псевдотирқиш билан чамбарчас боғлиқ деб ҳисоблашади ва бу ЮҲЎЎ-материаллар $T_c<T^*$ ёки $T_c<<T^*$ ҳароратларда янги ўтаўтказувчанликка ўтишни бошдан кечирадилар. Ўтаўтказувчанликка ўтишнинг критик ҳарорати T_c дан юқорида ток ташувчиларнинг жуфтлашиши билан боғлиқ купратларнинг БКШ-симон псевдотирқишли ҳолати мавжуд эканлиги тўғрисидаги ғоя ва бу материалларнинг T_c дан юқорида солиштирма иссиқлик сиғимининг ҳароратга боғлиқлигидаги ғайриоддийликлар С. Джумановнинг ишларида назарий жиҳатдан ифодаланган.

Бироқ баъзи бир ЮҲЎЎ-купратларнинг кўпгина термодинамик хусусиятларини тушунишдаги ютуқларга қарамай, ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c дан юқорида LSCO ва YBCO бирикмаларнинг солиштирма иссиқлик сиғимининг ҳароратга боғлиқлигида ғайриоддийликлар келиб чиқишининг сабаби ҳақидаги савол ҳалигача баҳсли ва аниқланмаган. Ғайриоддийликларнинг келиб чиқиш муаммоси, яъни ЮҲЎЎ-купратларда T_c дан юқори ҳароратларда солиштирма иссиқлик сиғими $C_e(T)$ нинг қиймати кескин (сакраб) ўзгариши, бу бирикмаларнинг нормал ҳолатида нокогерент Купер жуфтлари ҳосил бўлиши билан боғлиқ муаммо шу кунгача ўрганилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация тадқиқоти Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти илмий-тадқиқотлар режасининг № ФА-Ф2-Ф070 “Реактор материаллари ва юқори ҳароратли ўтаўтказгичларнинг махсус электр, иссиқлик ва механик хоссаларини тадқиқ қилиш” (2007–2011), № Ф2-12 “Кучсиз легирланган купратлар электрон тузилишида псевдотирқишларнинг ҳосил бўлиш механизми ва уларнинг ўтаўтказувчанликка ўтиш температурасидан юқорида купрат-металл контактларининг туннел характеристикаларида намоён бўлиши” (2012–2013), № ФА-Ф2-Ф120 “Кичик ўлчамли юқори ҳароратли ўтаўтказгичлар, яримўтказгичли гетроструктуралар, металл ва уларнинг оксидларининг электрон хоссалари ва радиациявий такомиллаштирилиши” (2012–2016), № ОТ-Ф2-15 “Юқори ҳароратли ўтаўтказгичлар ва уларга ўхшаш конденсирланган системаларнинг янги ўта ўтказувчанлик ва ўта оқувчанлик хоссаларини назарий тадқиқ қилиш” (2017–2020) мавзусидаги илмий лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади юқори ҳароратли ўта-ўтказувчан LSCO ва YBCO купратларда ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳароратидан қуйи ва юқори ҳароратларда нормал ва ўтаўтказувчан ҳолатлардаги электрон иссиқлик

сиғимидаги ғайриоддийлик (аномалия) табиатини легирлаш даражасига боғлиқ ҳолда аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

легирланган ЮҲЎЎ-купратларда заряд ташувчиларининг мумкин бўлган турларининг табиатини ўрганиш;

легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ҳолатдаги электрон иссиқлик сиғимини ёритиб бериш учун аналитик ифодасини аниқлаш;

ЮҲЎЎ-купратларда БКШ-симон псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* дан юқори ва қуйи ҳароратларда электрон иссиқлик сиғимини ҳисоблаш;

легирлашнинг турли даражаларида ЮҲЎЎ-купратларда электрон иссиқлик сиғими $C_e(T)$ нинг номоён бўлиш эҳтимолини аниқлаш ва T^* атрофида $C_e(T)$ аномалияси табиатини ўрнатиш;

легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг нормалҳолатида T_c дан юқоридаэлектрон иссиқлик сиғими $C_e(T)$ нингҳароратга боғлиқ равишда ҳисобланган қийматларини мавжуд тажриба натижалари билан таққослаш;

легирланган ЮҲЎЎ-купратларда T_c яқинида ўта оқувчан Бозе-газининг иссиқлик сиғими учун аниқ аналитик ифодаларни олиш;

ЮҲЎЎ-купратларда уларнинг T_c яқинида ўта оқувчан ҳолатидаги электрон иссиқлик сиғимини ҳисоблаш ва T_c атрофида $C_e(T)$ нинг λ-симон аномалияси мавжуд бўлиш эҳтимоллигини аниқлаш;

легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг ўтаўтказувчан ҳолатида T_c яқинида электрон иссиқлик сиғими $C_e(T)$ нинг ҳароратга боғлиқ равишда ҳисобланган қийматларини мавжуд тажриба натижалари билан таққослаш.

Тадқиқотнинг объектини поляронлар ва биполяронлар, кам легирланган, оптимал легирланган ва мўътадил юқори легирланган ЮҲЎЎ-купратлар ташкил этади.

Тадқиқотнинг предметини ЮҲЎЎ-купратларда уларнинг турли хилдаги легирлаш даражаларида псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳароратлари T^* ва ўтаўтказувчанликка ўтишнинг критик ҳарорати T_c даги электрон иссиқлик сиғими аномалиялари ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Квант ва статик механиканинг математик аппарати, континуал модели, вариацион усул, рақамли усуллар, поляронларнинг БКШ-симон жуфтлашиши ва тортишувчан Бозе-газлар, биполяронлар ва Купер жуфтларининг ўтаоқувчан конденсациясини ўрганиш учун ўртача майдон усули.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

биринчи марта легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими бўйича эксперимент натижаларини қониқарли равишда тавсифловчи ҳарорат ва легирлаш даражасининг функцияси бўлган БКШ-симон псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* дан юқори ва қуйи ҳароратларда ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими учун аналитик ифода олинган;

БКШ-симон псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати $T^*>T_c$ да БКШ-симон фазавий ўтиш билан боғлиқ бўлган ўтаўтказувчанликка ўтишнинг критик

ҳарорати T_c дан юқорида ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими табиатининг аномалиялари аниқланган;

биринчи марта ўтаоқувчан Бозе-суюқлиги модели доирасида ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c атрофидаги ўтаўтказувчан ҳолатидаги ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими ифодаси олинган ва назарий ҳисобланган;

ЮҲЎЎ-купратлар $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ ва $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ни легирлаш даражасидан боғлиқ бўлган ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c да ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғимининг λ–симон аномалияларининг мавжуд бўлиш имкониятлари аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

турли даражаларида легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ва ўтаўтказувчан ҳолатларидаги электрон иссиқлик сиғими аномалияларини тушунтириш учун полярон модели доирасида микроскопик ёндошув ишлаб чиқилган;

ЮҲЎЎ-купратларнинг турли легирлаш даражаларида псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* даги ва ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c даги электрон иссиқлик сиғимлари учун янги аналитик формулалар олинган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги квант механикаси ва конденсирланган ҳолатлар назарий физикасининг замонавий усуллари ҳамда электрон иссиқлик сиғими учун янги формулаларни келтириб чиқаришда ўрта майдон БКШ-симон усулини қўллаш орқали, олинган илмий натижаларнинг эксперимент натижалари билан мувофиқлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти уларнинг легирланган купратли ўтаўтказгичлар ва шунга ўхшаш материалларнинг нормал ва ўтаўтказувчан ҳолатларида кузатиладиган электрон иссиқлик сиғимидаги ғайриоддийликлар тўғрисидаги физикавий тасаввурларнинг кенгайишига имкон беришидадир.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундаки, олинган легирланган ЮҲЎЎ-купратларда ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати ва псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳароратларидаги электрон иссиқлик сиғимининг λ-симон ғайриоддийликлари ҳосил бўлишлигидаги моделлар тасаввурларининг ривожланиши юқори ҳароратли ўтаўтказувчанлик ва псевдотирқиш ҳодисаларининг назарияларини ишлаб чиқишда сезиларли ютуқларга эришишга имкон беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ва ўтаўтказувчан ҳолатларида электрон иссиқлик сиғимидаги аномалиялари бўйича олинган илмий натижалар асосида:

БКШ-симон псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* дан юқори ва қуйи ҳароратларда ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими учун олинган аналитик ифодалар “Кичик ўлчамли ва кучли анизотроп ўтказгичларнинг қуйи ҳароратлардаги транспорт хусусиятлари” (2013–2017) илмий тадқиқот лойиҳасида ЮҲЎЎ-материалларнинг ғайриоддий термодинамик хусусиятларини ўрганишда қўлланилган (Украина Миллий Фанлар академияси Б.И. Веркин номидаги Паст ҳароратлар Физика-техника

институтининг 2021 йил 20 апрелдаги № 64/310-сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши юқори ҳароратли ўтаўтказгичларда электрон иссиқлик сиғимининг хусусиятини тушунтириш имконини берган;

ўтаўтказувчанликка ўтиш критик ҳарорати T_c дан юқори ҳароратларда ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими аномалияларининг ойдинлаштирилган табиати № 3079ГФ4 “Органик металл перовскитлар асосида янги юқори самарали қуёш элементларини яратиш ва тадқиқ қилиш” лойиҳаси доирасида полимер композит материалларнинг ғайриоддий электрон хусусиятларини ўрганишда қўлланилган (Ал-Фаробий номидаги Қозоғистон Миллий университетининг 2021 йил 21 апрелдаги № 19-9-1239-сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши наноструктурали қатламлар ва фотон кристалларидан фойдаланган ҳолда самарали қуёш элементларини яратишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш ва амалиётда қўллаш имконини берган;

ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c атрофида ўтаўтказувчан ҳолатдаги ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими учун олинган ифода ва назарий ҳисоблашлар № 3079ГФ4 “Органик металл перовскитлар асосида янги юқори самарали қуёш элементларини яратиш ва тадқиқ қилиш” лойиҳаси доирасида полимер композит материалларнинг ғайриоддий электрон хусусиятларини ўрганишда (Ал-Фаробий номидаги Қозоғистон Миллий университетининг 2021 йил 21 апрелдаги № 19-9-1239-сонли маълумотномаси) ҳамда чет эл олимлари томонидан LSCO ва YBCO бирикмали ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ҳолатида турли легирлаш даражаларидаги электрон иссиқлик сиғимининг аномалияларини ўрганишда қўлланилган (халқаро илмий журналлардаги ҳаволалар: Journal of Physics: Conference Series 592, 012075, 2015; International Journal of Modern Physics B 29, No.24, 1550180, 2015; Physics Letters A 383, 1330-1335, 2019). Илмий натижаларнинг қўлланилиши бир жинсли бўлмаган купратларда заряд кўчиришнинг табиатини тушунтиришга имкон берган;

ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c да LSCO ва YBCO бирикмали ЮҲЎЎ-купратларнинг легирлаш даражасидан боғлиқ бўлган электрон иссиқлик сиғимининг λ-симон аномалиялари мавжуд бўлишлигининг аниқланиши “Кичик ўлчамли ва кучли анизотроп ўтказгичларнинг қуйи ҳароратлардаги транспорт хусусиятлари” (2013–2017) илмий тадқиқот лойиҳаси доирасида ЮҲЎЎ даюқори ҳароратли псевдотирқишли ҳолатлар соҳасида кучли боғланган бозонлар ҳосил бўлиш имкониятини тушунтиришда қўлланилган (Украина Миллий Фанлар академияси Б.И. Веркин номидаги Паст ҳароратлар Физика-техника институтининг 2021 йил 20 апрелдаги № 64/310-сонли маълумотномаси). Илмий натижаларнинг қўлланилиши YBCO купратларида псевдотирқишнинг ҳароратга боғлиқлигининг максимумини БЭК-БКШ кроссоверининг ҳарорати сифатида танлаб олинишини асослашга имкон берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертация ишининг асосий натижалари 6 та халқаро ва республика илмий-амалий анжуманларида

ва халқаро мактабларда, Наманган давлат университети ва Материалшунослик институти илмий семинарларида муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси доирасида жами 11 та илмий иш нашр этилган, жумладан, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш тавсия этилган илмий нашрларда 4 та мақолалар, шулардан 1 таси ҳорижий журналда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация кириш, учта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иккита иловадан иборат. Диссертациянинг умумий ҳажми 95 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган. Республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган. Муаммонинг ўрганилганлик даражаси муҳокама қилинган, тадқиқотнинг мақсади ва вазифалари, тадқиқотнинг илмий янгилиги ҳамда амалий натижалари баён қилинган. Диссертация ишининг апробацияси ҳамда ишнинг ҳажми ва тузилиши ҳақида қисқача маълумот берилган.

Диссертациянинг **“Легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг термодинамик хусусиятлари тўғрисидаги мавжуд тушунчалар”** деб номланган биринчи бобида кристалл қаттиқ жисмларда, шу жумладан, ЮҲЎЎ материалларда заряд ташувчиларнинг энергетик соҳалари ҳосил бўлиш муаммосининг замонавий ҳолатини ҳамда ЮҲЎЎ купратларда уларнинг нормал ва ўтаўтказувчан ҳолатдаги термодинамик хусусиятларини тадқиқ этиш бўйича адабиётлардаги таҳлили берилган. Илмий адабиётларда мавжуд маълумотлар таҳлили асосида боб якунида диссертация ишининг мақсад ва вазифалари шакллантирилган.

Диссертациянинг **“ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ҳолатдаги электрон иссиқлик сиғими”** деб номланган иккинчи бобида купратларда электронларнинг бир жинсли бўлмаган тақсимланишини инобатга олиб ток ташувчиларнинг табиати, модификацияланган БКШ-симон модел ва T_c дан юқорида катта поляронларнинг прекурсив Купер жуфтлашиши, ЮҲЎЎ купратларда уларнинг нормал ҳолатдаги БКШ-симон псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* дан юқори ва қуйи ҳароратларда электрон иссиқлик сиғими қаралган.

ЮҲЎЎ купратлар ҳолатида T_c дан юқори ҳароратларда катта поляронларнинг прекурсив Купер жуфтлашиши табиий равишда БКШ назариясининг ноодатий шаклида ёзилади. Бундай БКШ формализм оралиқ электрон-фонон ўзаротаъсир режими БКШ-симон тирқиш ёки псевдотирқиш Δ^* ни ва псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* (Dzhumanov S. New York: Nova Science Publishers, 2013.–P.365) ни аниқловчи тенгламага олиб келади:

$$\frac{1}{\lambda^*} = \int_0^{\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2+\Delta^{*2}(T)}} \tanh \frac{\sqrt{\varepsilon^2+\Delta^{*2}(T)}}{2k_B T}, \quad (1)$$

бу ерда $\lambda^* = \mathrm{D_p}(\varepsilon_\mathrm{F})\tilde{V}_p$– эффектив БКШ-симон ўзаротаъсир доимийси, $D_p(\varepsilon_F)=1/\varepsilon_F$– спиннинг бир ориентацияси учун поляронларнинг Ферми сатҳидаги ҳолатлар зичлиги, ε– поляронли Ферми энергияси $\varepsilon_F=\hbar^2(3\pi^2 n)^{2/3}$ дан айрилган катта поляронлар энергияси, $n=N_1/\Omega$– CuO_2 қатламдаги хусусий поляронлар концентрацияси, N_1– шундай поляронлар сони, Ω– кристалл ҳажми, $\tilde{V}_p = V_{ph} - \tilde{V}_c$– полярон-полярон ўзаротаъсир эффектив потенциали, V_{ph}–фононлар воситачилигидаги икки полярон ўртасидаги ўзаротаъсир потенциали, $\tilde{V}_c = V_c/\left[1 + \mathrm{D_p}(\varepsilon_\mathrm{F})V_c \ln\left(\varepsilon_\mathrm{c}/\varepsilon_\mathrm{A}\right)\right]$– поляронлар орасидаги экранланган Кулон ўзаротаъсир потенциали, V_c– асос Кулон потенциали, $\varepsilon_A=E_p+\hbar\omega_0$– ноодатий тортишувчи электрон-фонон ўзаротаъсир узилиш параметри.

