

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

SHERALIYEV MASHRAB UMURZAKOVICH

**O‘TALEGIRLANGAN KUPRATLARDA BKSH-SIMON FERMI-
SUYUQLIKLI O‘TA O‘TKAZUVCHANLIK RO‘Y BERISH MUMKINLIGI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

**Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

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

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

Sheraliyev Mashrab Umurzakovich

О‘talegirlangan kupratlarda BKSh-simon Fermi-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlik
ro‘y berish mumkinligi3

Шералиев Машраб Умурзакович

О возможности реализации БКШ-подобной ферми-жидкостной
сверхпроводимости в сверхлегированных купратах.....23

Sheraliyev Mashrab Umurzakovich

On the possibility of realizing BCS - like Fermi - liquid
superconductivity in overdoped cuprates.....47

E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....51

**YADRO FIZIKASI INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR
BERUVCHI DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

SHERALIYEV MASHRAB UMURZAKOVICH

**O‘TALEGIRLANGAN KUPRATLARDA BKSH-SIMON FERMI-
SUYUQLIKLI O‘TA O‘TKAZUVCHANLIK RO‘Y BERISH MUMKINLIGI**

01.04.07 – Kondensirlangan holat fizikasi

**fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FM1108 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Doktorlik dissertatsiyasi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.inp.uz) va "Ziyonet" Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar: **Djumanov Safarali**
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponenlar: **Raximov Abdulla Mannabovich**
fizika-matematika fanlari doktori, katta ilmiy hodim

Rasulov Rustam Yavkachovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Yetakchi tashkilot: **Buxoro davlat universiteti**

Dissertatsiya himoyasi Yadro fizikasi instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil _____ soat _____ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100174, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel. (+99871) 289-31-41; faks (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Dissertatsiya bilan Yadro fizikasi institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (_____ raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100214, Toshkent shahri, Ulug'bek qo'rg'oni, Yadro fizikasi instituti. Tel. (+99871) 289-31-19).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil " _____ kuni tarqatildi.
(2025-yil " _____ " _____ dagi _____ raqamli reyestr bayonnomasi)

M.Yu. Tashmetov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash raisi, f.-m.f.d., professor

O.R. Tojiboev
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash ilmiy kotibi, f.-m.f. PhD.,
katta ilmiy xodim

S.B. Igamov
Ilmiy darajalar beruvchi Ilmiy
kengash huzuridagi Ilmiy seminar raisi,
f.-m.f.d., katta ilmiy xodim

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va ahamiyati. Hozirgi kunda legirlangan mis oksidli (kupratli) birikmalarda o'ta o'tkazuvchanlik hodisasining tabiati va kelib chiqishini o'rganish zamonaviy kondensirlangan holat fizikasining eng dolzarb masalalaridan biri hisoblanadi. 1986-yilda kashf etilgan yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarga (YuHO'O') bo'lgan eng katta qiziqish, xona haroratiga yaqin bo'lgan kritik harorat (T_c) ga ega materiallarni yaratish imkoniyati bilan bog'liq. Bu esa energetika va yuqori texnologiyalar uchun keng istiqbollarni ochadi. Qariyb qirq yillik jadal tadqiqotlarga qaramay, kam legirlangan, optimal legirlangan va o'rtacha o'ta legirlangan kupratlardagi g'ayrioddiy o'ta o'tkazuvchanlikning tabiatini to'liq tushunish hali ham muammoligicha qolmoqda. Asosiy qiyinchiliklar ularning o'ta o'tkazuvchanlik holatidagi juda g'ayrioddiy xususiyatlari bilan bog'liq. Bu xususiyatlarni tushunish mikroskopik nazariyani yaratish uchun muhim ahamiyatga ega.

Jahon amaliyotida YuHO'O'-kupratlarda T_c dan yuqori psevdotirgish holatini va g'ayrioddiy o'ta o'tkazuvchanlik holatini tavsiflash uchun ko'plab nazariy yondashuvlar mavjud: kuchli elektron korrelyatsiya modellari (Xabbardning o'zgartirilgan modeli), shuningdek, bipolyaronlar va boshqa kvazizarralarning Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi (BEK) modellari. Biroq, ularning aksariyati legirlangan YuHO'O'-kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlik holatini tavsiflashda jiddiy qiyinchiliklarga duch kelmoqda. Ayniqsa, bu materiallarda kuper juftliklarining fermion yoki bozon tabiatini ishonchli asoslamasdan BKSh-simon modellarni qo'llash muammoli hisoblanadi. Shu sababli, legirlangan kupratlarda T_c dan past haroratlarda o'ta o'tkazuvchanlik holatining shakllanishini tavsiflaydigan mos nazariyani ishlab chiqish g'oyat dolzarb vazifa hisoblanadi.

Respublikamizda kondensirlangan holatlar fizikasini (xususan, nanostrukturali va o'ta o'tkazuvchan materiallar fizikasi hamda yarim o'tkazgichlar fizikasi) rivojlantirishga va bu yo'nalishda jahon darajasida fundamental tadqiqotlar olib borishga katta e'tibor qaratilmoqda. Mamlakatimizda ilm-fanni rivojlantirish va kelajakda amaliyotga tatbiq etish uchun muhim ahamiyatga ega bo'lgan ushbu fundamental tadqiqotlarning yo'nalishlari 2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekiston taraqqiyot strategiyasida o'z aksini topgan. Shu munosabat bilan O'zR FA Yadro fizikasi instituti va bir qator oliy ta'lim muassasalari hamda ilmiy markazlarda kristallar, nanostrukturalar va yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarning elektrofizik va fotoelektrik xususiyatlari bo'yicha tadqiqotlar olib borilmoqda. Kuprat materiallardagi o'ta o'tkazuvchanlik mexanizmlarini tushunish, shuningdek, istiqbolli funksional materiallarni ishlab chiqish uchun ahamiyatli natijalar qo'lga kiritilgan.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 13-fevraldagi PQ-2772-sonli "2017-2021-yillarda elektrotexnika sanoatini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlari to'g'risida", 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-sonli "Fanlar akademiyasi faoliyatini,

ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida", 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli "O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi institutining ilmiy-tadqiqot faoliyatini qo'llab-quvvatlash chora-tadbirlari to'g'risida"gi qarorlarida hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalarni rivojlantirishning II. "Energetika, energiya tejamkorligi va muqobil energiya manbalari" ustuvor yo'nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Butun dunyo bo'ylab ko'plab olimlar legirlangan kuprat materiallarda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikning turli jihatlarini tadqiq etmoqda, Masalan, amerikalik (R. Feynman, T. Holstein, P.W. Anderson, S.A. Kivelson, P.A. Lee, J. Devreyes, D. Emin, L.N. Cooper, W.J. Emery va b.), ingliz (R. Peierls, N.F. Mott, A. Wilson, J. Hubbard, D.M. Egles, P. P. Edwards, R.L. Johnston, A. Carrington, J.W. Loram, T. Rice va b.), yaponiyalik (Y. Toyozawa, S. Uchida, Y. Koike, S. Ono, Y. Ando, M. Ido, A. Matsuda, T. Kato va b.), italiyalik (A. Bianconi, Gianni A. Varlamov, C. Castellani, G. Balestrino, Nicola L. Saini, G. Margaritondo va b.), rossiyalik (L.D. Landau, S.I. Pekar, D.I. Khomsky, A.S. Alexandrov, V.F. Gantmakher, yangi zelandiyalik (J. Tallon, B. Buckley, N. Strickland, J. Storey va b.), sloveniyalik (F. Horváth, G. Pristáš, K. Flachbart) va boshqa mutaxassislar tomonidan o'rganilgan.

Natijada bir qator qiziqarli ilmiy natijalarga erishildi, xususan: o'ta o'tkazuvchanlikga o'tishda elektron issiqlik sig'imida λ -simon anomaliya aniqlandi; YuHO'O'-kupratlarning tajribaviy va nazariy elektron fazaviy diagrammalari taklif etildi; mutlaq nol haroratda va legirlashning ma'lum bir kritik darajasida yashirin kvant kritik nuqta mavjudligi bashorat qilindi va tasdiqlandi; kritik tok, magnit maydonlar va magnit maydonning kirish chuqurligining haroratga g'ayrioddiy bog'liqligi aniqlandi; normal va o'ta o'tkazuvchanlik holatlarida Fermi sathi yaqinida bir zarrachali qo'zg'alishlar zichligining pasayishi bilan bog'liq bo'lgan elektron xususiyatlarining anomaliyalari ko'rsatib berildi. Kuper juftliklarini tavsiflash uchun ko'pincha fermi-suyuqlik o'ta o'tkazuvchanligining BKSh-simon nazariyasi, shuningdek, BKSh-senariyni kuchli bog'langan juftliklarning BEK-kondensatsiyasi bilan bog'lovchi interpolyatsion modellar qo'llaniladi. Biroq o'zaro ta'sirlashmaydigan bozonlarning (xolonlar va bipolyaronlar) oddiy BEK modeli YuHO'O'ni to'liq tavsiflashga qodir emas.

Ko'p sonli tajriba ma'lumotlari va turli nazariy yondashuvlarga qaramay, kam legirlangan, optimal legirlangan va o'ta legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlardagi g'ayrioddiy o'ta o'tkazuvchanlik holatlarining tabiati hamon noaniq. Birorta model ham tajribada kuzatilgan barcha o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlarini miqdoriy jihatdan tushuntira olmaydi va legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan

kupratlarning elektron faza diagrammalarini to‘g‘ri bashorat qila olmaydi. BKSh-simon nazariyalarni qo‘llash faqat Kuper juftliklarining fermion tabiatida mumkin, biroq bu masala va nazariyaning qo‘llanilishi legirlash darajasiga qanchalik bog‘liqligi hamon hal etilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining mavzusi dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog‘liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining № OT-F2-15 “Yuqori haroratli o‘ta o‘tkazgichlar va ularga o‘xshash kondensirlangan tizimlarning yangi o‘ta o‘tkazuvchanlik va o‘ta oquvchanlik xususiyatlarini nazariy tadqiq etish” (2017-2020) mavzusidagi ilmiy loyiha hamda O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo‘ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan “YuHO‘O‘-kupratlarning elektron nazariyasi va uni dielektrik/metall va o‘ta o‘tkazuvchanlik fazalarining hosil bo‘lishi va nanomasshtabli bo‘linishida tadqiq qilish uchun qo‘llash” mavzusi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi o‘ta legirlangan kupratlarda fermi-suyuqlik o‘ta o‘tkazuvchanligining mos BKSh-simon nazariyasini rivojlantirish hamda kuper juftliklarining fermion tabiatini va ulardagi fermion-bozon o‘tishini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

kam legirlangan, optimal legirlangan va o‘ta legirlangan kupratlardagi xarakterli Fermi energiyalarini aniqlash;

kuper juftliklarining fermion tabiatini belgilovchi universal va mikroskopik mezonlarni hamda legirlangan kupratlarda fermion-bozon o‘tish imkoniyatlarini o‘rganish;

o‘ta legirlangan kupratlarda elektron/kovak zaryad tashuvchilarning Kuper juftlanishining mos BKSh-simon nazariyasini rivojlantirish;

o‘ta legirlangan kupratlarda BKSh-simon Fermi suyuqligining o‘ta oquvchanlik mezonlarini aniqlash;

o‘ta legirlangan kupratlarda BKSh-simon Fermi-suyuqlik o‘ta o‘tkazuvchanligini amalga oshirish imkoniyatlarini ko‘rsatish va ulardagi o‘ta o‘tkazuvchanlik parametrlarini legirlash darajasiga bog‘liq funksiya sifatida aniqlash.

Tadqiqotning obyekti sifatida o‘ta legirlangan kupratli o‘ta o‘tkazgichlar va ulardagi kvazierkin kovaklarning o‘zaro ta’sirlashuvchi Fermi gazi olingan.

Tadqiqotning predmeti o‘ta legirlangan kupratlarning o‘ta o‘tkazuvchanlik parametrlari va bu parametrlarga legirlash darajasining ta’siri hisoblanadi.

Tadqiqotning usullari: Tadqiqotda kvant va statistik mexanika hamda qattiq jism nazariyasi usullari, kuchli bog‘lanish usuli, shuningdek kompyuter grafikasi dasturlari (Mathematica, OriginPro 8, CorelDRAW) qo‘llanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi:

kam legirlangan, optimal legirlangan va o‘ta legirlangan kupratlarda xarakterli Fermi energiyalari aniqlandi va o‘ta legirlangan kupratlarda Fermi energiyasi kam

legirlangan va optimal legirlangan kupratlardagi Fermi energiyalaridan sezilarli darajada yuqori ekanligi ko'rsatilgan;

o'ta legirlangan kupratlarda Kuper juftliklarining fermion tabiatini aniqlovchi universal miqdoriy mezonlar ishlab chiqilgan va optik fononlar bilan o'zaro ta'sirda bo'lgan kvazierkin kovakli tashuvchilarning Kuper juftlashuviga mos BKSh-simon nazariyasi rivojlantirilgan;

birinchi marta fermion Kuper juftliklari uchun Landauning o'ta oquvchanlik mezoni aniqlangan va o'ta legirlangan kupratlarda BKSh-simon o'ta o'tkazuvchanlik tartib parametri va o'ta o'tkazuvchanlikga o'tishining kritik haroratining legirlash darajasiga bog'liqligi aniqlangan;

birinchi marta turli xil o'ta legirlangan kupratlarda nazariy hisoblangan va tajribada aniqlangan o'ta o'tkazuvchanlikning tartib parametrlari va o'ta o'tkazuvchanlikga o'tishining kritik harotatlari o'rtasida yaxshi moslik aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari:

o'ta legirlangan kupratlar va ularga o'xshash materiallarning o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlarini yaxshi tavsiflovchi fermi-suyuqlik o'ta o'tkazuvchanligining BKSh-simon nazariyasi ishlab chiqildi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi zamonaviy va yaxshi sinovdan o'tgan nazariy va statistik fizika usullari, fermionlarning o'rtacha maydon usullari qo'llanilishi, shuningdek, analitik va sonli hisob-kitoblarning mavjud eksperimental ma'lumotlar bilan mos kelishligi asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalari turli xil qattiq jismlarda Fermi-suyuqlik o'ta o'tkazuvchanligining BKSh-simon nazariyalarining qo'llanilish chegaralarini aniqlash imkonini beradi, shuningdek, o'ta o'tkazuvchanlik va o'ta oquvchanlik hodisalarining boshqa tizimlarda keyingi nazariy tadqiqotlari uchun ularning ilmiy ahamiyatini aniqlashtiradi va konkretlashtiradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda Kuper juftliklarining fermion tabiatini aniqlash uchun olingan mezonlar va taklif qilingan Fermi-suyuqlik o'ta o'tkazuvchanligining BKSh-simon nazariyasida asoslanadi. Ushbu mezon va nazariyalar o'ta o'tkazuvchanlik va o'ta oquvchanlik hodisalarini boshqa tizimlarda, xususan, o'ta legirlangan yarimo'tkazgichlarda va o'ta oquvchan ^3He da tadqiq qilishda qo'llanilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. O'talegirlangan kupratlarda BKSh-simon Fermi-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanligini o'rganish natijasida olingan ilmiy natijalar asosida:

kam legirlangan, optimal legirlangan va o'ta legirlangan kupratlarning Fermi energiyalarini aniqlash formulalari; o'ta legirlangan kupratlarda Kuper juftliklarining fermion tabiatini belgilovchi universal miqdoriy mezonlar va ushbu kuprat o'ta o'tkazgichlarda kvazi-erkin kovak tashuvchilarning optik fononlar bilan o'zaro ta'sirlashuvida Kuper juftlashuvining BKSh-simon nazariyasi; fermion Kuper juftliklari uchun taklif etilgan Landau o'ta oquvchanlik mezoni va o'ta legirlangan

kupratlarda BKSh-simon o'ta o'tkazuvchanlik tartib parametri hamda o'ta o'tkazuvchanlikka o'tishning kritik haroratining konsentratsiyaga bog'liqlik tenglamalari Namangan muhandislik-qurilish institutining «Fizika» kafedrasida 2022-2026 yillarga mo'ljallangan FZ-20200929243 loyihasi doirasida foydalanilgan (Namangan davlat texnika universitetining 2025 yil 4-iyundagi №01/10-09/682 raqamli xati). Natijalardan foydalanish kuchli elektromagnit maydonda qizdirilgan elektronlar va fononlarning yarim o'tkazgichli quyosh fotoelektrik elementlari hamda nanostrukturalar xususiyatlariga ta'sirini o'rganishda ilmiy-uslubiy asos sifatida xizmat qilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 4 ta xalqaro va respublika miqyosidagi ilmiy-amaliy anjumanlarda ma'ruza qilingan va muhokama etilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 8 ta ilmiy ish chop etilgan, jumladan 4 tasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda, 3 tasi xorijiy ilmiy jurnallarda.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, uch bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan tashkil topgan. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 117 betni tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslab berilgan, tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, obykti, predmeti va usullari aniqlangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi bayon etilgan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarni joriy etish, ishni sinovdan o'tkazish va dissertatsiya tuzilishi haqida qisqacha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Metallar va legirlangan mis-oksiddli (kupratli) birikmalarda o'ta o'tkazuvchanlikning turli taklif etilgan mexanizmlari”** deb nomlangan birinchi bobida tadqiqot yo'nalishi bilan bog'liq adabiyotlar tahlili berilgan. Legirlangan kupratlarning o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlari an'anaviy past haroratli metall o'ta o'tkazgichlarnikidan sezilarli darajada farq qiladi. Ko'plab fenomenologik va mikroskopik yondashuvlar, jumladan, modifikatsiyalangan BKSh nazariyalari mavjud bo'lishiga qaramay, yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik mexanizmlarini to'liq tushuntirish hamon yechimini topmagan masala bo'lib qolmoqda. Fermi suyuqligiga o'xshash xususiyatlarga ega bo'lgan o'ta legirlangan kupratlarga alohida e'tibor qaratish lozim. Bu esa mazkur sohada asosan fermion tabiatiga ega bo'lgan kuchsiz bog'langan kuper juftliklari tufayli BKSh-simon fermion o'ta o'tkazuvchanlik mavjud bo'lishi mumkinligini taxmin qilishga asos bo'ladi. Shu munosabat bilan

bunday juftliklarning amalga oshish sharoitlarini o'rganish hamda BKSh-simon mexanizm doirasida o'ta o'tkazuvchanlik holatiga o'tishni tavsiflovchi kritik parametrlarni aniqlash dolzarb masala hisoblanadi.

Dissertatsiyaning “**Legirlangan kupratlarda kuper juftlarining fermion tabiati va fermion-bozon o'tishini aniqlash mezonlari**” nomli ikkinchi bobida biz kam legirlangan, optimal legirlangan va o'ta legirlangan kupratlarning xarakterli Fermi energiyalarini aniqladik hamda legirlangan kupratlarda Kuper juftliklarining fermion tabiatini va fermion-bozon o'tishini aniqlash mezonlarini o'rgandik. Kam legirlangan va optimal legirlangan YuHO'O'-kupratlarning Fermi energiyasini aniqlashda ushbu YuHO'O'-materiallardagi kovakli zaryad tashuvchilarning polyaron tabiatini hisobga oldik. Bunda legirlangan kupratlardagi katta polyaronlarning Fermi energiyasi quyidagicha aniqlanadi:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 [3\pi^2 n_h]^{2/3}}{2m_p}, \quad (1)$$

bu yerda n_h - kovakli tashuvchilar konsentratsiyasi, m_p - katta polyaronlarning massasi.

O'ta legirlangan kupratlarda polyaron effekti yo'qolganda, kovakli polyaron tashuvchilarning massasi kvazi-erkin kovaklarning massasiga teng bo'ladi, ya'ni $m_p = m_h^* = m_e$, m_h^* - kovaklarning effektiv massasi. Shu sababli, o'ta legirlangan kupratlardagi kovakli tashuvchilarning Fermi energiyasi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 [3\pi^2 n_h]^{2/3}}{2m_h^*}, \quad (2)$$

(1) va (2) ifodalaridan foydalanib, biz kam legirlangan, optimal legirlangan va o'ta legirlangan kupratlardagi kovak polyaronlar va erkin kovak tashuvchilarning xarakteristik Fermi energiyalarini hisoblab chiqdik. Ushbu hisob-kitoblarning natijalari *LSCO* va *YBCO* YuHO'O'-kupratlari uchun 1 va 2 - jadvallarda keltirilgan.

1-jadval

LSCO kupratlarining kam legirlangan (KL), optimal legirlangan (OL) va o'ta legirlangan (O'L) namunalarida Fermi energiyasining hisoblangan qiymatlari

Material	$n_h, 10^{21} \text{cm}^{-3}$	m_p	ε_F, eV
<i>LSCO, KL</i>	0.7	$2.41m_e$	0.120
<i>LSCO, OL</i>	0.8	$1.91m_e$	0.166
<i>LSCO, O'L</i>	1.1	$1.00m_e$	0.626

**YBCO kupratlari uchun kam legirlangan (KL), optimal legirlangan (OL)
va o'ta legirlangan (O'L) holatlarda Fermi energiyasining
hisoblangan qiymatlari**

Material	$n_h, 10^{21} \text{cm}^{-3}$	m_p	ε_F, eV
<i>YBCO, KL</i>	1.1	$2.26m_e$	0.175
<i>YBCO, OL</i>	1.5	$1.82m_e$	0.264
<i>YBCO, O'L</i>	1.6	$1.00m_e$	0.500

Biz noaniqlik munosabatlaridan foydalanib, legirlangan kupratlardagi kuper juftliklarining fermion va bozon tabiatini aniqlash uchun universal hamda mikroskopik mezonlarni ishlab chiqdik. Bu mezonlar yordamida kuper juftliklarining xususiyatlarini aniq va to'liq o'rganish imkoniyati yaratildi. Legirlangan kupratlardagi kuper juftlarining fermion yoki bozon tabiatini kuper juftining o'lchami a_c ni kuper juftlari orasidagi o'rtacha masofa R_c bilan taqqoslash orqali aniqlash mumkin. Endi bu materiallardagi kuper juftliklarining tabiatini aniqlash uchun Geyzenbergning noaniqlik tamoyilidan foydalanishimiz mumkin.

$$\Delta x \Delta k \simeq \frac{1}{2}, \quad (3)$$

bunda Δx va Δk - mos ravishda juftlashuvchi fermion tashuvchilarning koordinatasi va to'lqin vektoridagi noaniqliklarini ifodalaydi.

Ba'zi o'zgartirishlar (yoki manipulyatsiyalar) amalga oshirilgandan so'ng, (3) munosabatni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin bo'ladi:

$$a_c \cdot \varepsilon_A \simeq \frac{1}{2 \cdot \frac{1}{R_c}} \cdot \varepsilon_F = \frac{1}{2} R_c \cdot \varepsilon_F \quad (4)$$

Shuni aytish joizki, $a_c > R_c$ bo'lganda, Kuper juftlari bir-biri bilan kesishadi va fermion xususiyatiga ega bo'ladi. Aksincha, $R_c > a_c$ bo'lsa, Kuper juftlari bir-biri bilan kesishmaydi va bozon xususiyatiga ega bo'ladi. Shu sababli, legirlangan kupratlardagi Kuper juftlarining fermion xususiyatini aniqlovchi mezoni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\frac{a_c}{R_c} \simeq \frac{\varepsilon_F}{2\varepsilon_A} > 1 \quad (5)$$

bu o'ta o'tkazgichlarda fermion tabiatini aniqlaydigan universal mezondir.