$T=T^*$ ва $\varepsilon_c>\varepsilon_A\gg k_B T^*$ муносабат бажарилса, (1) дан қуйидаги тенгламани оламиз:

$$k_B T^* = 1.134\left(E_p + \hbar\omega_0\right)\exp\left[-\frac{1}{\lambda^*}\right]. \quad (2)$$

(2) тенгламадан кўринадики, $T_c=T^*$ да одатий БКШ тасвир, юқори легирланган купратларнинг хусусий ҳолидаги каби амалга ошади, яъни полярон эффекти йўқолади ва (2) тенглама экспоненциал олдидаги кўпайтма $\hbar\omega_0$ га алмашади.

Легирланган купратларда заряд ташувчилар бир жинсли тақсимланмаган (яъни, киритма марказлари CuO_2 қатламдагига қараганда кўп заряд ташувчиларга эга бўлиши мумкин ёки аксинча) ва бундай бир жинсли бўлмаган заряд ташувчиларнинг тақсимланиши киритмаларсиз соҳаларда ва киритмалар яқинида хусусий ва хусусий бўлмаган (яъни киритмали) катта поляронларнинг ҳосил бўлишига олиб келиши мумкин. Кам ва оптимал легирланган купратларда зарядларнинг бир қисми киритмалар билан боғланган катта поляронларнинг ҳосил бўлиши билан, киритмалар яқинида енгил автолокаллашишини, зарядларнинг қолган қисми эса хусусий катта поляронлар ҳосил бўлиши билан деформацияланган кристалл панжарада автолокаллашишини кутиш мумкин. Бундай рақобатлашадиган автолокаллашиш жараёнлари киритмали ҳудудлар ва киритмали марказлар ўртасидаги полярон ток ташувчиларининг қайта тақсимланишига олиб келади. Шунинг учун, ЮҲЎЎ-купратларнинг ғайриоддий металл ҳолатларида T^* дан қуйида поляронли соҳасида катта поляронларнинг БКШ-симон Купер жуфтлашиши содир бўлади деб тахмин қилиш мумкин, у ҳолдакиритмалар яқинида локаллашган катта поляронлар жуфтлашмай қолиши мумкин. T^* дан юқори ҳароратларда бу икки хил турдаги катта поляронлар $C_e(T)$ га ўз ҳиссаларини қўшади ва электрон иссиқлик сиғими қуйидаги тенглама орқали аниқланади:

$$C_e(T > T^*) = (\gamma_{e1} + \gamma_{e2})T, \quad (3)$$

бу ерда $\gamma_{ei} = 2\pi^2 D_p(\varepsilon_{Fi})k_B^2/3 = (\pi^2/3)k_B^2 g(\varepsilon_{Fi})$ (i=1,2), (ε_{Fi})=$3N_i/2\varepsilon_{Fi}$=$3Nf_i/2\varepsilon_{Fi}$ – полярон сатҳидаги Ферми ε_{Fi} ҳолатлар зичлиги (иккала спин йўналишларини ҳам ҳисобга олган ҳолда), N_i– i-чи типдаги катта поляронлар сони, $N=N_1+N_2$– системадаги поляронли ток ташувчиларнинг тўлиқ сони, $f_i=N_i/N$– i-чи типдаги катта поляронли ток ташувчиларнинг улуши.

Легирланган купратларда $C_e(T>T^*)$ нинг чизиқли ҳад коэффициенти қуйидагича аниқланади:

$$\gamma_e = \gamma_{e1} + \gamma_{e2} = \frac{\pi^2}{2} k_B^2 x N_A \left(\frac{f_1}{\varepsilon_1} + \frac{f_2}{\varepsilon_2}\right), \tag{4}$$

бу ерда биз CuO_2 қатлам бирлигидаги (ёки панжарадаги атомлар) сони бирлик моляр ҳажмдаги Авогадро сони N_A=6,02×10^{23} моль$^{-1}$ га тенг деб ҳисобга олдик, $x=N/N_A$– ток ташувчиларнинг бирликсиз концентрацияси, k_BN_A=8,314 Дж/моль · К.

Легирланган ЮҲЎЎ купратлардаги ҳақиқий экспериментал вазиятни ва $C_e(T)$ ни миқдорий жиҳатдан ёритиб берадиган муҳим параметрлар ε_{Fi} ва f_i ҳисобланади. LSCO ва YBCO бирикмалари учун γ_e нинг қийматини баҳолаймиз. ε_{Fi} ва f_i нинг поляронли (ε_{F1}≃0.15 эВ, f_1=0.6) ва киритмали (ε_{F2}=0.06 эВ, f_2=0.4) соҳалардаги ўзига хос қийматларидан фойдаланиб LSCO учун x=0.1 да γ_e≃5,67мДж/моль · К^2 қийматни оламиз. γ_e нинг экспериментдаги қиймати (4.9–7.3) мДж/моль · К^2 оралиқда ётади. YBCO бирикма учун легирлаш даражасини қуйидаги муносабатдан аниқласа бўлади (M. Muroi et al. Physica C 246 (1995) 357):

$$x(\delta) = \begin{cases} (1-\delta)^3 \textit{для} \quad 0 \le 1-\delta \le 0.5\,, \\ (0.5-\delta)^3 + 0.125 \quad \textit{для} \quad 0.5 < 1-\delta \le 1\,, \end{cases} \tag{5}$$

x(δ=0.115)≃0.182 шундан келиб чиқади. YBCO учун ε_{F1}=0.20 *эВ*, ε_{F2}=0.1 *эВ*, f_1=0.6 ва f_2=0.4 инобатга олиб, γ_e=4,65 мДж/моль · К^2 ни топамиз. γ_e нинг бу қиймати YBCO учун тажрибада олинган натижалар γ_e≃4.3–4.9мДж/моль · К^2 (A. Junod, et al. Physica C 185-189 (1991) 1399) билан мос тушади.

БКШ-симон псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* дан қуйида, $C_e(T)$ уч турдаги заряд ташувчилар улушини беради: (i) поляронли соҳадаги Купер жуфтларининг диссоциацияси (уйғониши) билан пайдо бўлувчи Боголюбов квазизарралари, (ii) киритмали ҳудуддаги жуфтлашмаган поляронлар ва (iii) нокогерент (ўтаўтказгич бўлмаган) Купер жуфтларининг идеал Бозе-гази. $C_e(T)$ даги Боголюбов квазизарраларининг улушини қуйидагича аниқланилади:

$$C_{e1}(T < T^*) = \frac{g(\varepsilon_{F1})}{k_B T^2} \int_0^{\varepsilon_A} f(E)\big(1 - f(E)\big)\left[E^2(\varepsilon) - \frac{T}{2}\frac{d\Delta^{*2}(T)}{dT}\right], \tag{6}$$

бу ерда $g(\varepsilon_{F1}) = 3N_A x f_1/2\varepsilon_{F1}$, $f(E) = \left[e^{E/k_BT} + 1\right]^{-1}$, $E(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^{*2}(T)}$.

БЭК ҳарорати $T_{БЭК}$ дан қуйида идеал Бозе-газнинг энергияси қуйидагича аниқланади (Landau L., Lifshitz E., Stat. Phys. Part I. –M: Nauka, 1976. P.530.):

$$U = 0.77 N_c k_B T \left(\frac{\mathrm{T}}{T_{\text{БЭК}}}\right)^{3/2}, \quad (7)$$

бу ерда N_c– Бозе-зарраларининг сони. Бундай нокогерент Купер жуфтли Бозе-газнинг иссиқлик сиғими қуйидаги муносабатдан аниқланади:

$$C_{e3}(T < T^*) = \frac{\mathrm{dU}}{dT} = 1.925 k_B N_c \left(\frac{\mathrm{T}}{T_{BEC}}\right)^{3/2}. \quad (8)$$

У ҳолда, T^* дан қуйи ҳароратларда тўлиқ электрон иссиқлик сиғими қуйидаги тенгламадан аниқланади:

$$C_e(T < T^*) = C_{e1}(T) + C_{e2}(T) + C_{e3}(T), \quad (9)$$

бу ерда $C_{e2}(T < T^*) = (\pi^2/2) k_{\mathrm{B}}^2 T g(\varepsilon_{\mathrm{F2}})$–киритмали соҳадаги жуфтлашмаган поляронларнинг иссиқлик сиғими ва $\mathrm{g}(\varepsilon_{\mathrm{F2}}) = 3\mathrm{N_A} x \mathrm{f_2}/2\varepsilon_{\mathrm{F2}}$.

Поляронли ток ташувчиларнинг БКШ-симон жуфтлашиши юз берадиган псевдотирқиш $\Delta^*(T)$ ни ва бу псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати T^* ни (1) тенгламадан аниқланади. ЮҲЎЎ купратларнинг нормал ҳолатида ҳосил бўлувчи бундай псевдотирқишларнинг қиймати T^* дан анча паст ҳароратларда қуйидаги ифодадан аниқланади ва $0.75T^*<T\leq T^*$ ҳароратлар оралиғида энг яхши яқинлашиш ҳисобланади:

$$\Delta^*(T) = 3.06 k_B T^* \sqrt{1 - \frac{T}{T^*}}. \quad (10)$$

1- расмда БКШ-симон псевдотирқиш Δ^* нинг ҳароратга боғлиқлиги, (1) ифоданингλ^*=0.57, T^*=98 К қийматлардаги аналитик ечими ва (10) ифоданинг T^*=98 К қийматдаги рақамли ечимлари таққосланган. 1- расмдан, бу яқинлашишлар $0.75T^*<T\leq T^*$ ҳароратлар оралиғида жуда яхши яқинлашишлар ва бизнинг ҳисоблашларимиз учун етарли эканлигини кўриш мумкин, аммо паст ҳароратларда улар орасида оғишлар мавжуд.

Нокогерент Купер жуфтларининг сони N_c ва уларнинг БЭК ҳарорати мос равишда қуйидаги ифодалардан аниқланади:

$$N_c = \frac{1}{4} \mathrm{g}(\varepsilon_{\mathrm{F1}}) \int_{-\varepsilon_A}^{\varepsilon_A} \left[1 - \frac{\varepsilon}{E}\right] \frac{\mathrm{e}^{E/k_B T}}{\mathrm{e}^{E/k_B T} + 1} d\varepsilon, \quad (11)$$

ва

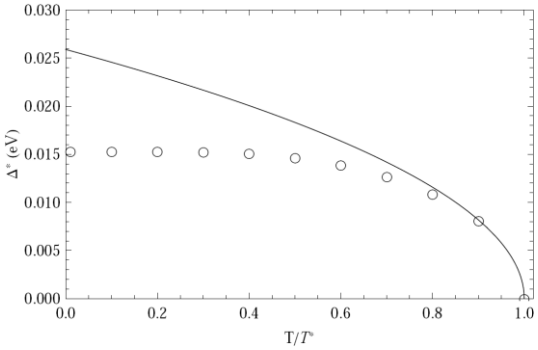
$$T_{БЭК} = \frac{3.31 \cdot \hbar^2}{k_B m_c} N_c^{\ 3/2}, \quad (12)$$

бу ерда m_c=2m_p– полярон Купер жуфтлари массаси, $\varepsilon_{F1}>\varepsilon_A$=0.1 эВ, m_p=2m_e.

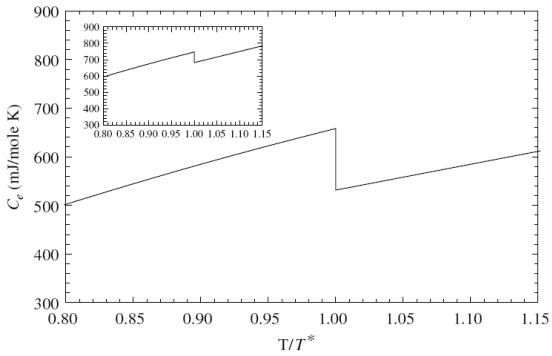
N_c ва $T_{\text{БЭК}}$ катталикларнинг рақамли ҳисоблашлари T^* га яқинроқ жойда $T_{\text{БЭК}}$ нинг қиймати T^* га жуда яқин (яъни, $T_{\text{БЭК}}\geq T^*$), лекин T^* анча кичикроқ бўлганда $T_{\text{БЭК}}\gg T^*$ муносабатни кўрсатди ва $C_e(T>T^*)$ ҳисоблаш натижалари, ε_{Fi} ва f_i катталиклар ўзгариши ҳисобига содир бўладиган, поляронли ва киритмали соҳалардаги полярон ток ташувчиларнинг тақсимланишига сезиларли боғлиқ. Умуман олганда, $C_e(T)$ нинг номоён бўлиши ε_{Fi}, f_i, x параметрларни танлашга сезиларли боғлиқ ва бизни ўзаро мос ҳисоблашлар натижасида, поляронли ва киритмали соҳалар ўртасидаги заряд

ташувчиларнинг ўзгаришини тегишли тақсимотидаги ўзгаришларни ҳисобга олган ҳолда тажриба билан таққослаш учун фойдаланишга ундайди деб хулоса чиқаришимизга олиб келади. Легирланган ЮҲЎЎ купратлар учун C_e ва C_e/T катталиклар учун кузатиладиган ҳароратга боғлиқликни янада мосроқ танлов ва мос келадиган параметрларни синчковлик билан ўрганиш орқали олиш мумкин. Бундай танлов турли ЮҲЎЎ купратларда $C_e(T)$ бўйича назария ва тажрибани мос тушириш учун зарур. $T=T^*$ да $C_e(T)$ нинг миқдорий хусусиятлари, асосан, $C_e(T)$ га псевдотирқиш ва киритма эффектлари ўртасидаги рақобат билан белгиланади. Бу рақобат кам ва оптимал легирланган ЮҲЎЎ купратларда T_c дан юқорида $C_e(T)$ нинг мумкин бўлган БКШ-симон сакрашларнинг шакли ва ўлчамини аниқлаб беради. Уйғонган Купер жуфтларининг Ферми компоненталари ва ўтаўтказгич бўлмаган бозон Купер жуфтларининг ҳиссаси туфайли $C_e(T<T^*)$ га БКШ-симон улуши киритмали соҳадаги жуфтлашмаган ток ташувчиларнинг улушидан устунлик қилганда, T^* да $C_e(T)$ нинг БКШ-симон аномалияси ўзини ёрқин намоён қилади (2-расм). Аммо, $C_e(T)$ да киритманинг ҳиссаси БКШ-симон ҳиссадан устунлик қилса, у ҳолда вазият сезиларли равишда ўзгаради. Бу ҳолда, $C_e(T)$ боғлиқлик, T_c дан юқорида $C_e(T)$ га киритманинг нисбатан катта улуши ҳисобига сезиларли даражада ўзгаради ва $C_e(T)$ даги боғлиқликнинг бузилиши заифлашади ёки БКШ-симон аномалия камроқ намоён бўлади ва бу тажрибаларда ҳам кузатилади. 2-расмда легирлаш даражаси x=0.10 бўлган кам легирланган ўтаўтказувчан купратнинг электрон иссиқлик сиғимининг T/T^* келтирилган ҳарорати T^*=140 K яқинида функциясига боғлиқлигининг параметрлар $\varepsilon_{F1}\simeq0.189$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.043$ эВ ва f_1=0.7, f_2=0.3 дан фойдаланилган ҳолдаги графиги келтирилган. 2-расм кўргазма қисмида айнан ўша ўтаўтказувчан купратнинг электрон иссиқлик сиғимининг T/T^* келтирилган ҳарорати T^*=160 K яқинида функциясига боғлиқлигининг поляронли ва киритмали соҳалар ўртасидаги ток ташувчиларнинг қайта тақсимланишига мос келадиган параметрлар $\varepsilon_{F1}\simeq0.086$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.068$ эВ ва f_1=0.15, f_2=0.85 дан фойдаланилган ҳолдаги графиги келтирилган.