(5) munosabatidan kelib chiqadiki, legirlangan kupratlardagi Kuper juftlari quyidagi shart bajarilganda fermion tabiatiga ega bo'ladi:

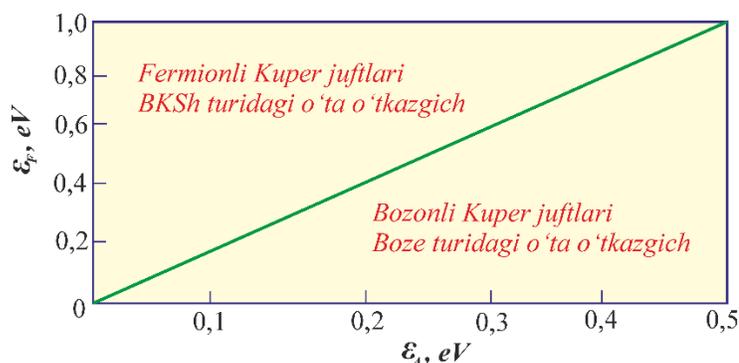
$$\varepsilon_F \gg \varepsilon_A \quad (6)$$

Yuqorida aytilganlarni inobatga olgan holda, legirlangan YuHO'O'-kupratlarning energetik parametrlarining mumkin bo'lgan qiymatlari 3-jadvalda keltirilgan.

LSCO va YBCO YuHO‘O‘-kupratlarning ulardagi Kuper juftlarining bozon va fermion tabiatini aniqlovchi energetik parametrlarining mumkin bo‘lgan qiymatlari

Material	$\hbar\omega_0$ eV	E_p eV	ε_A eV	ε_F eV	$\varepsilon_F/\varepsilon_A$	Kuper juftlashish turi
LSCO, KL	0.040	0.339	0.379	0.120	0.317	bozon
LSCO, OL	0.045	0.219	0.264	0.166	0.630	bozon
LSCO, O‘L	0.050	0.000	0.050	0.626	12.50	fermion
YBCO, KL	0.050	0.379	0.429	0.175	0.408	bozon
YBCO, OL	0.055	0.245	0.300	0.264	0.865	bozon
YBCO, O‘L	0.070	0.000	0.070	0.500	7.143	fermion

Shunday qilib, (6) mezon faqat o‘ta legirlangan kupratlarda yaxshi bajariladi va ulardagi Kuper juftlari fermion xususiyatga ega. Bunda Kuper juftliklarining fermion xususiyatidan bozon xususiyatiga o‘tishi $\varepsilon_F = 2\varepsilon_A$ bo‘lganda sodir bo‘ladi (1-rasm).



1-rasm. Fermion-bozon o‘tishi va legirlangan kupratlarda BKShturidagi o‘ta o‘tkazuvchanlik nazariyasining qo‘llanilish chegarasi

Biz legirlangan kupratlardagi Kuper juftlarining fermion tabiatini aniqlash uchun mikroskopik mezonlarni ishlab chiqdik. Fermion tashuvchilarning Kuper juftlashishi paytidagi energiya noaniqlik darajasi, Kuper juftlarining bog‘lanish energiyasi $2\Delta_{BKSht}$ tartibida bo‘ladi. Bu shuni anglatadiki, Kuper juftlarining har bir fermion tarkibiy qismining energiya noaniqlik darajasi Δ_{BKSht} tartibida bo‘ladi. Shunday qilib, (3) noaniqlik munosabatini quyidagi ko‘rinishda ifodalash mumkin

$$a_c \approx \frac{\hbar}{2\Delta_{BKSht}} \sqrt{\frac{\varepsilon_F}{2m_F^*}} \quad (7)$$

Kuper juftliklari orasidagi o‘rtacha masofa quyidagi ifodadan aniqlanadi

$$R_c \approx \left[\frac{3}{4\pi n_c} \right]^{1/3}, \quad (8)$$

bunda n_c - Kuper juftlarining konsentratsiyasi.

Yuqorida aytilganlarga ko'ra, agar $a_c > R_c$ sharti bajarilsa, legirlangan kupratlarda fermionli Kuper juftlari mavjudligini ko'ramiz. Quyidagi ifodalardan foydalanib $n_c = \frac{\varepsilon_A}{2\varepsilon_F} n = \frac{\varepsilon_A}{2\varepsilon_F} \cdot \frac{1}{3\pi^2} \left[\frac{2m_F^* \varepsilon_F}{\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}} = \frac{\varepsilon_A}{6\pi^2 \varepsilon_F} \left[\frac{2m_F^* \varepsilon_F}{\hbar^2} \right]^{\frac{3}{2}}$ va $R_c \simeq \left(\frac{\hbar^2}{2m_F^* \varepsilon_F} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{9\pi \varepsilon_F}{2\varepsilon_A} \right)^{\frac{1}{3}}$, bu shartni quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} > 36\pi \left(\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} \right)^3 \quad (9)$$

yoki

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} < \left(\frac{\varepsilon_A}{36\pi \varepsilon_F} \right)^{1/3} \quad (10)$$

Bu ifoda legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlarda Kuper juftlarining fermion tabiatini aniqlashning mikroskopik va universal mezonlaridan biri hisoblanadi. Ushbu materiallarda fermion-bozon o'tishining universal va mikroskopik mezonini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} = \left(\frac{\varepsilon_A}{36\pi \varepsilon_F} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Legirlangan kuprat o'ta o'tkazgichlarda $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ ning turli qiymatlarida Kuper juftliklarining fermion tabiatini va fermion-bozon o'tishini aniqlovchi miqdoriy mezonlar 4-jadvalda keltirilgan.

4-jadval

Legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlarda fermionli Kuper juftlari mavjudligining miqdoriy mikroskopik mezonlari ularning asosiy parametrlari ε_A va ε_F nisbatining turli qiymatlarida

$\varepsilon_A/\varepsilon_F$	Fermion Kuper juftlarining mavjudligiga oid mikroskopik mezonlar $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F$	Fermion-bozon o'tishiga mos keladigan $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F$ qiymatlari
0.1	<0.0959	0.0959
0.2	<0.1209	0.1209
0.3	<0.1384	0.1384
0.4	<0.1523	0.1523
0.5	<0.1641	0.1641
0.6	<0.1744	0.1744
0.7	<0.1836	0.1836
0.8	<0.1919	0.1919
0.9	<0.1996	0.1996
1.0	<0.2068	0.2068

Legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda fermion Kuper juftliklarining mavjudligiga oid yuqorida keltirilgan mikroskopik mezonlardan tashqari, (10) shart va ($\Delta_{BKSh} = \frac{\hbar\omega_D}{sh(\lambda_{BKSh})}$) tenglamadan foydalanib, boshqa shunga o‘xshash mezonlarni ham olish mumkin. Bunda $\hbar\omega_D$ o‘rniga ε_A (bu yerda $\hbar\omega_D$ - akustik fononlarning energiyasi ε_A bilan almashtiriladi) qo‘yiladi. Bu holda (10) shart quyidagi ko‘rinishni oladi:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F sh(1/\lambda_{BKSh})} < \left[\frac{\varepsilon_A}{36\pi\varepsilon_F} \right]^{1/3}, \quad (12)$$

bunda λ_{BKSh} - BKSh nazariyasidagi elektron-fonon bog‘lanish doimiysi hisoblanadi.

Legirlangan kuprat o‘ta o‘tkazgichlarda Kuper juftliklarining fermion tabiatini aniqlash uchun boshqa bir universal va mikroskopik mezonni quyidagi ko‘rinishda ifodalash mumkin:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} < \frac{1}{12\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right). \quad (13)$$

Legirlangan kupratlarda fermion-bozon o‘tishining boshqa bir universal va mikroskopik mezonni quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} = \frac{1}{12\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right). \quad (14)$$

Legirlangan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda Kuper juftliklarining fermion tabiatini va fermion-bozon o‘tishlarini aniqlash uchun yuqorida keltirilgan universal va mikroskopik mezonlar fermionlarning o‘rtacha maydon BKSh mikroskopik nazariyasining asosiy parametrlaridan (ε_A, Δ_F yoki λ_{BKSh}) foydalanish orqali olingan. Avvalo, optimal legirlangan *LSCO* va *YBCO* yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarni ko‘rib chiqamiz. Ularda Fermi energiyalari mos ravishda $\varepsilon_F \approx 0.17 \text{ eV}$ va $\varepsilon_F \approx 0.25 \text{ eV}$ (3-jadvalda qarang) tartibida bo‘ladi. Optimal legirlangan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda polyaronlarning bog‘lanish energiyasining tajribaviy qiymati $E_p \approx 0.06 \text{ eV}$ tartibida bo‘ladi. *LSCO* yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan materiallari uchun (10) mezonni quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} < \left[\frac{0.11}{36\pi \cdot 0.17} \right]^{1/3} \text{ при } \varepsilon_A = E_p + \hbar\omega_0 \approx 0.11 \text{ эВ} \quad (15)$$

yoki

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} < (5.8)^{1/3} \cdot 10^{-1} \approx 0.18 \quad (16)$$

Optimal legirlangan *LSCO* da Δ_{BKSh} qiymati 0.04 eV dan kichik yoki unga teng bo‘ladi. Shu sababli, $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F \approx 0.04/0.17 \approx 0.235$ nisbat uchun *LSCO* dagi Kuper juftliklarining fermion tabiatini belgilovchi (16) mezon optimal legirlangan holatda bajarilmaydi.

Optimal legirlangan YuQO‘O‘-kupratlar uchun (11) mezon quyidagi ko‘rinishni oladi:

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} < \left[\frac{0.11}{36\pi \cdot 0.25} \right]^{1/3} \text{ при } \varepsilon_A = E_p + \hbar\omega_0 \simeq 0.11 \text{ эВ} \quad (17)$$

yoki

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} < 0.157 \quad (18)$$

Optimal legirlangan *YBCO* da Δ_{BKSh} qiymati ham 0.04 eV atrofida bo‘lishini hisobga olsak, $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F$ nisbati uchun 0.16 ni olamiz. Ko‘rinib turibdiki, *YBCO* YuHO‘O‘ materialidagi Kuper juftliklarining fermion tabiatini belgilaydigan (18) mezon optimal legirlangan rejimda ham bajarilmaydi.

Endi o‘ta legirlangan YuHO‘O‘-kupratlar *LSCO* va *YBCO* ni ko‘rib chiqamiz. Ularda Fermi ε_F tajriba natijalariga ko‘ra taxminan 0.4 eV ni tashkil etadi. Bundan tashqari, eksperimental ma‘lumotlar shuni ko‘rsatadiki, o‘ta legirlangan kupratlarda Δ_{BKSh} qiymati 0.010 eV dan 0.020 eV gacha o‘zgaradi. Ushbu YuHO‘O‘-materiallarda $E_p = 0$ bo‘lganda tashikli tashuvchilar orasidagi ε_A tortishish juftlashish o‘zaro ta’sir energiyasi $\varepsilon_A = \hbar\omega_0$ sifatida aniqlanadi va optik fononlarning energiyalarini $\hbar\omega_0 \simeq 0.06 \text{ eV}$ ga teng deb hisoblash mumkin. Shunday qilib, $\varepsilon_A = 0.06 \text{ eV}$ va $\varepsilon_F = 0.4 \text{ eV}$ bo‘lganda, o‘ta legirlangan YuHO‘O‘-kupratlar *LSCO* va *YBCO* da kuper juftlarining fermion tabiatini aniqlovchi (10) mezonni quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} < \left[\frac{0.06}{36\pi \cdot 0.4} \right]^{1/3} = 1.1 \cdot 10^{-1} = 0.11 \quad (19)$$

Yuqorida keltirilgan tajriba natijalariga ko‘ra, o‘ta legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda Δ_{BKSh} parametrining qiymatini $\Delta_{BKSh} = 0.015 \text{ eV}$ ga teng deb olish maqsadga muvofiqdir. Bunday holda, *LSCO* va *YBCO* da Kuper juftlarining fermion tabiatini aniqlovchi (20) mezon $E_p = 0.4 \text{ eV}$ bo‘lganda yaxshi bajariladi.

LSCO va *YBCO* legirlangan YuHO‘O‘-kupratlarda fermion-bozon o‘tishlar (ya’ni fermion Kuper juftlarining bozon Kuper juftlariga aylanishi) legirlash darajasi kuchli o‘ta legirlangan holatdan biroz o‘ta legirlangan holatga kamayishi jarayonida sodir bo‘lishini kutish mumkin. Bu jarayonda Fermi energiyasi ε_F 0.4 eV dan 0.3 eV gacha pasayadi. Shunda $\varepsilon_A = 0.06 \text{ eV}$ uchun (11) mezon quyidagi ko‘rinishni oladi:

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} = \left[\frac{0.06}{36\pi \cdot 0.3} \right]^{1/3} \simeq 0.121 \quad (20)$$

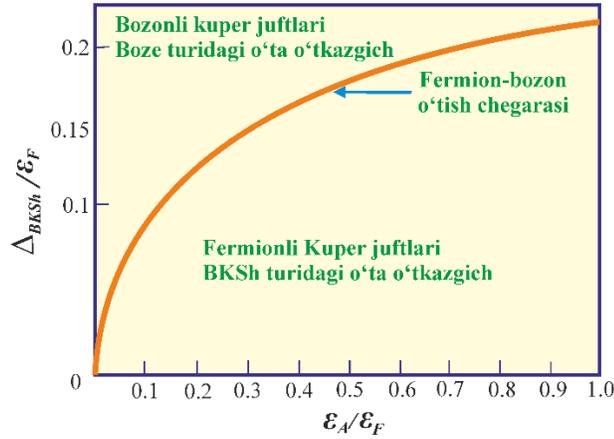
$\varepsilon_F = 0.3 \text{ eV}$ bo‘lganda, bu mezon $\Delta_{BKSh} = 0.0363 \text{ eV}$ uchun bajariladi.

Demak, (10) mezonga muvofiq, legirlangan kupratlardagi Kuper juftlari, ularda polyanon effekti mavjud bo‘lmaganda ($E_p = 0$) va Fermi energiyasi ε_F 0.3 eV dan

yuqori bo'lganda, fermion tabiatiga ega bo'ladi. Keyingi tahlil uchun (11) ifodani quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\frac{\Delta_{BKSh}}{\varepsilon_F} \simeq 0.214 \left(\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F}\right)^{1/3} \quad (21)$$

Bu ifoda legirlangan YuHO'O'-kupratlarda fermion-bozon o'tishlarining chegaralarini ikkita asosiy nisbat $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ va $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F$ ga bog'liq holda aniqlaydi, bu 2-rasmda ko'rsatilganidek.



2-rasm. Legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda fermion Kuper juftlari va fermion-bozon o'tishining mavjudlik imkoniyatlari $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ va $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F$ asosiy nisbatlarga bog'liqligi

Legirlangan YuHO'O'-kupratlarda kuper juftlari va fermion-bozon o'tishlarning fermion tabiatini aniqlaydigan boshqa mikroskopik mezonlarni keyingi tahlil qilish uchun (13) va (14) mezonlarni mos ravishda quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right) \leq \frac{\varepsilon_F}{30\varepsilon_A} \quad (22)$$

Optimal legirlangan YuHO'O' *LSCO* materialini ko'rib chiqamiz, uning uchun $\varepsilon_A = 0.11$ eV va $\varepsilon_F = 0.17$ eV. U holda (20) munosabatni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right) < 0.0515 \quad (23)$$

Optimal legirlangan *LSCO* da λ_{BKSh} parametrining qiymati taxminan $\lambda_{BKSh} \simeq 0.4$ tartibida bo'lishi mumkin deb hisoblanadi. Shu sababli, optimal legirlangan *LSCO* da Kuper juftlarining fermion tabiatini belgilovchi (23) mezon hatto $\lambda_{BKSh} \geq 0.506$ bo'lganda ham bajarilmaydi.

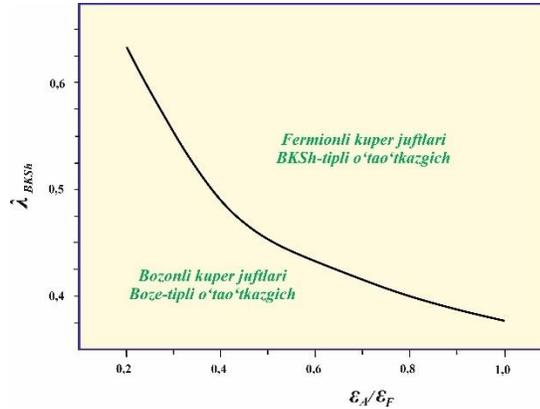
Optimal legirlangan *YBCO* YuHO'O' materialлари uchun $\varepsilon_A = 0.11$ eV va $\varepsilon_F = 0.25$ eV qiymatlarda (20) shart quyidagi ko'rinishni oladi:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right) \leq 0.0757 \quad (24)$$

Bu mezon $\lambda_{BKSh} \geq 0.582$ bo'lganda optimal legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan *YBCO* materiali uchun bajarilmaydi, ya'ni bu materialdagi Kuper juftlari bozon tabiatiga ega. Yuqorida keltirilgan sonli hisob-kitoblar natijalari shuni ko'rsatadiki, *LSCO* va *YBCO* legirlangan kupratlarda fermion-bozon o'tishlar mos ravishda $\lambda_{BKSh} \approx 0.506$ va $\lambda_{BKSh} \approx 0.582$ qiymatlarda sodir bo'ladi. O'ta legirlangan *LSCO* va *YBCO* kupratlari uchun $\varepsilon_A \approx 0.06$ eV va $\varepsilon_F \approx 0.4$ eV bo'lganda, (22) shartni quyidagicha yozish mumkin:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right) < 0.222 \quad (25)$$

BKSh turidagi elektron-fonon bog'lanish konstantasi λ_{BKSh} kupratlarning legirlash darajasi oshishi bilan kamayadi va o'ta legirlangan holatlarda u 0.6 dan kichik yoki shunga yaqin bo'lishi taxmin qilinadi. Shu sababli, *LSCO* va *YBCO* da Kuper juftliklarining fermion tabiatini belgilaydigan (25) mezon o'ta legirlangan holatlarda katta zaxira bilan bajariladi.



3-rasm. Legirlangan YuHO'O'-kupratlarda fermion Kuper juftlari va fermion-bozon o'tishining mavjudlik imkoniyatlari $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ fundamental nisbatga hamda BKSh tipidagi elektron-fonon bog'lanish doimiysi λ_{BKSh} ga bog'liq holda

Nihoyat, legirlangan kupratlarda fermion-bozon o'tishlarini aniqlovchi mikroskopik mezonni quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{BKSh}}\right) = \frac{1}{30\left(\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F}\right)} \quad (26)$$

Bu ifoda legirlangan YuHO'O'-kupratlardagi fermion-bozon o'tishlar chegaralarini $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ asosiy nisbatiga va ulardagi BKSh-turidagi elektron-fonon bog'lanish doimiysiga bog'liq holda aniqlaydigan formuladir. Bu bog'liqlik 3-rasmga tasvirlangan.

Dissertatsiyaning “Fermi-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlikning BKSh-simon nazariyasi va uning o‘ta legirlangan kupratlarda qo‘llanilishi” nomli uchinchi bobida o‘ta legirlangan kupratlarda kovakli zaryad tashuvchilarning $\hbar\omega_0$ va $\hbar\omega_D$ energiyali optik va akustik fononlar almashinuvi orqali o‘zaro ta’sirlashuvida Kuper juftlashuvi imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Shuningdek, ushbu materiallarda BKSh-simon nazariya bilan tavsiflanadigan fermi-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlikni amalga oshirish imkoniyatlari o‘rganilgan.

O‘ta legirlangan kupratlarda $\Delta_{SC}(T, x)$ va $T_c(x)$ ni aniqlash uchun quyidagi BKSh tenglamasini: $\frac{1}{\lambda_{BKSh}} = \int_0^{\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\xi^2 + \Delta^2 T}} th \left[\frac{\sqrt{\xi^2 + \Delta^2 T}}{2k_B T} \right]$ quyidagicha qayta yozish mumkin:

$$\frac{1}{\lambda_{BKSh}(x)} = \int_0^{\varepsilon_A} \frac{d\xi}{\sqrt{\xi^2 + \Delta_{SC}^2(T, x)}} th \frac{\sqrt{\xi^2 + \Delta_{SC}^2(T, x)}}{2k_B T}, \quad (27)$$

bunda

$\lambda_{BKSh}(x) = D(\varepsilon_F(x)) \tilde{V}_A(x)$, $D(\varepsilon_F(x))$ Fermi sathidagi holatlar zichligi
 $\tilde{V}_A(x) = V_{ph} - \frac{V_c}{[1 + D(\varepsilon_F(x)) V_c \ln(\frac{\omega_c}{\omega_0})]}$ kovakli tashuvchilar orasidagi o‘zaro ta’sirning
 effektiv tortishish potentsiali hamda ε_c kesish energiyasiga ega bo‘lgan ushbu tashuvchilar orasidagi V_c Kulon itarishish potentsiali.

$V_c/[1 + D(\varepsilon_F(x)) V_c \ln(\frac{\omega_c}{\omega_0})]$ nisbati juda kichik bo‘ladi, chunki $D(\varepsilon_F(x)) V_c \gg \lambda_{BKSh}(x)$ va $\omega_c/\omega_0 \gg 1$. Shu sababli, $\tilde{V}_A(x)$ ning legirlash darajasiga bog‘liqligi juda zaif bo‘lib, birinchi yaqinlashishda uni e’tiborga olmaslik mumkin. $T=0$ holatida $\Delta_{SC}(0, x)$ ni aniqlash tenglamasi quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi:

$$\Delta_{SC}(0, x) = \frac{\hbar(\omega_0 + \omega_D)}{sh(1/\lambda_{BKSh}(x))}. \quad (28)$$

Bundan tashqari, o‘ta legirlangan kupratlarda legirlash darajasiga bog‘liq bo‘lgan o‘ta o‘tkazuvchanlik o‘tishining kritik haroratini aniqlash ifodasini quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$T_c(x) \approx 1.134 \varepsilon_A \exp \left[-\frac{1}{\lambda_{BKSh}(x)} \right] \quad (29)$$

bunda $\varepsilon_A = \hbar\omega_0 + \hbar\omega_D$.

Yuqoridagi (28) va (29) ifodalar bizga o‘ta legirlangan kupratlarning asosiy $\Delta_{SC}(0, x)$ va $T_c(x)$ o‘ta o‘tkazuvchanlik parametrlarini sonli hisoblash hamda $\Delta_{SC}(0, x)$ va $T_c(x)$ uchun olingan sonli natijalarni mavjud tajriba ma’lumotlari bilan taqqoslash imkonini beradi.

O‘ta legirlangan kupratlarda fermi-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlikning yuqorida keltirilgan BKSh-simon nazariyasining asosiy kuzatiladigan o‘ta o‘tkazuvchanlik

parametrlari $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ hisoblanadi. Shu bois, ushbu kuzatilayotgan kattaliklarni hisoblash muhim natija sanaladi, chunki bu o'ta legirlangan kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlikning BKSh-simon nazariyasini qo'llash mumkinligini tekshirish yo'lini ta'minlaydi. Endi (28) va (29) ifodalardan foydalanib, $\Delta_{SC}(x)$ tartibdagi o'ta o'tkazuvchanlik parametri va o'ta o'tkazuvchanlik o'tishining kritik harorati $T_c(x)$ ni ikkita asosiy parametr ε_A va λ_{BKSh} larning funksiyasi sifatida hisoblaymiz. Bunda biz BKSh-simon o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasi $\lambda_{BKSh} \lesssim 0.5$ bo'lganda yaxshi qo'llanilishini hisobga oldik. Dastlab, o'ta legirlangan kupratlarda $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ ning nazariy hisob-kitoblarini $x > 0.16$ bo'lgan o'ta legirlangan darajada amalga oshiramiz. (28) va (29) ifodalardan aniqlangan Δ_{SC} va T_c o'ta o'tkazuvchanlik parametrlarining ushbu nazariy hisob-kitoblari natijalari turli xil o'ta legirlangan kupratlardagi Δ_{SC} va T_c ning tajribaviy qiymatlari bilan taqqoslandi (5 va 6-jadvallarga qarang).