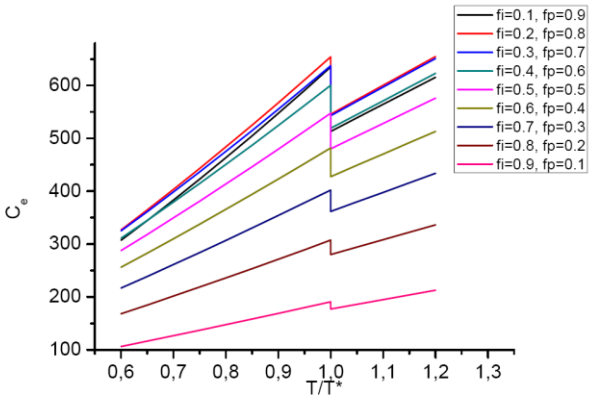
Ундан ташқари, 3- ва 4-расмларда легирлаш даражаси x=0.10 бўлган кам легирланган ўтаўтказувчан купратнинг $C_e(T\leq T^*)$ ва $C_e(T\leq T^*)/T$ ларнинг назарий ҳисобланган T/T^* келтирилган ҳарорати T^*=140 K яқинида функциясига боғлиқлигининг $\varepsilon_{F1}\simeq0.189$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.043$ эВ ҳамда турли хилдаги f_1 ва f_2 нинг поляронли ва киритмали соҳалар ўртасидаги ток ташувчиларнинг қайта тақсимланишига мос келадиган параметрлар фойдаланилган холдаги, ҳамда T/T^* келтирилган ҳарорати T^*=160 K яқинида функциясига боғлиқлигининг параметрлар $\varepsilon_{F1}\simeq0.086$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.068$ эВ ва f_1=0.42, f_2=0.58 дан фойдаланилган ҳолдаги графиклари келтирилган.



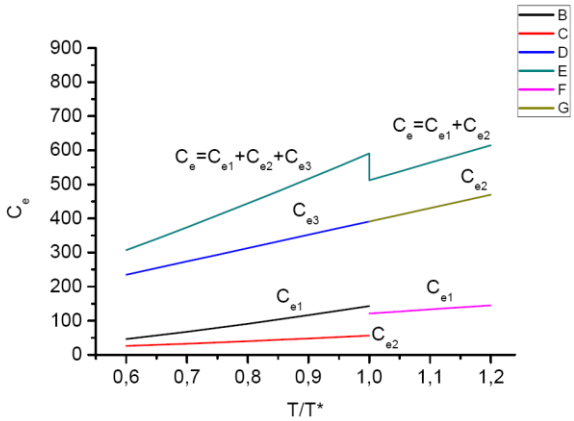
1-расм. Псевдотирқиш Δ^* ва унинг ҳосил бўлиш ҳарорати T^* ҳароратга боғлиқлиги.



2-расм. Легирланган ўтаўтказувчан купратнинг электрон иссиқлик сиғими; кўргазма: айнан ўша ўтаўтказувчан купратнинг электрон иссиқлик сиғими.



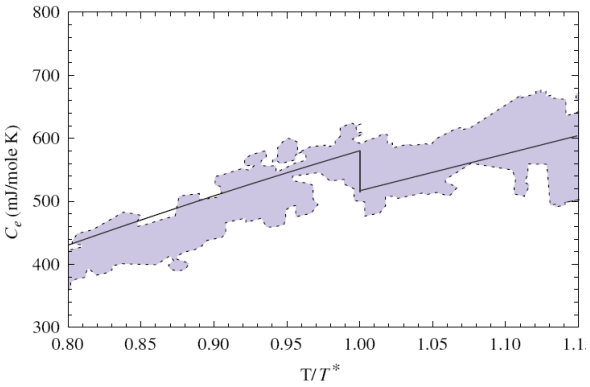
3-расм. Легирланган ўтаўтказувчан купратнинг электрон иссиқлик сиғими T/T^* келтирилган ҳарорати функциясига боғлиқлиги



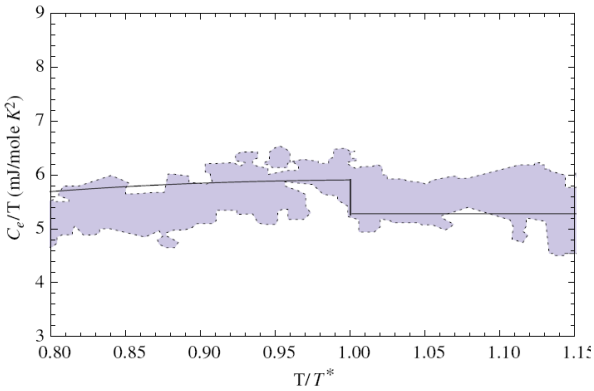
4-расм. Легирланган ўтаўтказувчан купратнинг электрон иссиқлик сиғими T/T^* келтирилган ҳарорати функциясига боғлиқлиги

5- ва 6-расмларда $0.8T^*<T\leq1.15T^*$ ҳароратлар оралиғида $C_e(T\leq T^*)$ ва $C_e(T\leq T^*)/T$ ларнинг назарий ҳисобланган қийматлари ҳамда Ода гуруҳининг LSCO бирикмаси электрон иссиқлик сиғими бўйича тажриба натижалари таққосланган. 5- ва 6-расмларда кўрсатилган $C_e(T)$ ва $C_e(T)/T$ ларнинг $T\leq T^*$ ва $T>T$ ҳароратларда намоён бўладиган ўзини тутиши $C_e(T)$ ва $C_e(T)/T$ лар назарий ҳисоблашлар натижалари жуда ўхшашлигига эътибор қаратиш муҳим. $C_e(T)$ ва $C_e(T)/T$ нинг қийматлар кўлами (5- ва 6-расмлардаги узликли чизиқлар орасидаги бўялган соҳага қаранг) етарлича катта эканлигини тажриба натижаларидан кўриш мумкин. Шунга қарамай, LSCO бирикмаси учун T^*яқинида $C_e(T)$ и $C_e(T)$/T боғлиқликларда кам ёки кўп сезиларли БКШ-симон сакрашлар мавжуд. ЮҲЎЎ купратларда T_c дан юқорида кузатиладиган, T^* яқинида $C_e(T)$ сакраши (5-расмга қаранг) шакли ва ўлчамлари бўйича БКШ-симон зинали аномалиясига жуда ўхшаш. LSCO ва YBCO бирикмалар учун $C_e(T)$ нинг 5- ва 6-расмларда кўрсатилган, тажрибаларда юзага келиши мумкин бўлган бузилиш ва тажриба хатолиги ҳамда тажриба нуқталарининг етарлича катта тарқалишини ҳисобга олган ҳолда (масалан, 5- ва 6-расмлар), биз $C_e(T)$

учун ҳисобланган натижаларимиз тажриба натижалари билан қониқарли мослик мавжуд деб ишонч билан айтишимиз мумкин.



5-расм. Легирлаш даражаси x=0.10 бўлган LSCO нинг $C_e(T)$ (узлуксиз чизиқ) T/T^* келтирилган ҳарорати функциясига боғлиқлиги T^*=98 K яқинида ҳисобланган ва тажриба натижалари (пунктирланган соҳа) (Oda M. et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2232) билан таққосланган



6-расм. Легирлаш даражаси x=0.10 бўлган LSCO нинг C_e/T (узлуксиз чизиқ) T/T^* келтирилган ҳарорати функциясига боғлиқлиги T^*=98 K яқинида ҳисобланган ва тажриба натижалари (пунктирланган соҳа) (Oda M. et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2232) билан таққосланган

Ҳар иккала ҳарорат $T<T^*$ ва $T>T^*$ оралиқларида, тахминий эгри чизиқлар тажриба маълумотларини қониқарли равишда кўпайтиради. Хусусан, 5- ва 6-расмлардаги $C_e(T)$ ва $C_e(T)/T$ эгри чизиқлар тажриба хатолиги оралиғида ётади ва шу сабабли тўғри деб қабул қилинади. Бу ерда шуни таъкидлаш керакки, ҳатто баъзи муаллифлар T_c дан юқорида ҳам иссиқлик сиғимининг сакрашини топишган, буни БКШ-симон фазавий ўтишдан фарқли ўтиш деб ёритишган, ёки шунчаки инобатга олишмаган.

Аммо биринчи қарашда, $C_e(T)$ бўйича баъзи тажриба маълумотларида T_c дан юқорида сакрашга ўхшаш аномалиялар умуман сезилмаётгандек туюлади, аммо эътибор билан текширганда ЮҲЎЎ купратларда турли хил ҳароратлар $T>T_c$ да $C_e(T)$ ёки $C_e(T)/T$ оғишдан четланишлар кузатилади. Шунинг учун, биз купратларда $T^*=T$ да $C_e(T)$ эгри чизиқ боғлиқлигининг синиш жойларида БКШ-симон фазавий ўтишлар мавжуд деб тахмин қилишимиз мумкин. Аслини олганда, юқори ҳароратлар ($T=T^*$) да фононлар иссиқлик сиғимга асосий улушни қўшади ва шунинг учун умумий иссиқлик сиғимдан электрон иссиқлик сиғимни аниқ ажратиб олиш мумкин эмас. T^* га яқин ҳароратларда, фононларнинг улуши ҳисобига умумий иссиқлик сиғим электрон иссиқлик сиғимнинг улушига қараганда жуда катта ва шунинг учун БКШ-симон псевдотирқиш пайдо бўлиши туфайли аномалияни кузатиш қийин бўлади. Аммо, LSCO ва YBCO бирикмаларида иссиқлик сиғими маълумотларини синчковлик билан ўрганиш, бундай аномалия аниқ мавжудлигини кўрсатди. Юқорида келтирилган фикрлардан келиб чиқиб, ЮҲЎЎ купратларда $T^*>T_c$ да кутилаётган БКШ-симон электрон иссиқлик сиғими сакрашлари кўп ҳолларда

тажриба хатоликлари фонида яширинган ҳамда киритма ва намуна тақсимотидаги бир хил бўлмаган таъсири туфайли камроқ сакрашлар кўринишида намоён бўлади.

Диссертациянинг **“ЮҲЎЎ-купратларнинг ўтаўтказувчан ҳолатдаги электрон иссиқлик сиғими”** деб номланган учинчи бобида ўтаоқувчан Бозе-суюқлигининг, паст ҳароратларда ($T<<T_c$) ЮҲЎЎ-купратларнинг ва ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати ($T<T_c$) атрофида ЮҲЎЎ-купратларнинг иссиқлик сиғимлари бўйича назарий тадқиқотлар натижалари келтирилган.

Ўтаоқувчан Бозе-суюқлигининг иссиқлик сиғими қуйидагича топилади (Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Стат. Физ.Часть 2. М. Наука, 1978. С.448):

$$C_v(T) = \frac{1}{T^2}\sum_k n_B(k)[1+n_B(k)]\left\{E_B^2(k) + T\left[\varepsilon\frac{\partial|\tilde{\mu}_B|}{\partial T} + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial T}\Delta_{SF}^2\right]\right\}, \quad (12)$$

бу ерда $n_B(k) = \left[e^{E_B(k)/k_BT} - 1\right]^{-1}$,$E_B = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_B^2(k) - \Delta_B^2(k)}$, $\tilde{\varepsilon}_B(k) = \varepsilon_B(k) + \tilde{\mu}_B$– ўзаро таъсирлашувчи Бозе-газнинг кимёвий потенциалидан ҳисобланадиган бозонлар энергияси, $\varepsilon_B(k) = \hbar^2k^2/2m_B$, $\Delta_B(k)$– бозонларнинг тартиблилик параметри (яъни когерентлик параметри), m_B– бозонлар массаси.

Ўтаоқувчан Бозе суюқлик назариясига мувофиқ (П.Ж. Байматовнинг дисс., Тошкент, 1995, б.137), ўтаоқувчан Бозе-суюқлигининг ғалаёнланиш спектрида $\Delta_{SF} = \sqrt{\tilde{\mu}_B^2 - \Delta_B^2}$ энергетик тирқиш бозонлараро ўзаро таъсир боғланиш доимийси γ_B баъзи бир критик қийматидан γ_B^* кичик бўлганда мавжуд бўлади, яъни $E = 0$ бўлганда энергетик тирқиш Δ_{SF} йўқолади. Паст ҳароратларда қуйидаги шартларни қўйиш мумкин: $k_BT<<\tilde{\mu}_B$, Δ_B ва $\Delta_B\approx$const, $\tilde{\mu}_B\approx$const. Шунинг учун ўтаоқувчан 3D Бозе-газнинг иссиқлик сиғими қуйидаги ифодадан топилади:

$$C_v(T) \approx \frac{\Omega D_B}{2T^2}\int_0^\infty \sqrt{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{\sinh^2\frac{E_B(\varepsilon)}{2k_BT}}E_B^2(k). \quad (13)$$

Агар $\gamma_B>\gamma_B^*$ ва $\Delta_{SF}>2k_BT$ бўлса, (13) тенгламадаги интеграл остидаги $\sinh[E_B(\varepsilon)/2k_BT]$ функцияни қуйидагича алмаштириш мумкин $(1/2)\exp[E_B(\varepsilon)/2k_BT]$. Кейин эса (13) тенгламадаги интегралга асосий улушни ε нинг кичик қийматлари беришини ҳисобга олиб, биз $E_B(\varepsilon)$ ни $\sqrt{2|\tilde{\mu}_B|\varepsilon + \Delta_{SF}^2} \simeq \Delta_{SF} + |\tilde{\mu}_B|\varepsilon/\Delta_{SF}$га алмаштиришимиз мумкин ва $\sqrt{2|\tilde{\mu}_B|\varepsilon + \Delta_{SF}^2} \simeq \Delta_{SF} + |\tilde{\mu}_B|\varepsilon/\Delta_{SF}$ ни Тейлор қаторига ёйиш мумкин. Бунда (13) тенгламани интеграллаш орқали қуйидагига эга бўламиз:

$$C_v(T) \simeq \frac{3\Omega D_B\Delta_B^{5/2}}{|\tilde{\mu}_B|^{3/2}}\sqrt{\pi T}\left[1 + \frac{4}{3}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\Delta_{SF}}{k_BT}\right]\exp\left(-\frac{\Delta_{SF}}{k_BT}\right). \quad (14)$$

Агар $\gamma_B<\gamma_B^*$ бўлса, у ҳолда ўтаоқувчан 3D Бозе-суюқлигининг ғалаёнланиш спектридаги энергетик тирқиш Δ_{SF} ҳарорат камайиши билан камаяди ва бирор характеристик ҳароратда T_c^* йўқолиб қолади (П.Ж. Байматовнинг дисс., Тошкент, 1995, б.137). Шунинг учун $\gamma_B<\gamma_B^*$ ва $T\leq T_c^*$ да