5-jadval

Turli o'ta legirlangan kupratlardagi Δ_{SC} o'ta o'tkazuvchanlik tartib parametrlarining nazariy va tajribaviy qiymatlari

<i>O'talegirlangan kupratlar</i>	<i>Nazariya</i>			<i>Tajriba natijalari</i>
	$\hbar(\omega_0 + \omega_D) \ni B$	λ_{BKSh}	$\Delta_{SC} m \ni B$	$\Delta_{SC} m \ni B$
<i>La_{2-x}Sr_xCuO₄(La214)</i>	0.060	0.395	9.62	10
<i>Bi_{2+x}Sr_{2-x}CuO₆(Bi2201)</i>	0.060	0.427	11.65	12
<i>Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+\delta}(Bi2212)</i>	0.070	0.495	21.05	25
<i>Bi2212</i>	0.080	0.493	21.4	25

O'ta legirlangan kupratlarda BKSh-simon o'ta o'tkazuvchanlik tartib parametri (yoki o'ta o'tkazuvchanlik tirqishi) Δ_{SC} va o'ta o'tkazuvchanlik o'tishining kritik harorati T_c orasidagi bog'liqlikni aniqlash uchun, Fermi sathidagi holatlar zichligini taxminan oddiy ko'rinishda ifodalash mumkin.

$$D(\varepsilon_F) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_F} & \text{uchun } \xi < \varepsilon_F \\ 0 & \text{boshqa hollarda} \end{cases} \quad (30)$$

Turli o‘ta legirlangan kupratlarda o‘ta o‘tkazuvchan o‘tishlarning kritik haroratlari T_c ning nazariy va eksperimental qiymatlari

<i>O‘talegirlangan kupratlar</i>	<i>Nazariya</i>			<i>Tajriba natijalari</i>
	$\hbar(\omega_0 + \omega_D)$ эВ	λ_{BKSh}	T_c, K	T_c, K
<i>$La_{2-x}Sr_xCuO_4(La214)$</i>	0.06	0.333	39.2	40
<i>$Bi_{2+x}Sr_{2-x}CuO_6(Bi2201)$</i>	0.05	0.244	10.9	10
<i>$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}(Bi2212)$</i>	0.07	0.417	84	82
<i>$Bi2212$</i>	0.07	0.410	80.6	81

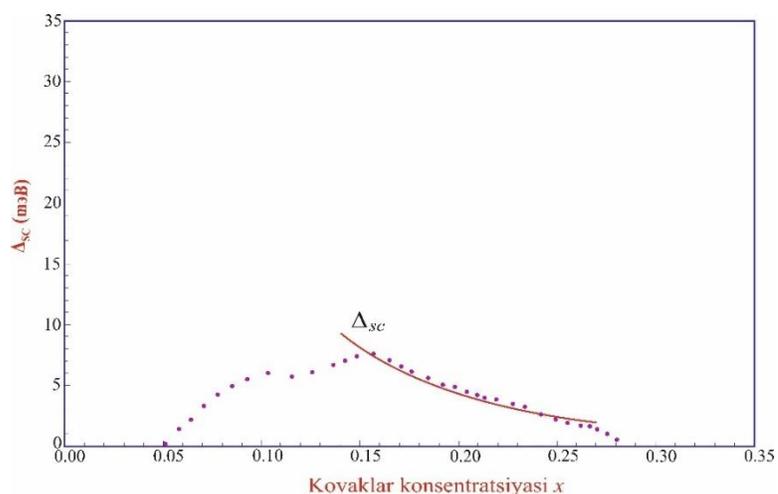
Ushbu yaqinlashishni va (6) shartidagi $\varepsilon_F(x)$ uchun $\varepsilon_F = \frac{\hbar^2(3\pi^2n_h)^{2/3}}{2m_h^*} = \frac{\hbar^2(3\pi^2n_ax)^{2/3}}{2m_h^*} > 2\varepsilon_A = 2\hbar(\omega_0 + \omega_D)$ ifodasini qo‘llab, (28) va (29) tenglamalardan $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ uchun quyidagi ifodalarni hosil qilamiz:

$$\Delta_{SC}(x) = \frac{2\varepsilon_A \exp\left[-\frac{\hbar^2(3\pi^2n_ax)^{2/3}}{2m_h^*\tilde{V}_A}\right]}{1 - \exp\left[-\frac{\hbar^2(3\pi^2n_ax)^{2/3}}{2m_h^*\tilde{V}_A}\right]} \quad (31)$$

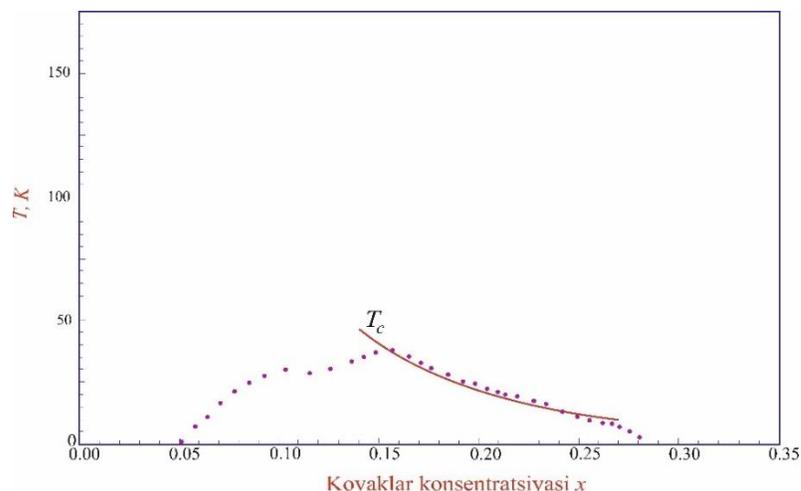
$$T_c(x) \simeq \frac{1.134\varepsilon_A}{k_B} \exp\left[-\frac{\hbar^2(3\pi^2n_ax)^{2/3}}{2m_h^*\tilde{V}_A}\right] \quad (32)$$

O‘ta legirlangan kupratlar holatida $\varepsilon_A = \hbar\omega_0 + \hbar\omega_D$ va $m_h^* = m_e$.

(31) va (32) dan ko‘rinib turibdiki, o‘ta legirlangan kupratlarda BKSh-simon o‘ta o‘tkazuvchanlik tartib parametri $\Delta_{SC}(x)$ ham, o‘ta o‘tkazuvchanlik o‘tishining kritik harorati $T_c(x)$ legirlash darajasi x ga eksponensial bog‘liq va x ning ortishi bilan eksponensial ravishda kamayadi. Haqiqatan ham, bunday $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ bog‘liqliklari o‘ta legirlangan kupratlarda tajribada kuzatilgan. Xususan, $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ ning konsentratsion bog‘liqliklarini hisoblash bo‘yicha olib borgan sonli tadqiqotlarimiz natijalari o‘ta legirlangan kuprat materiallari $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (*La214*) uchun $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ bo‘yicha olingan tajriba ma’lumotlari bilan taqqoslanildi. Bunda nazariy natijalar va tajriba ma’lumotlari o‘rtasida yaxshi moslik aniqlanganligini kuzatdik (4-rasm va 5-rasmga qarang).



4-rasm. *La214* o‘ta legirlangan kuprat materialidagi BKSh-simon o‘ta o‘tkazuvchanlik tartib parametri Δ_{SC} ning legirlash darajasi x ga nazariy bog‘liqligi. Bu bog‘liqlik (31) ifoda yordamida hisoblanib, uzluksiz egri chiziq bilan ko‘rsatilgan. Shuningdek, *La214* uchun $\Delta_{SC}(x)$ bo‘yicha olingan eksperimental ma’lumotlar qora doiralar bilan tasvirlangan



5-rasm. *La214* o‘ta legirlangan kuprat materialidagi o‘ta o‘tkazuvchanlik o‘tishining kritik harorati T_c ning legirlash darajasi x ga nazariy bog‘liqligi (32) ifoda yordamida hisoblanib, uzluksiz egri chiziq ko‘rinishida tasvirlangan. Shuningdek, *La214* uchun $T_c(x)$ bo‘yicha olingan eksperimental ma’lumotlar qora doirachalar bilan ko‘rsatilgan

XULOSA

Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun taqdim etilgan “O‘talegirlangan kupratlarda BKSh-simon fermi-suyuqlikli o‘ta

o'tkazuvchanlik ro'y berish mumkinligi" mavzusidagi dissertatsiya yuzasidan olib borilgan tadqiqotlar asosida quyidagi asosiy xulosalar chiqarildi:

1. Kam legirlangan, optimal legirlangan va o'ta legirlangan kupratlarning xarakterli Fermi energiyalari ε_F aniqlanib, nazariy jihatdan hisoblandi. Hisoblangan ε_F qiymatlari ushbu materiallarda tajribaviy aniqlangan Fermi energiyasi qiymatlari $\varepsilon_F \approx (0.1-0.4)$ eV bilan maqbul darajada mos kelishi ma'lum bo'ldi. Kam legirlangan va optimal legirlangan kupratlarda katta polyaronlarning Fermi energiyasi qiymatlari ancha kichik $\varepsilon_F \approx (0.10-0.25)$ eV ekanligi va o'ta legirlangan kupratlardagi kvazi-erkin kovaklar Fermi energiyasidan sezilarli darajada past ekanligi ko'rsatib berildi. O'ta legirlangan kupratlarda tajribaviy ε_F qiymatlari 0.4 eV dan kichik yoki shu tartibda bo'lishi aniqlandi.

2. Birinchi marta legirlangan YuHO'O'-kupratlarda Kuper juftlarining fermion tabiatini va fermion-bozon o'tishini (ya'ni Kuper juftlari tabiatining fermion turidan bozon turiga o'zgarishini) aniqlash uchun universal miqdoriy mezonlar olindi. Bu mezonlar ikkita asosiy $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ va $\Delta_{BKSh}/\varepsilon_F$ nisbatlarga hamda BKSh-simon elektron-fonon bog'lanish doimiysi λ_{BKSh} ga bog'liq. Kuper juftlarining fermion tabiatini belgilovchi topilgan mezonlar o'ta legirlangan kupratlarda (ayniqsa, o'ta legirlangan *LSCO* va *YBCO* da) yaxshi namoyon bo'ladi. Bu materiallardagi kvazi-erkin kovaklar Kuper juftlari fermion tabiatiga ega bo'lib, ularda fermion-bozon o'tishi x -ning $x \geq 0.17$ qiymatida o'ta legirlangan holatida ro'y beradi.

3. O'ta legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlarda kvazi-erkin kovaklarning optik fononlar bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida yuzaga keladigan Kuper juftlashuvining BKSh-simon nazariyasi ishlab chiqildi. Bu nazariya asosida o'ta o'tkazuvchanlik tartib parametri $\Delta_{SC} = \Delta_{BKSh}$ va o'ta o'tkazuvchanlikning kritik harorati T_c ni aniqlash uchun BKSh-simon ifodalar olindi. Qattiq jismlarda, xususan o'ta legirlangan kupratlarda, BKSh-simon Fermi-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlikning paydo bo'lish mezonini aniqlash uchun faqat eng harakatchan Kuper juftliklarining uyg'onish spektri mos kelishi aniqlandi. Bu esa ularning Fermi komponentlarining keng qo'llaniladigan BKSh-simon uyg'onish spektridan farq qiladi.

4. Kovakli legirlangan kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlikning kritik harorati T_c va BKSh-simon o'ta o'tkazuvchanlik tartibi parametri Δ_{SC} uchun ularning kovakli legirlash darajasi x ga bog'liq bo'lgan analitik ifodalar olindi. O'ta legirlangan kupratlarda ushbu o'ta o'tkazuvchanlik parametrlari $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ uchun sonli usulida hisoblashlar o'tkazildi. O'rganilgan kupratli o'ta o'tkazgichlarning $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ parametrlarining son usulida hisoblangan natijalari o'ta legirlangan kupratli o'ta o'tkazgichlardagi $\Delta_{SC}(x)$ va $T_c(x)$ parametrlarining eksperimental ma'lumotlari bilan taqqoslandi. Nazariy va eksperimental natijalar o'rtasida yaxshi muvofiqlik aniqlandi. Bu esa taklif etilgan BKSh-simon o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasining o'ta legirlangan kupratlarga qo'llanilishi mumkinligini ko'rsatadi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ШЕРАЛИЕВ МАШРАБ УМУРЗАКОВИЧ

**О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ БКШ-ПОДОБНОЙ
ФЕРМИ-ЖИДКОСТНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В
СВЕРХЛЕГИРОВАННЫХ КУПРАТАХ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

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

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистана за номером B2024.2.PhD/FM1119.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистана. Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале “Ziyonet” (www.ziyonet.uz).

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

Официальные оппоненты: **Рахимов Абдулла Маннабович**
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Расулов Рустам Явкачович
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Бухарский государственный университет**

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2025 г. в _____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (100124, г. Ташкент, пос. Улугбек, Институт ядерной физики; тел. (+99871) 289-31-41; e-mail: info@inp.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер _____). (100124, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел. (+99871) 289-31-19).

Автореферат диссертации разослан «_____» _____ 2025 г.
(Реестр протокола рассылки № _____ от _____ 2025 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., старший научный сотрудник

С.Б. Эгамов
председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и востребованность темы диссертация. В настоящее время изучение природы и происхождения явления сверхпроводимости в легированных медно-оксидных (купратных) соединениях является одной из актуальных задач современной физики конденсированного состояния. Наибольший интерес к высокотемпературным сверхпроводникам (ВТСП), открытым в 1986 году, связан с возможностью создания материалов с критической температурой T_c , близкой к комнатной, что открывает перспективы для энергетики и высоких технологий. Несмотря на почти сорокалетние интенсивные исследования, природа необычной сверхпроводимости в недолегированных, оптимально легированных и умеренно сверхлегированных купратах до конца не ясна. Основные трудности связаны с их очень необычными свойствами в сверхпроводящем состоянии, понимание которых необходимо для построения микроскопической теории.

В мировой практике существуют многочисленные теоретические подходы к описанию псевдощелевого состояния выше T_c и необычного сверхпроводящего состояния в ВТСП-купратах: модели сильных электронных корреляций (модифицированная модель Хаббарда), а также модели бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) биполяронов и других квазичастиц. Однако большинство из них сталкиваются с серьёзными трудностями при описании сверхпроводящего состояния в легированных ВТСП-купратах. Особенно проблематично применение БКШ-подобных моделей без надёжного обоснования фермионной или бозонной природы куперовских пар в этих материалах. Поэтому разработка адекватной теории, способной описать образование сверхпроводящего состояния ниже T_c в легированных купратах, является весьма актуальной задачей.

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 в нашей страны и её дальнейшего практического применения, отражены в Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы.¹ В этой связи в Институте ядерной физики АН РУз и ряде вузов и научных центров проводятся исследования по электрофизическим и фотоэлектрическим свойствам кристаллов, наноструктур и высокотемпературных сверхпроводников. Получены результаты, представляющие интерес для понимания механизмов

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы» от 28 января 2022 г.

сверхпроводимости в купратных материалах, а также для разработки перспективных функциональных материалов.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, в определенной мере соответствуют задачам, обозначенным в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № 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», № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года «О мерах по поддержке научно-исследовательской деятельности Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационная работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энергосбережение и альтернативные источники энергии».

Степень изученности проблемы. Исследования различных аспектов высокотемпературной сверхпроводимости в легированных купратных материалах проводятся многими учеными по всему миру, например, американскими (R. Feynman, T. Holstein, P.W. Anderson, S.A. Kivelson, P.A. Lee, J. Devreys, D. Emin, L.N. Cooper, W.J. Emery и др.), английскими (R. Peierls, N.F. Mott, A. Wilson, J. Hubbard, D.M. Eagles, P. P. Edwards, R.L. Johnston, A. Carrington, J.W. Loram, T. Rice и др.), японскими (Y. Toyozawa, S. Uchida, Y. Koike, S. Ono, Y. Ando, M. Ido, A. Matsuda, T. Kato и др.), итальянскими (A. Bianconi, Gianni A. Varlamov, C. Castellani, G. Balestrino, Nicola L. Saini, G. Margaritondo и др.), российскими (L.D. Landau, S.I. Pekar, D.I. Khomsky, A.S. Alexandrov, V.F. Gantmakher, E.G. Maksimov, S.G. Ovchinnikov и др.), индийскими (B. K. Chakraverty, C. M. Varma, S. Chakravorty и др.), канадскими (W. N. Hardy, D. A. Bonn, D. C. Morgan, R. Liang и др.), германскими (G. Fröhlich, H. Hess, F. Hensel, и др.), швейцарскими (J. G. Bednorz, K. A. Müller и др.), новозеландскими (J. Tallon, B. Buckley, N. Strickland, J. Storey и др.), словенскими (F. Horváth, G. Pristáš, K. Flachbart) и другими специалистами.

В результате получен ряд интересных научных результатов, в частности: обнаружена λ –подобная аномалия в электронной теплоемкости при сверхпроводящем переходе; предложены экспериментальные и теоретические электронные фазовые диаграммы ВТСП-купратов; предсказано и подтверждено существование скрытой квантовой критической точки при абсолютном нуле температуры и при некотором критическом уровне легирования; определены необычные температурные зависимости критического тока, магнитных полей и

глубины проникновения магнитного поля; показаны аномалии электронных свойств в нормальном и сверхпроводящем состояниях, связанные с падением плотности одночастичных возбуждений вблизи уровня Ферми. Для описания куперовских пар часто используется БКШ-подобная теория ферми-жидкостной сверхпроводимости, а также интерполяционные модели, связывающие БКШ-сценарий с БЭК-конденсацией сильно связанных пар. Однако обычная БЭК-модель невзаимодействующих бозонов (холонов и биполяронов) не описывает ВТСП.

Несмотря на огромное количество экспериментальных данных и различных теоретических подходов, природа необычных сверхпроводящих состояний в недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных ВТСП-купратах остаётся неясной. Ни одна модель не в состоянии дать количественные объяснения всем экспериментально наблюдаемым сверхпроводящим свойствам и предсказать корректно электронные фазовые диаграммы легированных ВТСП-купратов. Применимость БКШ-подобных теорий возможна лишь при фермионной природе куперовских пар, однако этот вопрос и зависимость применимости от уровня легирования до сих пор остаются нерешёнными.

Связь темы диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта Института ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан по теме № ОТ-Ф2-15 «Теоретические исследования новых сверхпроводящих и сверхтекучих свойств высокотемпературных сверхпроводников и родственных конденсированных систем» (2017–2020), а также утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ по теме: «Электронная теория ВТСП-купратов и ее применение в исследованиях образования и наномасштабного разделения диэлектрических/металлических и сверхпроводящих фаз в этих системах» (2020–2024).

Целью исследования является развитие БКШ-подобной теории ферми-жидкостной сверхпроводимости в сверхлегированных купратах и определение фермионной природы куперовских пар и фермион-бозонного перехода в них.

Задачи исследования:

определить характерные энергии Ферми в недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных купратах;

изучить универсальные и микроскопические критерии, определяющие фермионную природу куперовских пар, и возможности фермион-бозонного перехода в легированных купратах;

развить адекватной БКШ-подобной теории куперовского спаривания дырочных носителей заряда в сверхлегированных купратах;

определить критерию сверхтекучести БКШ-подобной ферми-жидкости в сверхлегированных купратах;

показать возможность реализации БКШ-подобной ферми-жидкостной сверхпроводимости в сверхлегированных купратах и определить сверхпроводящие параметры (сверхпроводящий параметр порядка и критическая температура) в них как функций уровня легирования.

Объектами исследования являются сверхлегированные купратные сверхпроводники и взаимодействующий ферми-газ квазисвободных дырок в них.

Предметом исследования являются сверхпроводящие параметры сверхлегированных купратов и влияние уровня легирования на их значения.

Методы исследований: методы квантовой и статистической механики и теории твердого тела, метод сильной связи, компьютерная графика (Mathematica, OriginPro 8, CorelDRAW).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

определены характерные энергии Ферми в недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных купратах; показано, что в сверхлегированных купратах энергия Ферми значительно превышает соответствующие значения в недолегированных и оптимально легированных купратах;

получены универсальные количественные критерии, определяющие фермионную природу куперовских пар в сверхлегированных купратах; развита адекватная БКШ-подобная теория куперовского спаривания квазисвободных дырочных носителей при их взаимодействии с оптическими фононами в этих сверхпроводниках;

впервые предложен соответствующий критерий сверхтекучести Ландау для фермионных куперовских пар и определены концентрационные зависимости БКШ-подобного сверхпроводящего параметра порядка и критической температуры сверхпроводящего перехода в сверхлегированных купратах;

получены аналитические выражения сверхпроводящего параметра порядка Δ_{SC} и критической температуры T_c сверхпроводящего перехода в сверхлегированных купратных материалах, проведенные расчеты T_c и Δ_{SC} находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

развита БКШ-подобная теория ферми-жидкостной сверхпроводимости, хорошо описывающая сверхпроводящие свойства сверхлегированных купратов и родственных им материалов.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных и хорошо апробированных методов теоретической и статистической физики, методов среднего поля фермионов, согласием аналитических и численных расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что они позволяют определить границы применимости БКШ-подобных теорий ферми-жидкостной сверхпроводимости для различных типов твердых тел, уточняют и конкретизируют их роль в дальнейших теоретических исследованиях явлений сверхпроводимости и сверхтекучести в других системах.

Практическая значимость результатов состоит в том, что полученные критерии для определения фермионной природы куперовских пар в легированных ВТСП-купратах и предложенная БКШ-подобная теория ферми-жидкостной сверхпроводимости могут быть использованы при исследовании сверхпроводимости и сверхтекучести в других системах, включая сильно легированные полупроводники и сверхтекучий ^3He .

Внедрения результатов исследования. На основе изучения сверхпроводимости БКШ-подобной ферми-жидкости в сверхлегированных купратах:

результаты по определению энергии Ферми слаболегированных, оптимально легированных и сверхлегированных купратов; универсальные количественные критерии, определяющие фермионную природу куперовских пар в сверхлегированных купратах, и БКШ-подобная теория куперовского спаривания при взаимодействии квазисвободных дырочных носителей с оптическими фононами в этих купратных сверхпроводниках; критерий сверхтекучести Ландау для фермионных куперовских пар; БКШ-подобный сверхпроводящий параметр порядка в сверхлегированных купратах, а также критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние были использованы в Наманганском инженерно-строительном институте в рамках проекта ФЗ-20200929243 «Kuchli elektromagnit maydonda qizdirilgan elektronlar va fononlarning yarim o'tkazgichli quyosh fotoelektrik elementlari hamda nanostrukturalar xususiyatlariga ta'siri» (2022-2026) (письмо Наманганского государственного технического университета № 01/10-09/682 от 04.06.2025). Использование результатов послужило научно-методической основой для изучения влияния электронов и фононов, нагретых в сильном электромагнитном поле, на свойства полупроводниковых солнечных фотоэлектрических элементов и наноструктур.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертаций, из них 3 в зарубежных научных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 117 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Различные предложенные механизмы сверхпроводимости в металлах и легированных медно-оксидных (купратных) соединениях»** представлен обзор литературы, связанный с исследуемым направлением. Экспериментальные исследования показали, что сверхпроводящие свойства легированных купратов в значительной степени отличаются от свойств традиционных низкотемпературных металлических сверхпроводников. Несмотря на многочисленные феноменологические и микроскопические теоретические подходы, включая различные варианты БКШ-подобной теории, вопрос о механизме сверхпроводимости в ВТСП-купратах остаётся открытым. Для изучения вопроса о применимости БКШ-подобной теории сверхпроводимости к ВТСП-купратам особое внимание следует уделить сверхлегированным купратам, в которых наблюдаются характеристики, близкие к свойствам сверхтекучей ферми-жидкости. Имеются все основания полагать, что в сверхлегированных купратах может существовать БКШ-подобная ферми-жидкостная сверхпроводимость, обусловленная слабосвязанными куперовскими парами, обладающими фермионной природой. В этой связи особую актуальность приобретает изучение условий, при которых такие куперовские пары существуют в сверхлегированных купратах, а также применимость БКШ-подобной теории сверхпроводимости для определения сверхпроводящих параметров этих купратных материалов.

Во второй главе диссертации **«Критерии определения фермионной природы куперовских пар и фермион-бозонного перехода в легированных купратах»** нами определены характерные энергии Ферми недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных купратов и изучены критерии определения фермионной природы куперовских пар и фермион-бозонного перехода в легированных купратах. При определении энергии Ферми

недолегированных и оптимально легированных ВТСП-купратов нами учитывалась поляронная природа дырочных носителей заряда в этих ВТСП-материалах. Энергия Ферми больших поляронов определяется как:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 [3\pi^2 n_h]^{2/3}}{2m_p}, \quad (1)$$

где n_h – концентрация дырочных поляронов, m_p -масса больших поляронов.