ўтаоқувчан 3D Бозе-суюқлигининг ғалаёнланиш спектри k нинг кичик қийматларида фононсимон $E_B(\varepsilon)\sim\sqrt{|\tilde{\mu}_B|/m_B}\hbar k$ бўлади ва унинг иссиқлик сиғими паст ҳароратларда T^3 га пропорционал бўлади, яъни

$$C_v(T) \sim T^3. \tag{15}$$

Энди паст ҳароратларда ($T<<T_c$) ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғимининг ҳароратга боғлиқлигини юқорида баён этилган ўтаоқувчан Бозе-суюқлиги назарияси доирасида муҳокама қиламиз. ЮҲЎЎ-купратларга доир тажриба натижаларининг кўрсатишича, бу материалларнинг электрон иссиқлик сиғими C_e паст ҳароратларда T^2 ёки T^3 га пропорционал ва чизиқли ҳад T га эга ва T_c дан паст ҳароратларда ҳам λ-симон аномалияга эга. Электрон иссиқлик сиғими учун кузатилган паст ҳароратли даражавий қонунлар БКШ назарияси томонидан таклиф этилган экспоненциал боғланишдан $C_e(T)$ кучли фарқ қилади. Биз ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими d–тўлқинларнинг БКШ-симон жуфтлашиш модели билан эмас балки ўтаоқувчан Бозе-суюқлиги назарияси билан ёритилади деб тахмин қиламиз, чунки $\Delta_{SF}<\Delta_{SC}$ да ва, айниқса, $\Delta_{SF}<<\Delta_{SC}$ (ёки $\Delta_{SF}=0$) да купратларда $C_e(T)$ га асосий улушни бозон Купер жутфларининг ғалаёнланиши беради, уларнинг Ферми компоненталари ғалаёнланиши эмас. 3D ва 2D купратли ўтаўтказгичларда $\Delta_{SF}=0$ да бу назария томонидан тахмин қилинган ҳароратга даражавий (яъни, фононсимон) $C_e(T) \sim T^3$ ва $\sim T^2$ боғлиқликлар ҳақиқатдан ҳам ЮҲЎЎ-купратларда экспериментда кузатилган. Бундан ташқари, ўтаоқувчан Бозе-суюқлик назариясига мувофиқ, 3D бозонли ўтаўтказгичларда электрон иссиқлик сиғими T_c атрофида қуйидагича ҳароратга боғлиқ бўлади $C_e(T) \sim (T_c-T)^{-0.5}$, бунга асосан, ЮҲЎЎ-купратлардаги $C_e(T)$ электрон иссиқлик сиғимида $T\rightarrow T_c$ ўтаоқувчан ^{4}He иссиқлик сиғими λ-симон ўтиш атрофида узоқлашувчи бўлгани каби бўлади. Бундан ноанъанавий ўтаўтказгичларда уч ўлчамли Бозе-суюқлигида ҳарорат пасайиши билан T_c да иккинчи тур фазавий ўтиш рўй бериши ва уларнинг иссиқлик сиғими T_c атрофида λ-симон аномалияга эга бўлиши келиб чиқади. Бу вақтда БКШ-ўтаўтказгичларида ўтаоқувчан Ферми-суюқлиги эса T_c да электрон иссиқлик сиғимининг сакраб ўзгариши билан кузатиладиган босқичли иккинчи тур фазавий ўтиш рўй беради, T_c атрофида $C_e(T)$ нинг λ-симон аномалиялари ЮҲЎЎ-купратларда кузатилган (П.Ж. Байматовнинг дисс., Тошкент, 1995, б.137). Бундан ташқари, бу ЮҲЎЎ материалларда T_c дан юқорида ёки T_c дан жуда юқорида кузатиладиган $C_e(T)$ нинг БКШ-симон унча катта бўлмаган сакраши уларнинг электрон қуйи системаларида $T=T^*>T_c$ ёки $T=T^*>>T_c$ да рўй берадиган БКШ-симон иккинчи тур фазавий ўтишлар билан боғланган.

ЮҲЎЎ-купратларда полярон ток ташувчилар T_c дан юқорида бозон Купер жуфтларига боғланган ва бу Купер жуфтлари T_c да Бозе-суюқлик ҳолатига конденсацияланади. Ўзаро таъсирлашувчи Купер жуфтларининг Бозе-гази учун T_c яқинидаги кимёвий потенциал ва когерентлик параметри қуйидаги кўринишда берилади (П.Ж. Байматовнинг дисс., Тошкент, 1995, б.137):

$$\tilde{\mu}_B(T) \approx \tilde{\mu}_B(T_c)[1 + a(T_c - T)^{0.5}], \quad (16)$$

ва

$$\Delta_B(T) \approx 2\tilde{\mu}_B(T_c)a^{0.5}(T_c - T)^{0.25}, \quad (17)$$

бу ерда $a=2(c_0\gamma_B T_c)^{-0.5}(\varepsilon_{BA}/k_B T_c)^{0.25}$ ва $c_0=\pi^{3/2}/3.912$ (S. Dzhumanov, Int. J. Mod. Phys. B. 12 (1998) 2151). Энди T_c яқинида қуйидагича ажраладиган $\Delta_B(T)<<\tilde{\mu}_B(T)<<k_B T_c$ ўтаўтказувчан Бозе-газининг иссиқлик сиғими муаммосига эътибор қаратамиз

$$C_{SF}(T) \sim (T_c - T)^{-0.5}, \quad (18)$$

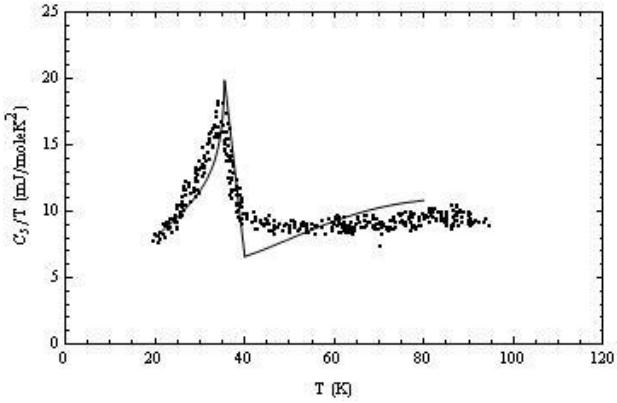
ва T_c да λ-симон аномалияни намоён қилади (яъни $C_{SF}(T)$ нинг намоён бўлиши ўтаоқувчан ^{4}He нинг намоён бўлишига ўхшайди). $C_{SF}(T)$ ифодасидаги $\tilde{\mu}_B$ ва Δ_B катталикларнинг ҳарорат бўйича ҳосилалари бундай λ-симон ажралишларни чақиради. Ўтаоқувчан модда миқдори $\nu_B=N_B/N_A$ ни (бунда N_B– тортишувчи бозонлар миқдори (поляронли Купер жуфтлар) ва N_A– эса моляр ҳажм бирлигидаги CuO_2 формуласи бирлиги миқдорига тенг бўлган Авогадро сони) ва $f_s=\nu_B/\nu$ (бу ерда $\nu=N/N_A$– легирланган модданинг миқдори) кўринишида аниқланувчи ўтаоқувчан бозон ток ташувчиларнинг моляр улушини киритиш орқали, биз ЮҲЎЎ-купратларда ўтаўтказувчан Бозе-газининг моляр иссиқлик сиғимини қуйидаги кўринишда ёзишимиз мумкин:

$$C_s(T) = f_s \frac{D_B k_B N_A}{4\rho_B (k_B T)^2} \int_0^{\varepsilon_{BA}} \frac{\sqrt{\varepsilon} d\varepsilon}{\sinh^2 \frac{E_B(\varepsilon)}{k_B T}} \left\{ E_B(\varepsilon) + \frac{a\tilde{\mu}_B(T_c)T}{2(T_c - T)^{0.5}} [\varepsilon - \tilde{\mu}_B(T_c)] \right\}. \quad (19)$$

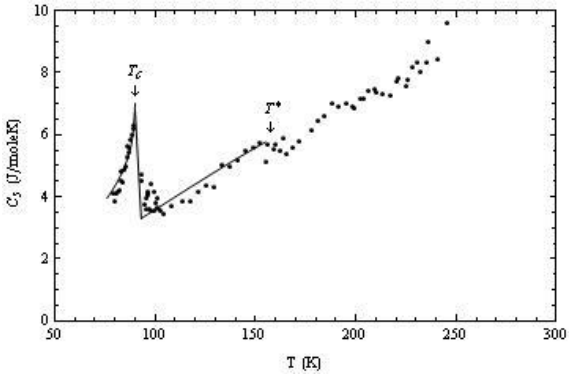
Бу ерда биз $\Omega/\nu_B=N_B\nu_B/\nu_B=\nu_B N_A$ ва $\nu_B=1/\rho_B$ ни ҳисобга олдик. Юқорида таъкидлаб ўтилгандек, купратларда легирловчи ток ташувчилар поляронли ва киритмали соҳалар оралиғида тақсимланади (Ферми энергияси ε_{F2} бўлган) ва T_c дан қуйида ўтаўтказувчан бўлмаган $C_n(T)$ заряд ташувчиларнинг солиштирма иссиқлик сиғими ҳам уйғонган компоненталарининг учта улуши поляронли Купер жуфтлари, нокогерент Купер жуфтларининг Бозе-гази ва киритмалар билан боғланган жуфтлашмаган ток ташувчиларни инобатга олган ҳолда ҳисобланади.

Бизнинг назарий ҳисоблашларимиз тегишли тажрибалар натижалари (V.N. Naumov et al., Physica C 262 (1996) 143;T. Matsuzaki et al., J. Phys. Chem. Sol. 62 (2001) 29) билан таққосланди ва улар билан жуда яхши мос келади (7- ва 8-расмларга қаранг). Бундай ҳолда, ўтаўтказувчан Бозе-газининг иссиқлик сиғими $C_s(T)$ ни тажриба маълумотлари билан таққослаганда, поляронли соҳада жойлашган легирловчи заряд ташувчиларнинг f_p улуши ва киритмали соҳада жойлашган бундай заряд ташувчиларнинг f_I улушларини ҳисобга олиш керак. Шундай қилиб, ўтаўтказувчан ва ўтаўтказувчан бўлмаган заряд ташувчиларнинг T_c дан қуйидаги тўлиқ иссиқлик сиғими $C_e(T)=C_s(T)+C_n(T)$ кўринишда ҳисобланади ва ЮҲЎЎ купратлардаги $C_s(T)$ учун маълумотлар билан таққосланади (7- ва 8-расмлар).$C_s(T)$ нинг қиймати ε_F=0.12 эВ, ε_{FI}=0.012 эВ, f_p=0.3 ва f_I=0.7 параметрларни ҳисобга олган ҳолда ҳисобланди ва унинг ўтаўтказувчан қисмининг $C_e(T)$ га бўлган улуши эса қуйидаги параметрларни ҳисобга олган ҳолда топилди: $\rho_B=1{,}6\times10^{19}$см$^{-3}$, $m_B=2{,}5m_p$, $\tilde{\mu}_B(T_c)$=1,6 мэВ ва f_s=0.03 (7-расм). Кейинчалик $C_s(T)$ нинг қиймати ε_F=0.1 эВ, ε_{FI}=0.06 эВ, f_p=0.4

ва f_l=0.6 параметрларни ҳисобга олган ҳолда ҳисобланди ва унинг ўтаўтказувчан қисмининг $C_e(T)$ га бўлган улуши эса қуйидаги параметрларни ҳисобга олган ҳолда топилди: $\rho_B=1{,}4\times10^{19}$см$^{-3}$, $m_B=2{,}7m_p$, $\tilde{\mu}_B(T_c)$=0,5 мэВ ва f_s=0.012 (8-расм).



7-расм. T_c яқинида ва ундан юқорида $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ нинг электрон иссиқлик сиғимининг ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. Узлуксиз чизиқ – эксперимент (V.N. Naumov et al., Physica C 262 (1996) 143) натижалари билан (қора нуқталар) таққосланган.



8-расм. T_c атрофида ва ундан юқорида LSCO нинг электрон иссиқлик сиғимининг ҳароратга боғлиқлиги келтирилган. Узлуксиз чизиқ – эксперимент (T. Matsuzaki et al., J. Phys. Chem. Sol. 62 (2001) 29) натижалари билан (қора нуқталар) таққосланган.

ХУЛОСА

“**Легирланган купратли юқори ҳароратли ўта-ўтказгичларда электрон иссиқлик сиғими аномалиялари**” мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича олиб борилган тадқиқотлар асосида қуйидаги хулосалар келтирилади:

1. Кам ва оптимал легирланган ЮҲЎЎ-купратларнинг нормал ҳолатида БКШ-симон псевдотирқиш ва нокогерент Купер жуфтлари ҳосил бўладиган ҳароратлар аниқланди.
2. Биринчи марта характеристик ҳароратдан T^* юқорида ва пастда ЮҲЎЎ-купратларнинг ҳарорат ва легирлаш даражасининг функцияси сифатидаги электрон иссиқлик сиғими учун аналитик ифодалар олинди.
3. Кам легирланган, оптимал ва мўътадил ўталегирланган ЮҲЎЎ-купратларда псевдотирқиш ҳосил бўлиш ҳарорати $T=T^*>T_c$ да полярон ток ташувчиларинг прекурсив Купер жуфтлашиши электрон иссиқлик сиғимининг БКШ-симон ғайриоддийлигига олиб келиши кўрсатилди.
4. Характеристик ҳарорат T^* дан юқорида ва қуйида тажриба натижалари билан мос келадиган ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими учун натижалар олинди.
5. Паст ҳароратларда ЮҲЎЎ-купратларнинг ўтаўтказувчан ҳолатидаги электрон иссиқлик сиғимининг $C_e(T)$ ҳароратга боғлиқлиги ўрганилди ва

электрон иссиқлик сиғими даражавий қонуният бўйича ($C_e(T) \sim T^2$ ва $C_e(T) \sim T^3$) ўзгариши кўрсатилди.

6. Ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c атрофида ЮҲЎЎ-купратларнинг ўтаўтказувчан ҳолатидаги электрон иссиқлик сиғими $C_e(T)$ учун аналитик ифодалар олинди.
7. Биринчи марта ўта оқувчан Бозе-суюқлиги модели доирасида ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c атрофида ЮҲЎЎ-купратларнинг ўтаўтказувчан ҳолатидаги электрон иссиқлик сиғими учун ифода олинди ва назарий ҳисобланди.
8. Ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c да ЮҲЎЎ-купратлар LSCO ва YBCO ларнинг легирлаш даражасига боғлиқ бўлган электрон иссиқлик сиғимининг λ–симон ғайриоддийликлари мавжуд бўлишлиги аниқланди.
9. Ўтаўтказувчанликка ўтиш ҳарорати T_c атрофида ЮҲЎЎ-купратларнинг электрон иссиқлик сиғими $C_e(T)$ учун тажриба натижалари билан мос келадиган натижалар олинди.

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

КАРИМБАЕВ ЭЛДОР ХАЛМУРАТОВИЧ

АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ В ЛЕГИРОВАННЫХ КУПРАТНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент–2021

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за № B2017.2.PhD/FM70.

Докторская диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академия наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель: **Джуманов Сафарали**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Ашуров Мухсин Хуррамович**
доктор физико-математических наук,
профессор, академик

Расулов Рустам Явкачович
доктор физико-математических наук,
профессор

Ведущая организация: **Андижанский Государственный университет**

Защита диссертации состоится «____» _____2021 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100174, г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел.: (+99871) 289–31-41; факс: (+99871)289–36–65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____) (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «____» _____ 2021 г.
(Протокол рассылки № _____ от _____ 2021 г.).

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

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

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

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире изучение нормальных и сверхпроводящих (СП) свойств новых легированных многоатомных медно-оксидных (купратных) высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) $La_{2-x}(Ba,Sr)_xCuO_4$ и $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), имеющих слоистые структуры, является одним из важных и приоритетных направлений современной физики конденсированного состояния и материаловедения (в том числе и радиационного материаловедения). При этом изучение новых экзотических свойств таких слоистых ВТСП-купратов при различных температурах и уровнях легирования с целью создания новых перспективных ВТСП-материалов с уникальными электронными свойствами является актуальной как с фундаментальной, так и с практической точки зрения задачей. Несмотря на то, что интенсивные теоретические и экспериментальные исследования легированных ВТСП-купратов продолжаются вот уже три десятилетия, нет еще достаточной ясности в отношении понимания необычных нормальных (выше критической температуры сверхпроводящего перехода T_c) и сверхпроводящих (ниже T_c) свойств этих материалов в недолегированных, оптимально легированных и умеренно сверхлегированных режимах. Поэтому теоретические исследования аномальных тепловых свойств недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратов $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (LSCO) и YBCO выше T_c представляют очень большой интерес и являются весьма актуальными.