С увеличением уровня дырочного легирования в купратах поляронный эффект будет ослабевать и исчезать в сверхлегированных купратах. Когда поляронный эффект исчезает в сверхлегированных купратах, масса дырочных поляронных носителей становится равной массе квазисвободных дырок, т.е. $m_p = m_h^* = m_e$, m_h^* -эффективная масса дырок. Поэтому энергия Ферми квазисвободных дырочных носителей в сверхлегированных купратах определяется из выражения:

$$\varepsilon_F = \frac{\hbar^2 [3\pi^2 n_h]^{2/3}}{2m_h^*}. \quad (2)$$

Используя выражения (1) и (2), нами рассчитаны характерные энергии Ферми дырочных поляронов и квазисвободных дырочных носителей в недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных купратах. Результаты этих расчётов для ВТСП-купратов *LSCO* и *YBCO* приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Рассчитанные значения энергии Ферми в недолегированных (НЛ), оптимально легированных (ОЛ) и сверхлегированных (СЛ) купратах *LSCO*

Материал	$n_h, 10^{21} \text{ см}^{-3}$	m_p	$\varepsilon_F, \text{ эВ}$
<i>LSCO, НЛ</i>	0.7	$2.41m_e$	0.120
<i>LSCO, ОЛ</i>	0.8	$1.91m_e$	0.166
<i>LSCO, СЛ</i>	1.1	$1.00m_e$	0.626

Далее нами получены универсальные и микроскопические критерии для определения фермионной и бозонной природы куперовских пар в легированных купратах с использованием соотношения неопределенностей. Фермионную или бозонную природу куперовских пар в легированных купратах можно определить путем сравнения размеров куперовской пары a_c со средним расстоянием R_c между куперовскими парами. Для определения природы куперовских пар в этих материалах, мы можем использовать принцип неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta x \Delta k \simeq \frac{1}{2}, \quad (3)$$

где Δx и Δk – соответственно неопределенности в координате и волновом векторе спаривающих фермионных носителей.

Таблица 2

Рассчитанные значения энергии Ферми в недолегированных (НЛ), оптимально легированных (ОЛ) и сверхлегированных (СЛ) купратах YBCO

Материал	$n_h, 10^{21} \text{cm}^{-3}$	m_p	$\varepsilon_F, \text{эВ}$
<i>YBCO, НЛ</i>	1.1	$2.26m_e$	0.175
<i>YBCO, ОЛ</i>	1.5	$1.82m_e$	0.264
<i>YBCO, СЛ</i>	1.6	$1.00m_e$	0.500

После некоторых преобразований (или манипуляций), соотношение (3) можно записать в виде

$$a_c \cdot \varepsilon_A \simeq \frac{1}{2 \cdot \frac{1}{R_c}} \cdot \varepsilon_F = \frac{1}{2} R_c \cdot \varepsilon_F \quad (4)$$

Ясно, что при $a_c > R_c$, куперовские пары перекрываются друг с другом и имеют фермионную природу. В противном случае $R_c > a_c$ куперовские пары не будут перекрываться друг с другом и будут иметь бозонную природу. Следовательно, критерий, определяющий фермионную природу куперовских пар в легированных купратах, можно записать как:

$$\frac{a_c}{R_c} \simeq \frac{\varepsilon_F}{2\varepsilon_A} > 1 \quad (5)$$

который является универсальным критерием, определяющим фермионную природу в сверхпроводниках.

Из соотношения (5) следует, что куперовские пары в легированных купратах имеют фермионную природу при выполнении условия

$$\varepsilon_F \gg \varepsilon_A \quad (6)$$

Для поляронных носителей в недолегированных и оптимально легированных купратах величина ε_A будет равна $E_p + \hbar\omega_0$, где E_p – энергия связи больших

поляронов, $\hbar\omega_0$ – энергия оптических фононов. Когда поляронный эффект исчезает ($E_p = 0$) в сверхлегированных купратах, величина ϵ_A становится равной $\hbar\omega_0$. Возможные значения энергетических параметров легированных ВТСП-купратов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Возможные значения энергетических параметров ВТСП-купратов *LSCO* и *YBCO*, определяющие бозонную и фермионную природу куперовских пар в них

Материал	$\hbar\omega_0$ эВ	E_p эВ	ϵ_A эВ	ϵ_F эВ	ϵ_F/ϵ_A	Тип куперовской пары
<i>LSCO, НЛ</i>	0.040	0.339	0.379	0.120	0.317	бозон
<i>LSCO, ОЛ</i>	0.045	0.219	0.264	0.166	0.630	бозон
<i>LSCO, СЛ</i>	0.050	0.000	0.050	0.626	12.50	фермион
<i>YBCO, НЛ</i>	0.050	0.379	0.429	0.175	0.408	бозон
<i>YBCO, ОЛ</i>	0.055	0.245	0.300	0.264	0.865	бозон
<i>YBCO, СЛ</i>	0.070	0.000	0.070	0.500	7.143	фермион

Таким образом, критерий (6) хорошо выполняется только в сверхлегированных купратах и куперовские пары в них имеют фермионную природу. При этом переход от фермионной природы к бозонной природе куперовских пар (т.е. фермион-бозонный переход) происходит при $\epsilon_F = 2\epsilon_A$ (смотрите Рисунок 1).

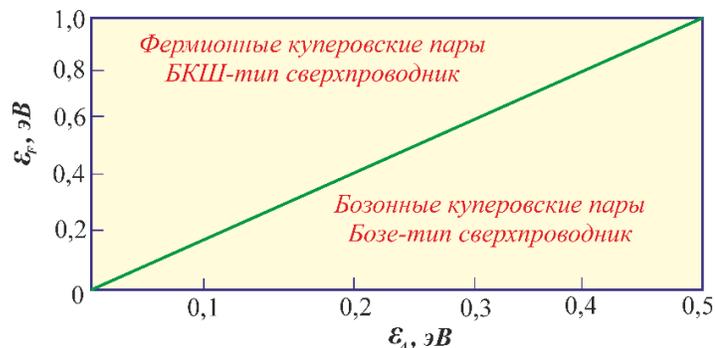


Рис. 1. Фермион-бозонный переход и граница применимости БКШ-подобной теории сверхпроводимости в легированных купратах

Нами найдены также микроскопические критерии для определения фермионной природы куперовских пар в легированных купратах. При этом предполагалось, что неопределенность в энергии фермионных носителей при их куперовском спаривании будет порядка энергии связи куперовских пар $2\Delta_{\text{БКШ}}$, т.е. неопределенность в энергии каждой фермионной компоненты куперовских

пар будет порядка $\Delta_{\text{БКШ}}$. Тогда, используя соотношение неопределенности (3), размер куперовских пар можно определить как:

$$a_c \simeq \frac{\hbar}{2\Delta_{\text{БКШ}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_F}{2m_F^*}}. \quad (7)$$

Среднее расстояние между куперовскими парами определяется из выражения:

$$R_c \simeq \left[\frac{3}{4\pi n_c} \right]^{1/3}, \quad (8)$$

где n_c – концентрация куперовских пар.

Согласно вышесказанному, мы имеем дело с фермионными куперовскими парами в легированных купратах, если будет выполняться условие $a_c > R_c$. Концентрацию фермионов, участвующих в куперовском спаривании, приблизительно можно определить как $n_A = (\varepsilon_A/\varepsilon_F)n$ (где $n = n_h$ – полная концентрация фермионов), а концентрация куперовских пар будет равна $n_c = n_A/2$. Тогда используя выражения (2), (7), (8) и выражения $n_c = \frac{\varepsilon_A}{2\varepsilon_F}n = \frac{\varepsilon_A}{2\varepsilon_F} \cdot$

$\frac{1}{3\pi^2} \left[\frac{2m_F^*\varepsilon_F}{\hbar^2} \right]^{3/2} = \frac{\varepsilon_A}{6\pi^2\varepsilon_F} \left[\frac{2m_F^*\varepsilon_F}{\hbar^2} \right]^{3/2}$ и $R_c \simeq \left(\frac{\hbar^2}{2m_F^*\varepsilon_F} \right)^{1/2} \left(\frac{9\pi\varepsilon_F}{2\varepsilon_A} \right)^{1/3}$, условие $a_c > R_c$ можно записать в виде:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} > 36\pi \left(\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} \right)^3 \quad (9)$$

или

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} < \left(\frac{\varepsilon_A}{36\pi\varepsilon_F} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

Это выражение является одним из микроскопических и универсальных критериев для определения фермионной природы куперовских пар в легированных купратных сверхпроводниках. Универсальный и микроскопический критерий для фермион-бозонного перехода в этих материалах можно записать как:

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} = \left(\frac{\varepsilon_A}{36\pi\varepsilon_F} \right)^{1/3}. \quad (11)$$

Количественные критерии, определяющие фермионную природу куперовских пар и фермион-бозонного перехода в легированных купратных сверхпроводниках при различных значениях $\varepsilon_A/\varepsilon_F$, приведены в таблице 4.

Кроме вышеприведенных микроскопических критериев существования фермионных куперовских пар в легированных ВТСП-купратах, можно получить другие такие критерии, используя условие (10) и уравнение БКШ для

энергетической щели $\Delta_{\text{БКШ}} = \hbar\omega_D/sh \left(\frac{1}{\lambda_{\text{БКШ}}} \right)$ (где $\hbar\omega_D$ – энергия акустических фононов будет заменена на ε_A). При этом условие (10) будет иметь вид:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F sh(1/\lambda_{\text{БКШ}})} < \left[\frac{\varepsilon_A}{36\pi\varepsilon_F} \right]^{1/3}, \quad (12)$$

где $\lambda_{\text{БКШ}}$ – константа электрон-фононной связи в теории БКШ.

Таблица 4

Количественные микроскопические критерии существования фермионных куперовских пар в легированных купратных сверхпроводниках при различных значениях отношения их фундаментальных параметров ε_A и ε_F

$\varepsilon_A/\varepsilon_F$	Микроскопические критерии существования фермионных куперовских пар $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F$	Значения $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F$ соответствующие фермион-бозонному переходу
0.1	<0.0959	0.0959
0.2	<0.1209	0.1209
0.3	<0.1384	0.1384
0.4	<0.1523	0.1523
0.5	<0.1641	0.1641
0.6	<0.1744	0.1744
0.7	<0.1836	0.1836
0.8	<0.1919	0.1919
0.9	<0.1996	0.1996
1.0	<0.2068	0.2068

Другой универсальный и микроскопический критерий для определения фермионной природы куперовских пар в легированных купратных сверхпроводниках можно записать в виде:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} < \frac{1}{12\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right). \quad (13)$$

В то время как другой универсальный и микроскопический критерий для фермион-бозонного перехода в легированных купратах имеет вид:

$$\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} = \frac{1}{12\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right). \quad (14)$$

Вышеприведенные универсальные и микроскопические критерии для определения фермионной природы куперовских пар и фермион-бозонных переходов в легированных ВТСП-купратах были получены путем использования основных параметров (ε_A , Δ_F или $\lambda_{\text{БКШ}}$) микроскопической теории БКШ среднего поля фермионов.

Сначала рассмотрим оптимально легированные ВТСП-купраты *LSCO* и *YBCO*, в которых энергии Ферми соответственно будут порядка $\varepsilon_F \approx 0.17$ эВ и $\varepsilon_F \approx 0.25$ эВ (смотрите Таблицу 3). Экспериментальное значение энергии связи поляронов в оптимально легированных ВТСП-купратах составляет порядка $E_p \approx 0.06$ эВ. Для ВТСП-материалов *LSCO* критерий (10) можно записать как:

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} < \left[\frac{0.11}{36\pi \cdot 0.17} \right]^{1/3} \text{ при } \varepsilon_A = E_p + \hbar\omega_0 \approx 0.11 \text{ эВ} \quad (15)$$

или

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} < (5.8)^{1/3} \cdot 10^{-1} \approx 0.18 \quad (16)$$

Величина $\Delta_{\text{БКШ}}$ в оптимально легированном *LSCO* будет меньше или порядка 0.04 эВ, так что для $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F \approx 0.04/0.17 \approx 0.235$ критерий (16), определяющий фермионную природу куперовских пар в *LSCO*, не будет выполняться при оптимально легированном режиме.