В мире проведенные эксперименты, обнаруживающие аномалии электронной теплоемкости при температуре образования псевдощели T^* и критической температуре сверхпроводящего перехода T_c показывают, что необычные электрон-фононные взаимодействия играют решающую роль в ВТСП-купратах. При этом тепловые свойства, в частности, теплоемкость недолегированных, оптимально легированных и умеренно сверхлегированных ВТСП-купратов выше температуры сверхпроводящего перехода T_c является необычной по сравнению с такими свойствами обычных сверхпроводников в их нормальном состоянии. Решение этих фундаментальных задач в рамках нестандартных теоретических подходов, основанных на необычных электрон-фононных механизмах спаривания носителей выше T_c и на необычной сверхтекучей конденсации притягивающего бозе-газа поляронных куперовских пар ниже T_c, позволяют не только решить проблемы тепловых свойств в легированных ВТСП-купратах, но и определить подлинные механизмы образования псевдощели и новых сверхпроводящих переходов в этих экзотических сверхпроводниках.

В Республике уделяется большое внимание развитию физики конденсированного состояния (в частности, физики наноструктурных и сверхпроводящих материалов, а также физики полупроводников) и проведению фундаментальных исследований в этом направлении на мировом уровне. Направления этих фундаментальных исследований, имеющих

большое значение для развития науки нашей страны и её дальнейшего практического применения, отражены в Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 гг.[1]

Данное диссертационное исследование в определенной степени выполняет задачи, предусмотренные в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № УП–4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годах», №ПП–2772 от 13 февраля 2017 года «О приоритетных направлениях развития электротехнической промышленности в 2017–2021 годах», №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 приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в республике II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. В настоящее время в мире экспериментальным и теоретическим изучением электронной структуры, тепловых свойств, в частности, электронной теплоемкости легированных ВТСП-купратов занимаются многие ученые, например американские (P.W. Anderson, J.R. Schrieffer, D. Pines, S.A. Kivelson, P.A. Lee, C.M. Varma, D. Emin, A. Yazdani, A.C. Fang и др.), английские (A.S. Alexandrov, A. Carrington, J.R. Cooper, N.E. Hussey, J.W. Loram, J.L. Tallon, V.J. Emery, T. Rice и др.), швейцарские (Ø. Fischer, Ch. Renner, C. Berthod и др.), канадские (A. Damascelli, A. Kapitulnik и др.), бельгийские (J.T. Devreese и др.), китайские (H. When, L. Yu, Zhao и др.), японские (S. Uchida, Y. Koike, S. Ono, Y. Ando, M. Ido, A. Matsuda, T. Kato и др.), индийские (G. Baskaron, Inderhees и др.), российские (A.I. Larkin и др.) и др. Узбекистанскими учеными (С. Джуманов, Б.Я. Явидов, П.Ж. Байматов, Б. Абдуллаев) проведен ряд исследований различных электронных свойств и механизма высокотемпературной сверхпроводимости купратов.

В результате этих исследований китайские ученые (Zhao и др.) предположили, что БКШ-подобная аномалия (скачкообразное изменение) в температурной зависимости удельной электронной теплоемкости $C_e(T)$ купратных сверхпроводников проявляется в нормальном состоянии выше температуры сверхпроводящего перехода T_c. Различные теоретические модели были предложены для объяснения вышеуказанных особенностей высокотемпературных сверхпроводящих купратов (Wu, Zhao, Dzhumanov, Tallon, Садовский, Damascelli и др.). Многие экспериментаторы (Lee, Kresin и

[1]Указ Президента Республики Узбекистан № УП–4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию РеспубликиУзбекистан» от 07 февраля 2017 г. // Официальное издание Министерства юстиции Республики Узбекистан. – Ташкент: Адолат, 2017.

др.) указывают, что нестандартные электрон-фононные взаимодействия (включая поляронный эффект) могут быть вовлечены в явление псевдощели и высокотемпературную сверхпроводимость в ВТСП-купратах. Некоторые исследователи (Dzhumanov, Timusk, Tallon, Садовский, Lee, Kresin и др.) полагают, что различные аномалии, наблюдаемые в нормальном состоянии ВТСП-купратов, тесно связаны с образованием псевдощели в спектрах их возбуждения, ниже некоторой характеристической температуры T^* и эти ВТСП-материалы испытывают новый сверхпроводящий переход при температуре $T_c<T^*$ или $T_c<<T^*$. Идея о возможности существования БКШ-подобного псевдощелевого состояния купратов, обусловленного спариванием носителей выше температуры сверхпроводящего перехода T_c, и аномалия в температурной зависимости удельной электронной теплоемкости этих материалов выше T_c была высказана теоретически в работах С. Джуманова.

Однако, несмотря на определенный прогресс в понимании многих термодинамических свойств некоторых ВТСП-купратов, вопрос о причине происхождения аномалии в температурной зависимости удельной электронной теплоемкости соединений LSCO и YBCO выше температуры сверхпроводящего перехода T_c остается все еще спорным и не выясненным. Проблема происхождения аномалии, то есть скачкообразного изменения значения удельной электронной теплоемкости $C_e(T)$ выше T_c в ВТСП купратах, связанного с образованием в этих соединениях некогерентных куперовских пар в их нормальном состоянии, и вовсе не исследована.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научных проектов Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по темам: ФА–Ф2–Ф070 “Исследование необычных транспортных, тепловых и упругих свойств легированных купратных высокотемпературных сверхпроводников $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ выше температуры сверхпроводящего перехода” (2007–2011); Ф.2–12 «Механизм образования псевдощели в электронной структуре слаболегированных купратов и их проявления в туннельных характеристиках купрат-металлконтактов выше температуры сверхпроводящего перехода» (2012–2013); Ф2–ФА–Ф120 “Электронные свойства и радиационная модификация низкоразмерных высокотемпературной сверхпроводников, полупроводниковых гетероструктур, металлов и их оксидов” (2012–2016) и ОТ–Ф2–15 “Теоретические исследования новых сверхпроводящих и сверхтекучих свойств высокотемпературных сверхпроводников и родственных конденсированных систем” (2017–2021).

Целью исследования является определение природы аномальной электронной теплоемкости в нормальном и сверхпроводящем состояниях в зависимости от уровня легирования ВТСП-купратов LSCO и YBCO при температурах выше и ниже температуры сверхпроводящего перехода.

Задачи исследования:

изучить природу возможных типов носителей заряда в легированных ВТСП-купратах;

выявить аналитические выражения для описания электронной теплоемкости легированных ВТСП-купратов в их нормальном состоянии;

вычислить электронные теплоемкости ВТСП-купратов выше и ниже температуры образования БКШ-подобнойпсевдощели T^*;

определить возможные поведения электронной теплоемкости ВТСП-купратов $C_e(T)$ и установить природуаномалии в $C_e(T)$ вблизи T^* при различных уровнях легирования;

идентифицировать рассчитанные температурные зависимости $C_e(T)$ в нормальном состоянии легированных ВТСП-купратов выше T_c с существующими экспериментальными результатами;

получить явные аналитические выражения для теплоемкости сверхтекучего бозе-газа вблизи T_c в легированных ВТСП-купратах;

вычислить электронную теплоемкость ВТСП-купратов в их сверхтекучем состоянии вблизи T_c и определить возможности существования λ-подобной аномалии в $C_e(T)$ при T_c;

идентифицировать рассчитанные температурные зависимости $C_e(T)$ в сверхпроводящем состоянии легированных ВТСП-купратов вблизи T_c с существующими экспериментальными данными.

Объектом исследования являются (би)поляроны, недолегированные, оптимально легированные и умеренно сверхлегированные ВТСП-купраты.

Предметом исследования являются аномалии электронной теплоемкости на температуры образования псевдощелей T^* и при температуре сверхпроводящего перехода T_c в ВТСП-купратах при различных уровнях их легирования.

Методы исследования. Математический аппарат квантовой и статической механики, континуальная модель, вариационный метод, численные методы, метод среднего поля для изучения БКШ-подобного спаривания поляронов и сверхтекучей конденсации притягивающихся бозе-газов биполяронов и куперовских пар.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые получены аналитические выражения для электронной теплоемкости ВТСП-купратов выше и ниже температуры образования БКШ-подобной псевдощели T^* как функции температуры и уровня легирования, удовлетворительно описывающие экспериментальные данные по электронным теплоемкостям при T^* в легированных ВТСП-купратах;

определена природа аномалии электронной теплоемкости ВТСП-купратов выше критической температуры сверхпроводящего перехода T_c, связанная с БКШ-подобным фазовым переходом при температуре образования БКШ-подобной псевдощели $T^*>T_c$;

впервые получено выражение и теоретически рассчитана электронная теплоемкость ВТСП-купратов в сверхпроводящем состоянии вблизи температуры сверхпроводящего перехода T_c в рамках модели сверхтекучей бозе-жидкости;

выявлена возможность существования λ-подобной аномалии электронной теплоемкости ВТСП-купратов при температуре их сверхпроводящего перехода T_c в зависимости от уровня легирования ВТСП-купратов LSCO и YBCO.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработан микроскопический подход в рамках поляронной модели для объяснения аномалии электронной теплоемкости в нормальном и сверхпроводящем состояниях в ВТСП-купратах при различных уровнях легирования;

выведены новые аналитические формулы для электронной теплоемкости при температуре образования псевдощели T^* и при температуре сверхпроводящего перехода T_c в ВТСП-купратах при различных уровнях легирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов квантовой механики и теоретической физики конденсированного состояния, а также БКШ-подобного метода среднего поля при выводе новых формул для электронной теплоёмкости, совпадением полученных результатов с экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключаются в том, что они способствуют расширению физических представлений об аномалиях электронной теплоемкости в нормальном и сверхпроводящем состоянии в легированных купратных сверхпроводниках и других родственных материалах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что развитие модельных представлений об образовании λ-подобной аномалии электронной теплоемкости при температурах сверхпроводящего перехода и образования псевдощели в легированных ВТСП-купратах позволяет существенно продвинуться вперед при разработке теории псевдощелевых явлений и высокотемпературной сверхпроводимости.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по изучению аномалии электронной теплоемкости в нормальном и сверхпроводящем состояниях в легированных ВТСП-купратах:

полученные аналитические выражения для электронной теплоемкости ВТСП-купратов выше и ниже температуры образования БКШ-подобной псевдощели T^* были использованы для изучения необычных термодинамических свойств ВТСП-материалов в Физико-техническом институте низких температур Национальной академии наук Украины в рамках научно-исследовательского проекта «Низкотемпературные транспортные свойства низко размерных и сильно анизотропных проводников» (2013–2017) (Письмо Физико-технического института низких температур им. Б.И. Веркина Национальной академии наук Украины № 64/310 от 20.04.2021 г). Использование научных результатов позволило объяснить поведение электронной теплоемкости в высокотемпературных сверхпроводниках;

выявленная природа аномалии электронной теплоемкости ВТСП-купратов выше критической температуры сверхпроводящего перехода T_c была использована для изучения необычных электронных свойств полимерных композитных материалов в Казахском Национальном университете в рамках гранта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № 3079ГФ4 «Создание и исследование новых высокоэффективных солнечных элементов на основе органометаллических перовскитов» (2015–2017) (Письмо Казахского Национального университета имени аль-Фараби № 19–9–1239от 21.04.2021 г). Использование научных результатов позволило разработать научные основы создания и практического использования эффективных солнечных элементов с применением наноструктурированных слоев и фотонного кристалла;

полученное выражение и теоретически рассчитанная электронная теплоемкость ВТСП-купратов в сверхпроводящем состоянии вблизи температуры сверхпроводящего перехода T_c была использована для изучения необычных электронных свойств полимерных композитных материалов в Казахском Национальном университете в рамках гранта Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан № 3079ГФ4 «Создание и исследование новых высокоэффективных солнечных элементов на основе органометаллических перовскитов» (2015–2017) (Письмо Казахского Национального университета имени аль-Фараби № 19–9–1239 от 21.04.2021 г) а также были использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных научныхжурналах Journal of Physics: Conference Series 592, 012075, 2015; International Journal of Modern Physics B 29, No.24, 1550180, 2015; Physics Letters A 383, 1330-1335, 2019) для изучения аномалии электронной теплоемкости в нормальном состоянии ВТСП-купратов LSCO и YBCO, при различных уровнях легирования. Использование научных результатов позволило объяснить природу переноса заряда в неоднородных купратах;

выявленная возможность существования λ-подобной аномалии электронной теплоемкости ВТСП-купратов при температуре их сверхпроводящего перехода T_c в зависимости от уровня легирования ВТСП-купратов LSCO и YBCO была использована для объяснения возможного образования сильно связанных бозонов в области высокотемпературного псевдощелевого состояния в ВТСП в Физико-техническом институте низких температур Национальной академии наук Украины в рамках научно-исследовательского проекта «Низкотемпературные транспортные свойства низко размерных и сильно анизотропных проводников» (2013–2017) (Письмо Физико-технического института низких температур им. Б.И. Веркина Национальной академии наук Украины № 64/310 от 20.04.2021 г). Использование научных результатов позволило обосновать выбор максимума температурной зависимости псевдощели в качестве температуры кроссовера БЭК-БКШ в купратах YBCO.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 6 международных и республиканских конференциях, на

научных семинарах Наманганского государственного университета и Института материловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертации, в том числе 1 в зарубежном реферируемом журнале.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Объем диссертации составляет 95 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показаны актуальность темы диссертации, ее обоснованность, определено соответствие проведенных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложена степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об объектах, предметах и методах исследования, изложены научная новизна и практические результаты исследования, раскрыты научная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о внедрении результатов исследования, апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Существующие представления о термодинамических свойствах легированных ВТСП купратов**» представлен литературный обзор по исследованию современного состояния проблемы образования энергетических зон носителей заряда в кристаллических твердых телах, в том числе и в ВТСП материалах, термодинамических свойства ВТСП купратов в их нормальном и сверхпроводящем состояниях. На основе сделанного анализа имеющихся литературных данных в конце главы сформулированы цель и задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе диссертации **«Электронная теплоемкость ВТСП купратов в нормальном состоянии»** рассмотрена природа носителей тока в купратах, с учетом неоднородного распределения электронов, модифицированная БКШ-подобная модель и прекурсивное куперовское спаривание больших поляронов выше T_c, электронная теплоемкость ВТСП-купратов в их нормальном состоянии выше и ниже температуры образования БКШ-подобной псевдощели T^*.

В случае ВТСП-купратов необычная форма БКШ теории может естественным образом описывать прекурсивное куперовское спаривание больших поляронов выше T_c. Такой БКШ формализм, расширенный до промежуточного режима электрон-фононной связи, приводит к следующему уравнению для определения БКШ-подобной щели или псевдощели, Δ^* и температуры образования псевдощели T^* (Dzhumanov S. New York: Nova Science Publishers, 2013.–P.365):

$$\frac{1}{\lambda^*} = \int_0^{\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2+\Delta^{*2}(T)}} \tanh \frac{\sqrt{\varepsilon^2+\Delta^{*2}(T)}}{2k_B T}, \quad (1)$$

где $\lambda^* = \mathrm{D_p}(\varepsilon_\mathrm{F})\tilde{V}_p$– эффективная БКШ-подобная константа связи, $D_p(\varepsilon_F)=1/\varepsilon_F$– плотность состояний на поляронном уровне Ферми для одной ориентации спина, ε– энергия больших поляронов, отсчитываемая от поляронной энергии Ферми $\varepsilon_F=\hbar^2(3\pi^2 n)^{2/3}$, $n=N_1/\Omega$– концентрация собственных поляронов в CuO_2 слоях, N_1– количество таких поляронов, Ω– объем кристалла, $\tilde{V}_p = V_{ph} - \tilde{V}_c$– полярон-поляронный эффективный потенциал взаимодействия, V_{ph}– опосредованный фононами потенциал взаимодействия между двумя поляронами, $\tilde{V}_c = V_c/\left[1 + \mathrm{D_p}(\varepsilon_\mathrm{F})V_c \ln\left(\varepsilon_\mathrm{c}/\varepsilon_\mathrm{A}\right)\right]$– экранированный кулоновский потенциал взаимодействия между ними, V_c– затравочный кулоновский потенциал, $\varepsilon_A=E_p+\hbar\omega_0$– параметр обрезания необычного притягивающего электрон-фононного взаимодействия.

При $T=T^*$ и $\varepsilon_c>\varepsilon_\mathrm{A}\gg k_B T^*$ из (1) получаем

$$k_B T^* = 1.134\left(E_p + \hbar\omega_0\right)\exp[-\frac{1}{\lambda^*}]. \quad (2)$$

Из ур. (2) видно, что обычная картина БКШ ($T_c=T^*$) реализуется как частный случай в сверхлегированных купратах, где поляронный эффект исчезает и предэкспоненциальный множитель в ур. (2) заменяется на $\hbar\omega_0$.

Носители заряда неоднородно распределены в легированных купратах (т.е. примесные центры могут иметь больше носителей заряда, чем CuO_2 слои, и наоборот), и такие неоднородности в распределении носителей заряда могут быть ответственны за образование собственных и несобственных (то есть примесных) больших поляронов в беспримесных областях и вблизи примесей. Можно ожидать, что в недолегированных и оптимально легированных купратах некоторая часть носителей могут легко автолокализоваться вблизи примесей с образованием больших поляронов, связанных с примесями, а другая часть носителей будет автолокализоваться в деформируемой кристаллической решетке с образованием собственных больших поляронов. Такие конкурирующие процессы автолокализации носителей приводят к перераспределению поляронных носителей между свободными от примесей областями и примесными центрами. Поэтому, можно предполагать, что в необычном металлическом состоянии ВТСП-купратов БКШ-подобное куперовское спаривание больших поляронов будет происходить в поляронной зоне ниже T^*, тогда как большие поляроны, локализованные вблизи примесей, могут оставаться неспаренными. При температурах выше T^* вклад в $C_e(T)$ вносят эти два типа больших поляронов и электронная теплоемкость определяется выражением

$$C_e(T > T^*) = (\gamma_{e1} + \gamma_{e2})T, \quad (3)$$

где $\gamma_{ei} = 2\pi^2 \mathrm{D_p}(\varepsilon_\mathrm{Fi})\mathrm{k_B^2}/3 = (\pi^2/3)\mathrm{k_B^2 g}(\varepsilon_\mathrm{Fi})$ (i=1,2), $g(\varepsilon_{Fi})=3N_i/2\varepsilon_{Fi}=3Nf_i/2\varepsilon_{Fi}$– плотность состояний на поляронном уровне Ферми ε_{Fi} (включая обе спиновые

ориентации), N_i– количество больших поляронов i–го типа, $N=N_1+N_2$– полное число поляронных носителей в системе, $f_i=N_i/N$– доля больших поляронных носителей i–го типа. Для легированных купратов коэффициент при линейном члене в $C_e(T>T^*)$ определяется как

$$\gamma_e = \gamma_{e1} + \gamma_{e2} = \frac{\pi^2}{2} \mathrm{k_B^2} x \mathrm{N_A} \left(\frac{\mathrm{f_1}}{\varepsilon_1} + \frac{\mathrm{f_2}}{\varepsilon_2}\right), \tag{4}$$

где нами учтено, что число формульных единиц CuO_2 (или атомов решетки) в единице молярного объема равно числу Авогадро $N_A=6{,}02\times10^{23}$ моль$^{-1}$, $x=N/N_A$– безразмерная концентрация носителей, $k_BN_A=8{,}314$ Дж/моль · К.

Важными параметрами, которые описывают реальную экспериментальную ситуацию и количественное поведение $C_e(T)$ в легированных ВТСП-купратах, являются ε_{Fi} и f_i. Оценим значения γ_e для LSCO и YBCO. Используя конкретные значения ε_{Fi} и f_i в поляронной ($\varepsilon_{F1}\simeq0.15$ эВ, $f_1=0.6$) и примесной зоне ($\varepsilon_{F2}=0.06$ эВ, $f_2=0.4$), получаем $\gamma_e\simeq5{,}67$мДж/моль · К^2 при $x=0.1$ для LSCO. Экспериментальное значение γ_e лежит в диапазоне (4.9–7.3) мДж/моль · К^2. Для соединения YBCO уровень легирования можно определить из соотношения (M. Muroi et al. Physica C 246 (1995) 357)

$$x(\delta) = \begin{cases} (1-\delta)^3 & \textit{для} \quad 0 \le 1-\delta \le 0.5\,, \\ (0.5-\delta)^3 + 0.125 & \textit{для} \quad 0.5 < 1-\delta \le 1\,, \end{cases} \tag{5}$$

из которого следует, что $x(\delta=0.115)\simeq0.182$. Принимая $\varepsilon_{F1}=0.20$ *эВ*, $\varepsilon_{F2}=0.1$ *эВ*, $f_1=0.6$ и $f_2=0.4$ для YBCO, находим $\gamma_e=4{,}65$ мДж/моль · К^2. Это значение γ_e хорошо согласуется с экспериментальными результатами $\gamma_e\simeq4.3$–4.9мДж/моль · К^2 для YBCO (A. Junod, et al., Physica C 185-189 (1991) 1399).

Ниже температуры образования БКШ-подобной псевдощели, T^* вклад в $C_e(T)$ дают три типа носителей заряда: (i) боголюбовские квазичастицы, возникающие при диссоциации (возбуждении) куперовских пар в поляронной зоне, (ii) неспаренные поляроны в примесной зоне и (iii) идеальный бозе-газ некогерентных (несверхпроводящих) куперовских пар. Вклад в $C_e(T)$ от боголюбовских квазичастиц определяется как:

$$C_{e1}(T<T^*) = \frac{\mathrm{g}(\varepsilon_{\mathrm{F1}})}{k_B T^2} \int_0^{\varepsilon_A} f(E)\big(1-f(E)\big)\left[E^2(\varepsilon) - \frac{T}{2}\frac{\mathrm{d}\Delta^{*2}(T)}{dT}\right], \tag{6}$$

где $\mathrm{g}(\varepsilon_{\mathrm{F1}}) = 3\mathrm{N_A} x \mathrm{f_1}/2\varepsilon_{\mathrm{F1}}$, $f(E) = \left[e^{E/k_BT}+1\right]^{-1}$, $E(\varepsilon) = \sqrt{\varepsilon^2 + \Delta^{*2}(\mathrm{T})}$.

Энергия идеального бозе-газа ниже температуры БЭК $T_{\text{БЭК}}$ определяется (Landau L., Lifshitz E.,Stat. Phys. Part I. –M: Nauka, 1976.P.530.):

$$U = 0.77 N_c k_B T \left(\frac{\mathrm{T}}{T_{\text{БЭК}}}\right)^{3/2}, \tag{7}$$

где N_c – число бозе-частиц. Теплоемкость такого бозе-газа некогерентных куперовских пар определяется из соотношения

$$C_{e3}(T < T^*) = \frac{\mathrm{dU}}{dT} = 1.925 k_B N_c \left(\frac{\mathrm{T}}{T_{BEC}}\right)^{3/2}. \quad (8)$$

Тогда полная электронная теплоемкость ниже T^* определяется выражением

$$C_e(T < T^*) = C_{e1}(T) + C_{e2}(T) + C_{e3}(T), \quad (9)$$

где $C_{e2}(T < T^*) = (\pi^2/2) k_{\mathrm{B}}^2 T g(\varepsilon_{\mathrm{F2}})$– теплоемкость неспаренных поляронов в примесной зоне и $\mathrm{g}(\varepsilon_{\mathrm{F2}}) = 3\mathrm{N_A} x \mathrm{f}_2 / 2\varepsilon_{\mathrm{F2}}$.

Псевдощель $\Delta^*(T)$, появляющаяся при БКШ-подобном спаривании поляронных носителей, и температура образования этой псевдощели T^* определяются из ур. (1). При температурах несколько ниже T^* величина такой псевдощели, образующейся в нормальном состоянии ВТСП-купратов, определяется следующей формулой:

$$\Delta^*(T) = 3.06 k_B T^* \sqrt{1 - \frac{T}{T^*}}, \quad (10)$$

которая является лучшим приближением в температурном интервале $0.75T^* < T \leq T^*$. На сравнительном рис. 1 приведена температурная зависимость БКШ-подобной псевдощели Δ^*, аналитическое решение ур. (1) при значениях λ^*=0.57, T^*=98 К и численное решение ур. (10) при T^*=98 К. Из рис.1 можно увидеть, что эти приближения являются хорошими приближениями в температурном интервале $0.75T^* < T \leq T^*$, которые для наших численных расчетов достаточны, но при низких температурах имеется отклонение между ними.

Число некогерентных куперовских пар N_c и их температура БЭК определяются соответственно из следующих выражений:

$$N_c = \frac{1}{4} \mathrm{g}(\varepsilon_{\mathrm{F1}}) \int_{-\varepsilon_A}^{\varepsilon_A} \left[1 - \frac{\varepsilon}{E}\right] \frac{\mathrm{e}^{E/k_B T}}{\mathrm{e}^{E/k_B T} + 1} d\varepsilon, \quad (11)$$

и

$$T_{БЭК} = \frac{3.31 \cdot \hbar^2}{k_B m_c} N_c^{\ 3/2}, \quad (12)$$

где m_c=2m_p– масса поляронных куперовских пар, $\varepsilon_{F1} > \varepsilon_A$=0.1 эВ, m_p=2m_e.

Численные расчеты величин N_c и $T_{\text{БЭК}}$ показывают, что немного ниже T^* значение $T_{\text{БЭК}}$ очень близко к T^* (т.е. $T_{\text{БЭК}} \geq T^*$), но несколько ниже T^*, $T_{\text{БЭК}} \gg T^*$. Результаты расчетов для $C_e(T \leq T^*)$ и $C_e(T > T^*)$ чувствительно зависят от деталей распределения поляронных носителей между поляронной зоной и примесной зоной за счет изменения как ε_{Fi}, так и f_i. Фактически, поведение $C_e(T)$ чувствительно к выбору параметров ε_{Fi}, f_i, x и приводит нас к выводу, что самосогласованные расчеты, которые учитывают изменения в распределении соответствующих носителей заряда между поляронной зоной и примесной зоной, следует использовать для сравнения с экспериментом. Для легированных ВТСП-купратов наблюдаемые температурные зависимости C_e и C_e/T могут быть получены путем более подходящего выбора и тщательного изучения соответствующих подгоночных параметров. Такой подбор необходим для согласования теории с экспериментами по $C_e(T)$ в различных ВТСП-купратах. Количественная особенность $C_e(T)$ при T=T^*, в основном,

определяется конкуренцией псевдощелевых и примесных эффектов на $C_e(T)$. Эта конкуренция определяет форму и размер возможного БКШ-подобного скачка $C_e(T)$ выше T_c в недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратах. Когда БКШ-подобный вклад в $C_e(T<T^*)$, обусловленный ферми-составляющими возбужденных куперовских пар и несверхпроводящих бозонных куперовских пар, преобладает над вкладом, обусловленным неспаренными носителями в примесной зоне, ярко выраженная БКШ-подобная аномалия $C_e(T)$ проявляется при T^* (рис. 2). Однако, ситуация заметно изменится, если примесный вклад в $C_e(T)$ будет доминировать над БКШ-подобным вкладом. В этом случае, зависимость $C_e(T)$ выше T_c будет в значительной степени модифицирована из-за относительно большого примесного вклада в $C_e(T)$ и излом в $C_e(T)$ зависимости станет слабым или менее выраженной БКШ-подобной аномалией, что и наблюдается в экспериментах. На рис. 2 приведена электронная теплоемкость недолегированного сверхпроводящего купрата с уровнем легирования x=0.10, рассчитанная как функция приведенной температуры T/T^* вблизи T^*=140 K с использованием параметров $\varepsilon_{F1}\simeq0.189$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.043$ эВ и f_1=0.7, f_2=0.3. На вставке к рис. 2 показана электронная теплоемкость того же сверхпроводящего купрата, рассчитанная как функция приведенной температуры T/T^* вблизи T^*=160 K с использованием параметров $\varepsilon_{F1}\simeq0.086$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.068$ эВ и f_1=0.15, f_2=0.85, которые соответствуют перераспределению носителей заряда между поляронной зоной и примесной зоной.

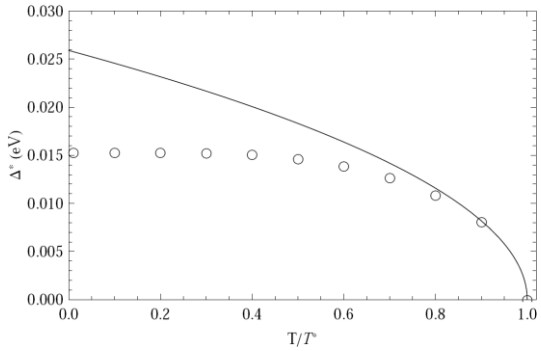


Рис. 1. Температурная зависимость псевдощели Δ^* и температура ее образования T^*

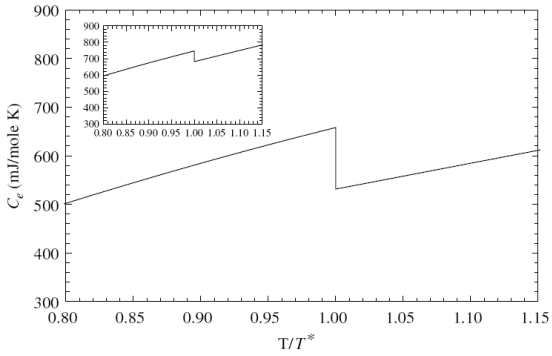


Рис. 2. Электронная теплоемкость недолегированного сверхпроводящего купрата; на вставке: электронная теплоемкость того же купрата

Кроме того, на рис. 3 и 4 приведены теоретически вычисленные значения $C_e(T\leq T^*)$ и $C_e(T\leq T^*)/T$ недолегированного сверхпроводящего купрата с уровнем легирования x=0.10, рассчитанные как функция приведенной температуры T/T^* вблизи T^*=140 K с использованием параметров $\varepsilon_{F1}\simeq0.189$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.043$ эВ и различными f_1 и f_2, которые соответствуют перераспределению носителей заряда между поляронной зоной и примесной зоной, а также как функция приведенной температуры T/T^* вблизи T^*=160 K с использованием параметров $\varepsilon_{F1}\simeq0.086$ эВ, $\varepsilon_{F2}\simeq0.068$ эВ и f_1=0.42, f_2=0.58.

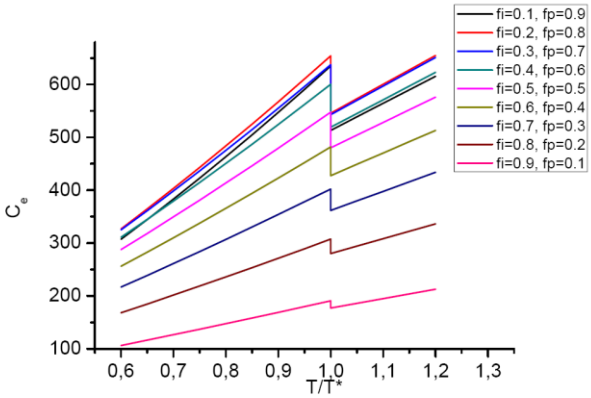


Рис. 3. Электронная теплоемкость недолегированного сверхпроводящего купрата рассчитанная как функция приведенной температуры T/T^*

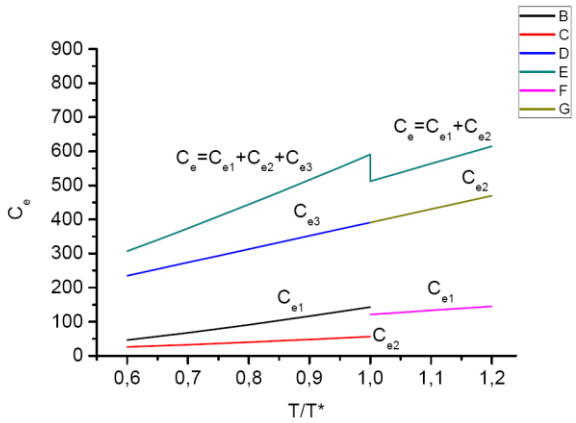


Рис. 4. Электронная теплоемкость недолегированного сверхпроводящего купрата рассчитанная как функция приведенной температуры T/T^*

На рис. 5 и 6 приведены сравнения теоретически вычисленных значений $C_e(T \leq T^*)$ и $C_e(T \leq T^*)/T$ с результатами экспериментальных работ группы Оды по электронной теплоемкости соединения LSCO, в интервале температур $0.8T^* < T \leq 1.15T^*$. Следует обратить внимание на то, что наблюдаемые поведения $C_e(T)$ и $C_e(T)/T$ очень похожи на результаты теоретических расчетов $C_e(T)$ и $C_e(T)/T$ для $T \leq T^*$ и $T > T^*$, показанные на рис. 5 и 6. Как видно из экспериментальных данных (см. размытые области между пунктирными линиями на рис. 5 и 6), разброс значений $C_e(T)$ и $C_e(T)/T$ достаточно велик. Тем не менее, для соединения LSCO вблизи T^* есть более или менее заметные БКШ-подобные скачки в зависимостях $C_e(T)$ и $C_e(T)$/T. Скачок $C_e(T)$ вблизи T^* (см. рис. 5) похож как по форме, так и по размеру, на ступенчатую БКШ аномалию, которая наблюдается в ВТСП-купратах выше T_c. Учитывая возможные шумы или ошибки в экспериментах и достаточно большой разброс экспериментальных точек (например, на рис. 5 и 6), с уверенностью можно сказать, что наши расчетные результаты для $C_e(T)$ находятся в удовлетворительном количественном согласии с экспериментальными данными по $C_e(T)$ для соединений LSCO и YBCO, как показано на рис. 5 и 6. В обеих областях температур $T < T^*$ и $T > T^*$ аппроксимирующие кривые удовлетворительно воспроизводят экспериментальные данные. В частности, аппроксимирующие кривые $C_e(T)$ и $C_e(T)/T$ на рис. 5 и 6 находятся в пределах экспериментальных шумов и поэтому являются приемлемыми. Здесь следует отметить, что даже когда некоторые авторы обнаружили скачок теплоемкости выше T_c, они приписали его фазовому переходу, отличному от БКШ-подобного перехода, или просто пренебрегли им.

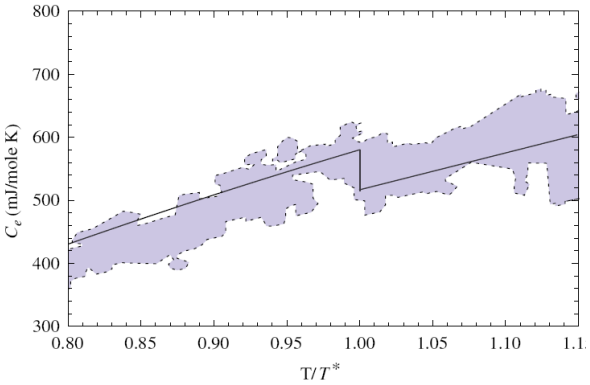


Рис.5. Электронная теплоемкость LSCO с уровнем легирования x=0.10 (сплошная линия), рассчитанная как функция приведенной температуры T/T^* вблизи T^*=98 Ки сравнение с экспериментальными данными для LSCO с уровнем легирования x=0.10 (пунктирная линия) (Oda M. et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2232)

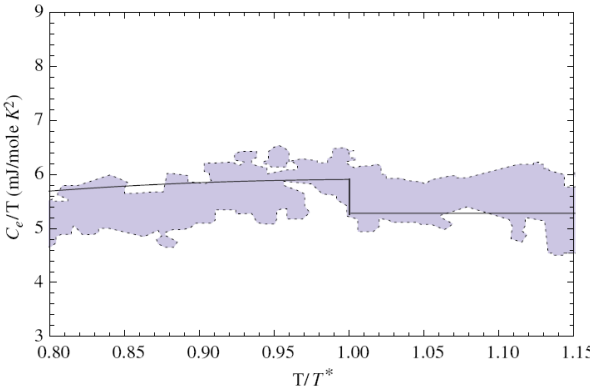


Рис. 6. Температурная зависимость C_e/T для LSCO с уровнем легирования x=0.10 (сплошная линия), рассчитанная как функция приведенной температуры T/T^* вблизи T^*=98 K и сравнение с экспериментальными данными (пунктирная линия) (Oda M. et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 2232)

Однако, на первый взгляд некоторые экспериментальные данные по $C_e(T)$ кажется, вообще не свидетельствуют о значительных скачкообразных аномалиях выше T_c, но при более внимательном рассмотрении обнаруживаются изломы наклона $C_e(T)$ или $C_e(T)/T$ при различных температурах $T>T_c$ в ВТСП-купратах. Поэтому, мы можем предположить, что в купратах на местах излома кривой зависимости $C_e(T)$ при $T^*=T$ имеется БКШ-подобный фазовый переход. На самом деле, при высоких температурах ($T=T^*$) основной вклад в теплоемкость вносят фононы, и невозможно точно отделить электронную часть теплоемкости от общей теплоемкости. Вблизи температуры T^* из-за вклада фононов общая теплоемкость очень велика по сравнению с электронной частью теплоемкости и поэтому наблюдение аномалии из-за возникновения БКШ-подобной псевдощели будет затруднительным. Но, тщательная проверка данных теплоемкости соединений LSCO и YBCO показывает, что такая аномалия явно присутствует. Из вышеприведенных соображений следует, что ожидаемые БКШ-подобные скачки электронной теплоемкости ВТСП купратов при $T^*>T_c$ часто замаскированы шумами и наблюдаются как менее выраженные скачки из-за влияния неоднородностей распределения примесей и образца.

В третьей главе «**Электронная теплоемкость ВТСП купратов в сверхпроводящем состоянии**» представлены результаты теоретических исследований теплоемкости сверхтекучей Бозе-жидкости, теплоемкости ВТСП-купратов при низких температурах ($T<<T_c$) и теплоемкости ВТСП-купратов вблизи температуры сверхпроводящего перехода ($T<T_c$).

Теплоемкость сверхтекучей бозе-жидкости определяется из следующего соотношения (Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Стат. Физ. Часть 2. М. Наука, 1978. С.448):

$$C_v(T) = \frac{1}{T^2}\sum_k n_B(k)[1 + n_B(k)]\left\{E_B^2(k) + T\left[\varepsilon\frac{\partial|\tilde{\mu}_B|}{\partial T} + \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial T}\Delta_{SF}^2\right]\right\}, \quad (12)$$

где $n_B(k) = \left[e^{E_B(k)/k_BT} - 1\right]^{-1}$, $E_B = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_B^2(k) - \Delta_B^2(k)}$, $\tilde{\varepsilon}_B(k) = \varepsilon_B(k) + \tilde{\mu}_B$– энергия бозонов, отсчитываемая от химпотенциала взаимодействующего бозе-газа, $\varepsilon_B(k) = \hbar^2k^2/2m_B$, $\Delta_B(k)$– параметр порядка (т.е. параметр когерентности) бозонов, m_B– масса бозонов.

Согласно теории сверхтекучей бозе жидкости (Дисс. Байматова П.Ж., Ташкент 1995, стр.137), энергетическая щель $\Delta_{SF} = \sqrt{\tilde{\mu}_B^2 - \Delta_B^2}$ существует в спектрах возбуждения сверхтекучей бозе-жидкости $E_B(k)$, когда константа связи межбозонного взаимодействия γ_B меньше некоторого критического значения γ_B^*, при котором энергетическая щель Δ_{SF} исчезает при $E = 0$. При низких температурах можно принять следующие условия: $k_BT \ll \tilde{\mu}_B$, Δ_B и $\Delta_B \approx$const, $\tilde{\mu}_B \approx$const. Поэтому теплоемкость сверхтекучего 3D бозе-газа определяется из следующего выражения:

$$C_v(T) \approx \frac{\Omega D_B}{2T^2}\int_0^\infty \sqrt{\varepsilon}\frac{d\varepsilon}{\sinh^2\frac{E_B(\varepsilon)}{2k_BT}}E_B^2(k). \quad (13)$$

При $\gamma_B > \gamma_B^*$ и $\Delta_{SF} > 2k_BT$ функцию $sinh[E_B(\varepsilon)/2k_BT]$ подинтегралом в ур. (13) можно заменить на $(1/2)exp[E_B(\varepsilon)/2k_BT]$. Далее, учитывая, что основной вклад в интеграл в ур. (13) вносят малые значения ε, мы можем заменить $E_B(\varepsilon)$ на $\sqrt{2|\tilde{\mu}_B|\varepsilon + \Delta_{SF}^2} \simeq \Delta_{SF} + |\tilde{\mu}_B|\varepsilon/\Delta_{SF}$ и, использовать разложение Тейлора по показателю $\sqrt{2|\tilde{\mu}_B|\varepsilon + \Delta_{SF}^2} \approx \Delta_{SF} + |\tilde{\mu}_B|\varepsilon/\Delta_{SF}$. Тогда, интегрируя ур. (13), получаем следующее выражение

$$C_v(T) \simeq \frac{3\Omega D_B\Delta_B^{5/2}}{|\tilde{\mu}_B|^{3/2}}\sqrt{\pi T}\left[1 + \frac{4}{3}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\Delta_{SF}}{k_BT}\right]exp\left(-\frac{\Delta_{SF}}{k_BT}\right). \quad (14)$$

При $\gamma_B < \gamma_B^*$ энергетическая щель Δ_{SF} в спектре возбуждения сверхтекучей 3D бозе-жидкости уменьшается с уменьшением температуры и исчезает ниже некоторой характеристической температуры T_c^* (Дисс. Байматова П.Ж., Ташкент 1995, стр.137). Поэтому, при $\gamma_B < \gamma_B^*$ и $T \leq T_c^*$ спектр возбуждения сверхтекучей 3D бозе-жидкости при малых значениях k является фононоподобным $E_B(\varepsilon) \sim \sqrt{|\tilde{\mu}_B|/m_B}\hbar k$, и следовательно, ее теплоемкость будет пропорциональна T^3 при низких температурах, т.е.,

$$C_v(T) \sim T^3. \quad (15).$$

Теперь обсудим характерные температурные зависимости электронной теплоемкости ВТСП-купратов при низких температурах ($T \ll T_c$) в рамках вышеизложенной теории сверхтекучей бозе-жидкости. Экспериментальные факты, касающиеся ВТСП-купратов, показывают, что электронная теплоемкость C_e в этих материалах пропорциональна T^2 или T^3 при низких

температурах и имеет линейный T член и четкую λ-подобную аномалию не только при T_c, но и несколько ниже T_c. Наблюдаемые низкотемпературные степенные законы для электронной теплоемкости сильно отличаются от экспоненциальной зависимости $C_e(T)$, представленной БКШ теории. Мы полагаем, что электронная теплоемкость ВТСП-купратов лучше всего описывается теорией сверхтекучей бозе-жидкости, а не БКШ-подобной моделью спаривания d–волн, поскольку при $\Delta_{SF}<\Delta_{SC}$ и особенно при $\Delta_{SF}<<\Delta_{SC}$ (или $\Delta_{SF}=0$) основной вклад в $C_e(T)$ в купратах вносится возбуждением составных бозонных куперовских пар, а не из-за возбуждения их ферми компонент. При $\Delta_{SF}=0$ предсказываемые этой теорией степенные (т.е. фононоподобные) температурные зависимости $C_e(T)\sim T^3$ и $\sim T^2$ в 3D и 2D в купратных сверхпроводниках действительно наблюдались экспериментально в ВТСП-купратах. Кроме того, согласно теории сверхтекучей бозе-жидкости электронная теплоемкость в 3D бозонных сверхпроводниках проявляет следующее температурное поведение $C_e(T)\sim(T_c-T)^{-0.5}$ около T_c, согласно которому $C_e(T)$ в ВТСП-купратах будет расходиться при $T\rightarrow T_c$ так же, как расходится теплоемкость сверхтекучего ^{4}He вблизи λ-подобного перехода. Отсюда следует, что трехмерные бозе-жидкости в нетрадиционных сверхпроводниках могут претерпевать с уменьшением температуры T фазовый переход второго рода при T_c, и они проявляют λ-подобную аномалию в их теплоемкости около T_c. В то время как сверхтекучая ферми-жидкость в БКШ-сверхпроводниках проявляет ступенчатый фазовый переход второго рода, сопровождающийся конечным скачком электронной теплоемкости при T_c, λ-подобные аномалии в $C_e(T)$ вблизи T_c наблюдались в ВТСП-купратах (Дисс. Байматова П.Ж., Ташкент 1995, стр.137). Кроме того, небольшой БКШ-подобный скачок $C_e(T)$, наблюдаемый в этих ВТСП материалах выше T_c или намного выше T_c, связан с БКШ-подобными фазовыми переходами второго рода при $T=T^*>T_c$ или $T=T^*>>T_c$ в их электронной подсистеме. В ВТСП-купратах поляронные носители связаны в бозонные куперовские пары выше T_c, и эти куперовские пары конденсируются в состоянии бозе-жидкости при T_c. Для взаимодействующего бозе-газа куперовских пар, химический потенциал и параметр когерентности вблизи T_c задаются в следующем виде (Дисс. Байматова П.Ж., Ташкент 1995, стр.137):

$$\tilde{\mu}_B(T) \approx \tilde{\mu}_B(T_c)[1 + a(T_c - T)^{0.5}], \tag{16}$$

и

$$\Delta_B(T) \approx 2\tilde{\mu}_B(T_c)a^{0.5}(T_c - T)^{0.25}, \tag{17}$$

где $a=2(c_0\gamma_B T_c)^{-0.5}(\varepsilon_{BA}/k_B T_c)^{0.25}$ и $c_0=\pi^{3/2}/3.912$ (S. Dzhumanov, Int. J. Mod. Phys. B. 12 (1998) 2151). Теперь обратимся к проблеме теплоемкости сверхтекучего бозе-газа, которая при $\Delta_B(T)<<\tilde{\mu}_B(T)<<k_B T_c$ расходится вблизи T_c как

$$C_{SF}(T) \sim (T_c - T)^{-0.5}, \tag{18}$$

и будет проявлять λ-подобную аномалию при T_c (т.е. поведение $C_{SF}(T)$ аналогично поведению сверхтекучего ^{4}He). Температурные производные $\tilde{\mu}_B$ и

Δ_B, входящие в выражение для $C_{SF}(T)$, вызывают такое λ-подобное расхождение. Путем введения количества сверхтекучей материи $\nu_B=N_B/N_A$ (где N_B– количество притягивающих бозонов (поляронных куперовских пар), а N_A– число Авогадро, которое равно количеству формульных единиц CuO_2 на единицу молярного объема) и молярной доли сверхтекучих бозонных носителей, определяемой как $f_s=\nu_B/\nu$ (где $\nu=N/N_A$– количество легированного вещества), мы можем записать молярную теплоемкость сверхпроводящего бозонного газа в ВТСП-купратах в следующем виде:

$$C_s(T) = f_s \frac{D_B k_B N_A}{4\rho_B (k_B T)^2} \int_0^{\varepsilon_{BA}} \frac{\sqrt{\varepsilon} d\varepsilon}{\sinh^2 \frac{E_B(\varepsilon)}{k_B T}} \left\{ E_B(\varepsilon) + \frac{a\tilde{\mu}_B(T_c)T}{2(T_c - T)^{0.5}} [\varepsilon - \tilde{\mu}_B(T_c)] \right\}. \quad (19)$$

Здесь мы учли, что $\Omega/\nu_B=N_B\nu_B/\nu_B=\nu_B N_A$ и $\nu_B=1/\rho_B$. Как упоминалось выше, легирующие носители в купратах распределяются между поляронной и примесной зоной (с энергией Ферми ε_{F2}), а удельная теплоемкость несверхпроводящих носителей $C_n(T)$ ниже T_c также рассчитывается с учетом трех вкладов возбужденных компонент поляронных куперовских пар, идеального бозе-газа некогерентных куперовских пар и неспаренных носителей, связанных с примесями.

Наши теоретические расчеты сравниваются с результатами соответствующих экспериментов (V.N. Naumov et al., Physica C 262 (1996) 143; T. Matsuzaki et al., J. Phys. Chem. Sol. 62 (2001) 29) и довольно хорошо с ними согласуются (см. рис. 7 и 8).

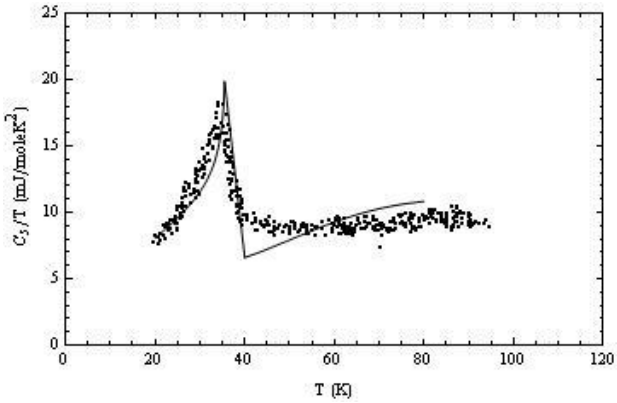


Рис. 7. Температурная зависимость электронной теплоемкости $HoBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, измеренная вблизи T_c и выше T_c и сравнены с экспериментальными (V.N. Naumov et al., Physica C 262 (1996) 143) данными (черные кружки)

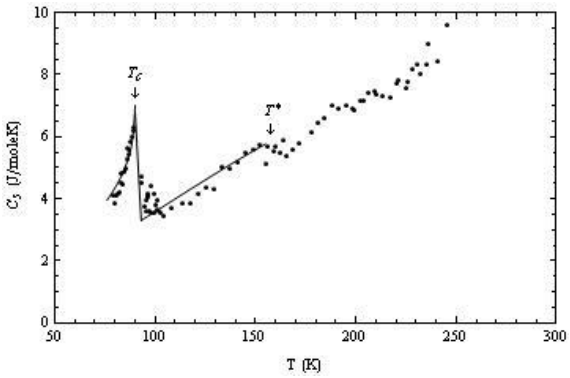


Рис. 8. Температурная зависимость электронной теплоемкости LSCO, измеренная вблизи T_c и выше T_c и сравнены с экспериментальными (T. Matsuzaki et al., J. Phys. Chem. Sol. 62 (2001) 29) данными (черные кружки)

В этом случае следует учитывать долю f_p легирующих носителей, находящихся в поляронной зоне, и другую долю f_I таких носителей, находящихся в примесной зоне, при сравнении теплоемкости $C_s(T)$ сверхпроводящего бозе-газа с экспериментальными данными. Таким образом,

общая удельная теплоемкость $C(T)=C_s(T)+C_e(T)$ ниже T_c рассчитывается с учетом трех указанных выше вкладов в $C_e(T)$ и сравнивается с экспериментальными данными для электронной теплоемкости в ВТСП-купратах (рис. 7 и 8). $C_s(T)$ рассчитывается с использованием параметров ε_F=0.12 эВ, ε_{FI}=0.012 эВ, f_p=0.3, f_I=0.7, а вклад сверхпроводимости $C_s(T)$ в $C_s(T)$ рассчитывается с использованием параметров $\rho_B=1{,}6\times10^{19}$ *см*$^{-3}$, $m_B=2{,}5m_p$, $\tilde{\mu}_B(T_c)$=1,6 мэВ и f_s=0.03 (рис. 7). Далее, $C_s(T)$ рассчитывается с использованием параметров ε_F=0.1 эВ, ε_{FI}=0.06 эВ, f_p=0.4, f_I=0.6, а вклад сверхпроводимости $C_s(T)$ в $C_s(T)$ рассчитывается с использованием параметров $\rho_B=1{,}4\times10^{19}$ *см*$^{-3}$, $m_B=2{,}7m_p$, $\tilde{\mu}_B(T_c)$=0.5 мэВ и f_s=0.012 (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «Аномалии электронной теплоемкости в легированных купратных высокотемпературных сверхпроводниках» представлены следующие выводы:

1. Определены температуры образования БКШ-подобной псевдощели и некогерентных куперовских пар T^* в нормальном состоянии недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратов.
2. Впервые получены аналитические выражения для электронной теплоемкости $C_e(T)$ ВТСП-купратов выше и ниже характеристической температуры T^* как функции температуры и уровня легирования в них.
3. Установлено, что прекурсивное куперовское спаривание поляронных носителей выше T_c приводит к БКШ-подобной аномалии электронной теплоемкости $C_e(T)$ недолегированных, оптимально легированных и умеренно сверхлегированных ВТСП-купратов при характеристической температуре образования псевдощели $T=T^*>T_c$.
4. Получены результаты для электронной теплоемкости $C_e(T)$ ВТСП-купратов выше и ниже характеристической температуры T^*, которые находятся в разумном согласии с экспериментальными данными.
5. Изучены температурные зависимости электронной теплоемкости $C_e(T)$ ВТСП-купратов в сверхпроводящем состоянии при низких температурах и показано, что $C_e(T)$ изменяется по степенным законам ($C_e(T)\sim T^2$ и $C_e(T)\sim T^3$).
6. Получено аналитическое выражение для электронной теплоемкости $C_e(T)$ ВТСП-купратов в сверхпроводящем состоянии вблизи температуры сверхпроводящего перехода T_c.
7. Впервые получено выражение и теоретически рассчитана электронная теплоемкость ВТСП-купратов в сверхпроводящем состоянии вблизи T_c в рамках модели сверхтекучей бозе-жидкости.
8. Выявлена возможность существования λ-подобной аномалии электронной теплоемкости ВТСП-купратов при температуре их

сверхпроводящего перехода T_c в зависимости от уровня легирования ВТСП-купратов LSCO и YBCO.

9. Получены результаты для электронной теплоемкости $C_e(T)$ ВТСП-купратов вблизи температуры сверхпроводящего перехода T_c, которые находятся в разумном согласии с экспериментальными данными.

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

INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

KARIMBAEV ELDOR XALMURATOVICH

ANOMALIES OF ELECTRONIC SPECIFIC HEAT IN DOPED HIGH-T_C CUPRATE SUPERCONDUCTORS.

01.04.07 – Condensed matter physics

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

Tashkent – 2021

The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD)on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under No.B2017.2.PhD/FM70.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physicsof the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

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

Scientific supervisor:	**Dzhumanov Safarali** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	**Ashurov Mukhsin Khurramovich** Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academic
	Rasulov Rustam Yavkachovich Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	**Andijan State University**

The defense of the dissertation will be held on "___" _____ 2021, at ___ at the meeting of the Scientific Council No.DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-41; fax (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Institute of Nuclear Physics (registered under No._____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on "_____"_____2021.
(Registry record No. ____ dated "___" _____ 2021.)

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

O.R. Tojiboev
Scientific secretary of the Scientific Council onaward
of Scientific degrees, PhD Ph.-M.S.

I. Nuritdinov
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council
on award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research is to determine the nature of the anomalous electronic specific heat in the normal and superconducting states depending on the doping level of high-T_c cuprates LSCO and YBCO at temperatures above and below the superconducting transition temperature.

The tasks of the research:

to study the nature of possible types of charge carriers in doped high-$T_c$cuprates;

to reveal analytical expressions for describing the electronic specific heat of doped high-$T_c$cuprates in their normal state;

to calculate the electronic specific heat of high-T_c cuprates above and below of the BCS-like pseudogap formation temperature T^*;

to determine the possible behavior of the electronic specific heat of high-T_c cuprates $C_e(T)$ and establish the nature of the anomaly in $C_e(T)$ near T^* at various doping levels;

to identify the calculated temperature dependences $C_e(T)$ in the normal state of doped high-T_c cuprates above T_c with the existing experimental results;

to obtain explicit analytical expressions for the specific heat of the superfluid Bose-gas near T_c in the doped high-T_c cuprates;

to calculate the electronic specific heat of high-T_c cuprates in their superfluid state near T_c and determine the possibility of the existence of a λ-like anomaly in $C_e(T)$ at T_c;

to identify the calculated temperature dependences of $C_e(T)$ in the superconducting state of doped high-T_c cuprates near T_c with the existing experimental data.

The objects of the research are (bi)polarons, underdoped, optimally doped and moderately overdoped high-T_c cuprates.

The subjects of the research is the anomaly of the electronic specific heat on the temperature of formation of pseudogaps T^* and at the temperature of the superconducting transition T_c in high-$T_c$cuprates at different levels of their doping.

The scientific novelty of the research is as follows:

for the first time, analytical expressions were obtained for the electronic specific heat $C_e(T)$ of high-T_c cuprates above and below the formation temperature of a BCS-like pseudogap T^* as a function of temperature and doping level, satisfactorily describing the experimental data on the electronic specific heat at T^* in doped high-$T_c$cuprates;

the nature of the anomaly in the electronic specific heat of high-T_c cuprates above the critical temperature of the superconducting transition T_c, caused by the BCS-like phase transition at thetemperature of formation of the BCS-like pseudogap $T^*>T_c$, has been determined;

for the first time an expression was obtained and the electronic specific heat of high-T_c cuprates in the superconducting state near the superconducting transition

temperature T_c was theoretically calculated within the framework of the superfluid Bose-liquid model;

the possibility of the existence of a λ-like anomaly in the electronic specific heat of high-T_c cuprates at their superconducting transition temperature T_c, depending on the doping level of high-T_c cuprates LSCO and YBCO, has been estimated.

Implementation of the research results. Based on the obtained scientific results on the study of the anomaly of the electronic specific heat in the normal and superconducting states in doped high-T_c cuprates:

the obtained analytical expressions for the electronic specific heat $C_e(T)$ of high-T_c cuprates above and below the BCS-like pseudogap formation temperature T^* were used to study the unusual thermodynamic properties of high-T_c materials at the Physical-Technical Institute for Low Temperatures of the National Academy of Sciences of Ukraine in the framework of the research the project "Low-temperature transport properties of low-dimensional and highly anisotropic conductors" (2013–2017) (Letter from the B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Ukraine No. 64/310 dated 20.04.2021). The use of scientific results made it possible to explain the behavior of the electronic specific heat in high-T_c superconductors;

the revealed nature of the anomaly in the electronic specific heat of high-T_c cuprates above the critical temperature of the superconducting transition T_c was used to study the unusual electronic properties of polymer composite materials at the Kazakh National University within the framework of the grant of the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan No. based on organometallic perovskites”(2015–2017) (Letter of the Kazakh National University named after al-Farabi No. 19–9–1239 dated 21.04.2021). The use of scientific results made it possible to develop a scientific basis for the creation and practical use of efficient solar cells using nanostructured layers and a photonic crystal;

the obtained expression and the theoretically calculated electronic specific heat of high-T_c cuprates in a superconducting state near the superconducting transition temperature T_c was used to study the unusual electronic properties of polymer composite materials at the Kazakh National University within the framework of the Science Committee grant of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan No. 3079GF4 "Creation and research of new highly efficient solar cells based on organometallic perovskites" (2015–2017) (Letter of the Kazakh National University named after al-Farabi No. 19–9–1239 dated 04.21.2021), the results were also used by foreign researchers (references in international scientific journals Journal of Physics: Conference Series 592, 012075, 2015; International Journal of Modern Physics B 29, No.24, 1550180, 2015; Physics Letters A 383, 1330-1335, 2019) to study the electronic specific heat anomaly in the normal state of high-T_c cuprates LSCO and YBCO at different doping levels. The use of scientific results made it possible to explain the nature of charge transfer in inhomogeneous cuprates;

the revealed possibility of the existence of a λ-like anomaly in the electronic specific heat of high-T_c cuprates at their superconducting transition temperature T_c depending on the doping level of high-T_c cuprates LSCO and YBCO was used to explain the possible formation of strongly coupled bosons in the region of a high-T_c pseudogap state in high-T_c at the Physical-Technical Institute Low Temperatures of the National Academy of Sciences of Ukraine in the framework of the research project "Low-temperature transport properties of low-dimensional and highly anisotropic conductors" (2013–2017) (Letter from the B.I. Verkin Physical-Technical Institute for Low Temperatures of the National Academy of Sciences of Ukraine No. 64/310 dated 04/20/2021). The use of scientific results made it possible to substantiate the choice of the maximum temperature dependence of the pseudogap as the temperature of the BEC-BCS crossover in YBCO cuprates.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation is presented on 95 pages consisting of an introduction, three chapters, conclusion and a bibliography and two appendices.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; Part I)

1. Джуманов С., Каримбоев Э.Х. Необычные тепловые свойства недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратов выше T_c // Доклады Академии наук Республики Узбекистан. –Ташкент, 2013.–№4.–С.18–20. (01.00.00. №7)
2. Dzhumanov S., Karimboev E.X., Djumanov Sh.S., Kurbanov U.T. The electronic specific heat anomalies in the normal state of high-T_c cuprate superconductors // Uzbek Journal of Physics. Uzbekistan.–Tashkent, 2013.–V.15, №5–6.–pp.253–260. (01.00.00. №5)
3. Dzhumanov S., Karimboev E.X. Competing Pseudogap and Impurity Effects on the Normal-State Specific Heat Properties of Cuprate Superconductors // Physica A. –Elsevier, 2014. –vol. 406. –pp.176–184. (№4. Journal Citation Reports; IF=2.924).
4. Dzhumanov S., Karimboev E.X., Yavidov B.Ya. Electronic specific–heat anomalies in high-T_c cuprates // Вестник НУУз. –Ташкент, 2017.–№2/1. –С.34–47 (01.00.00. №8).

II бўлим (II часть; PartII)

5. Dzhumanov S., Karimboev E.X., Rashidov J.Sh. Possible anomalies of the electronic specific heat and their experimental manifestations in high-T_c cuprates // The Bulletin of Young Scientists. –Tashkent, 2019. –№1 (3).–pp.53–55.
6. Dzhumanov S., Karimbaev E.X. Electronic specific heat anomalies in high-T_c cuprates. // IX International Conference "Modern problems of Nuclear physics and Nuclear technologies"24–27 September 2019. –Tashkent (Uzbekistan), 2019.–pp.229–230.
7. Dzhumanov S., Karimboev E.X. The behaviors of the electronic specificheat of high-T_c cuprates near the superconducting and pseudogap transition temperature. // 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors, August 19–24, 2018. –Beijing (China), 2018. –pp.718.
8. Dzhumanov S., Karimbaev E.X. Competing pseudogap and impurity effects on the normal-state specific heat properties of cuprate superconductors // Международная конференция молодых ученых: «Nanoscience & Nanomaterials», Центр передовых научных исследований имени Джавахарлала Неру (JNCASR) и TWASROCASA, 17–21 февраля 2015. –Бангалор (Индия), 2015. –p.68.
9. Dzhumanov S., KarimboevE.X. Effects of the pseudogap and defects on the specific heat properties of cuprate superconductors. // VII Eurasian Conference

«Nuclear Science and its Application», October 21–24, 2014. –Baku (Azerbaijan), 2014. –pp.218.
10. Джуманов С., Каримбоев Э.Х. Термодинамические свойства недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратов // Тезисы Республиканской конференции «Актуальные проблемы теоретической и ядерной физики» 25–26 октября 2013 г.–Ташкент: НУУз, 2013.–С.57.
11. Джуманов С., Каримбоев Э.Х., Курбанов У.Т., Хакбердиев У.А. Теоретические исследования аномалии электронной теплоемкости в недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратах // Международная конференция молодых ученых и специалистов «Актуальные вопросы мирного использования атомной энергии», 6–8 июня 2012 г. –Алматы (Казахстан), 2012.–С.55–56.