Для оптимально легированных ВТСП-купратов *YBCO* критерий (10) будет иметь вид:

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} < \left[\frac{0.11}{36\pi \cdot 0.25} \right]^{1/3} \text{ при } \varepsilon_A = E_p + \hbar\omega_0 \approx 0.11 \text{ эВ} \quad (17)$$

или

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} < 0.157 \quad (18)$$

Считая, что величина $\Delta_{\text{БКШ}}$ в оптимально легированном *YBCO* будет также порядка 0.04 эВ, получаем для отношения $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F = 0.16$. Видно, что критерий (18), определяющий фермионную природу куперовских пар в ВТСП-материале *YBCO*, также не будет выполняться при оптимально легированном режиме.

Теперь рассмотрим сверхлегированные ВТСП-купраты *LSCO* и *YBCO*, у которых энергия Ферми ε_F , согласно экспериментальным данным, составляет величину порядка 0.4 эВ или меньше. Далее экспериментальные данные показывают, что значение $\Delta_{\text{БКШ}}$ в сверхлегированных купратах изменяется от 0.010 эВ до 0.020 эВ. В этих ВТСП-материалах энергия притягательного спаривательного взаимодействия между дырочными носителями ε_A при $E_p = 0$

определяется как $\varepsilon_A = \hbar\omega_0$. Энергии оптических фононов можно считать равными $\hbar\omega_0 \approx 0.06$ эВ. Таким образом, критерий (10), определяющий фермионную природу куперовских пар в сверхлегированных ВТСП-купратах *LSCO* и *YBCO* при $\varepsilon_A = 0.06$ эВ и $\varepsilon_F = 0.4$ эВ, можно записать в виде:

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} < \left[\frac{0.06}{36\pi \cdot 0.4} \right]^{1/3} = 1.1 \cdot 10^{-1} = 0.11 \quad (19)$$

Согласно вышеупомянутым экспериментальным результатам, величину параметра $\Delta_{\text{БКШ}}$ в сверхлегированных ВТСП-купратах разумно выбрать равной $\Delta_{\text{БКШ}} = 0.015$ эВ. Тогда критерий (20), определяющий фермионную природу куперовских пар в *LSCO* и *YBCO*, будет хорошо выполняться при $\varepsilon_F = 0.4$ эВ. Можно ожидать, что фермион-бозонные переходы (т.е. эволюции фермионных куперовских пар в бозонные куперовские пары) в легированных ВТСП-купратах *LSCO* и *YBCO* происходят при уменьшении уровня легирования от сильно сверхлегированного режима до слегка сверхлегированного режима, при котором энергия Ферми ε_F будет уменьшаться от 0.4 эВ до 0.3 эВ. При этом критерий (11) для $\varepsilon_A = 0.06$ эВ будет иметь вид:

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} = \left[\frac{0.06}{36\pi \cdot 0.3} \right]^{1/3} \approx 0.121 \quad (20)$$

При $\varepsilon_F = 0.3$ эВ этот критерий будет выполняться для $\Delta_{\text{БКШ}} = 0.0363$ эВ.

Таким образом, согласно критерию (10) куперовские пары в легированных купратах имеют фермионную природу, когда поляронный эффект в них отсутствует ($E_p = 0$) и энергия Ферми ε_F будет больше, чем 0.3 эВ. Для дальнейшего анализа выражение (11) можно записать в виде:

$$\frac{\Delta_{\text{БКШ}}}{\varepsilon_F} \approx 0.214 \left(\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F} \right)^{1/3} \quad (21)$$

Это выражение определяет границы фермион-бозонных переходов в легированных ВТСП-купратах в зависимости от двух фундаментальных отношений $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ и $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F$, как показано на Рисунке 2.

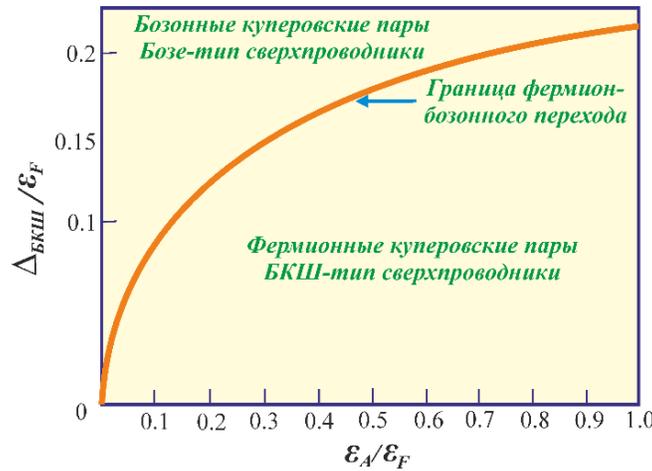


Рис. 2. Возможности существования фермионных куперовских пар и фермион-бозонного перехода в легированных ВТСП купратах в зависимости от двух фундаментальных отношений $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ и $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F$

Для дальнейшего анализа других микроскопических критериев, определяющих фермионную природу куперовских пар и фермион-бозонных переходов в легированных ВТСП-купратах, критерии (13) и (14) запишем в виде:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right) \leq \frac{\varepsilon_F}{30\varepsilon_A} \quad (22)$$

Рассмотрим оптимально легированный ВТСП-материал *LSCO*, для которого $\varepsilon_A = 0.11$ эВ и $\varepsilon_F = 0.17$ эВ. Тогда отношение (20) можно записать в виде:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right) < 0.0515 \quad (23)$$

Можно считать, что величина параметра $\lambda_{\text{БКШ}}$ в оптимально легированном *LSCO* будет порядка $\lambda_{\text{БКШ}} \approx 0.4$. Поэтому критерий (23), определяющий фермионную природу куперовских пар в оптимально легированном *LSCO*, не будет выполняться даже при $\lambda_{\text{БКШ}} \geq 0.506$.

Для оптимально легированных ВТСП-материалов *YBCO* условие (22) при $\varepsilon_A = 0.11$ эВ и $\varepsilon_F = 0.25$ эВ будет иметь вид:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right) \leq 0.0757 \quad (24)$$

Этот критерий при $\lambda_{\text{БКШ}} \geq 0.582$ не будет выполняться для оптимально легированного ВТСП-материала *YBCO*, т.е. куперовские пары в этом материале имеют бозонную природу. Вышеприведенные результаты численных расчетов показывают, что фермион-бозонные переходы в легированных купратах *LSCO* и *YBCO* происходят соответственно при значениях $\lambda_{\text{БКШ}} \approx 0.506$ и $\lambda_{\text{БКШ}} \approx 0.582$.

В случае сверхлегированных купратов $LSCO$ и $YBCO$, для которых $\varepsilon_A \simeq 0.06$ эВ и $\varepsilon_F \simeq 0.4$ эВ, условие (22) можно записать как:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right) < 0.222. \quad (25)$$

Константа БКШ-подобной электрон-фононной связи $\lambda_{\text{БКШ}}$ уменьшается с увеличением уровня легирования купратов и можно предположить, что она будет меньше или порядка 0.6 в сверхлегированных режимах. Поэтому критерий (25), определяющий фермионную природу куперовских пар в $LSCO$ и $YBCO$, будет выполняться с большим запасом в сверхлегированных режимах.

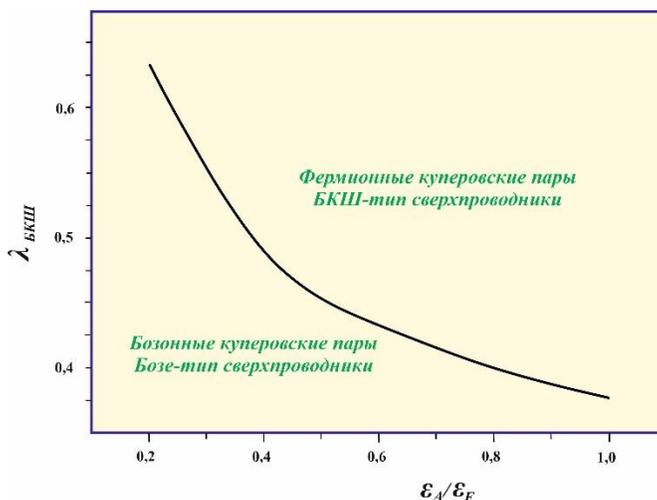


Рис. 3. Возможности существования фермионных куперовских пар и фермион-бозонного перехода в легированных ВТСП-купратах в зависимости от фундаментального отношения $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ и от константы электрон-фононной связи БКШ-типа $\lambda_{\text{БКШ}}$

Наконец, микроскопический критерий, определяющий фермион-бозонные переходы в легированных купратах, можно записать в виде:

$$\exp\left(-\frac{3}{2\lambda_{\text{БКШ}}}\right) = \frac{1}{30\left(\frac{\varepsilon_A}{\varepsilon_F}\right)} \quad (26)$$

Это выражение определяет границы фермион-бозонных переходов в легированных ВТСП-купратах в зависимости от фундаментального отношения $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ и от константы БКШ-подобной электрон-фононной связи в них, как показано на рисунке 3.

В третьей главе «БКШ-подобная теория ферми-жидкостной сверхпроводимости и её применение в сверхлегированных купратах»

рассмотрены возможности куперовского спаривания дырочных носителей в сверхлегированных купратах при их взаимодействии друг с другом путем обмена оптическими и акустическими фононами с энергией $\hbar\omega_0$ и $\hbar\omega_D$ и изучены возможности реализации ферми-жидкостной сверхпроводимости в этих материалах, описываемой подходящей БКШ-подобной теорией.

БКШ-подобное уравнение $\frac{1}{\lambda_{\text{БКШ}}} = \int_0^{\varepsilon_A} \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\xi^2 + \Delta^2 T}} \text{th} \left[\frac{\sqrt{\xi^2 + \Delta^2 T}}{2k_B T} \right]$ для определения температурной и концентрационной зависимости сверхпроводящего параметра порядка $\Delta_{SC}(T, x)$ и концентрационной зависимости критической температуры сверхпроводящего перехода $T_c(x)$ в сверхлегированных купратах можно переписать как:

$$\frac{1}{\lambda_{\text{БКШ}}(x)} = \int_0^{\varepsilon_A} \frac{d\xi}{\sqrt{\xi^2 + \Delta_{SC}^2(T, x)}} \text{th} \frac{\sqrt{\xi^2 + \Delta_{SC}^2(T, x)}}{2k_B T}, \quad (27)$$

где $\lambda_{\text{БКШ}}(x) = D(\varepsilon_F(x))\tilde{V}_A(x)$, $D(\varepsilon_F(x))$ – плотность состояний на уровне Ферми, $\tilde{V}_A(x) = V_{ph} - \frac{V_c}{[1 + D(\varepsilon_F(x))V_c \ln(\frac{\omega_c}{\omega_0})]}$ – эффективный притягательный потенциал взаимодействия между дырочными носителями, V_c – кулоновский потенциал отталкивания между этими носителями с энергией обрезания ε_c .

Отношение $V_c / [1 + D(\varepsilon_F(x))V_c \ln(\frac{\omega_c}{\omega_0})]$ будет очень малым, так как $D(\varepsilon_F(x))V_c \gg \lambda_{\text{БКШ}}(x)$ и $\omega_c / \omega_0 \gg 1$. Поэтому зависимость $\tilde{V}_A(x)$ от уровня легирования будет очень слабой и в первом приближении ею можно пренебречь. При $T = 0$ уравнение для определения $\Delta_{SC}(0, x)$ имеет вид:

$$\Delta_{SC}(0, x) = \frac{\hbar(\omega_0 + \omega_D)}{\text{sh}(1/\lambda_{\text{БКШ}}(x))}. \quad (28)$$

Далее выражение для определения критической температуры сверхпроводящего перехода, зависящего от уровня легирования x в сверхлегированных купратах, можно записать в виде:

$$T_c(x) \simeq 1.134\varepsilon_A \exp \left[-\frac{1}{\lambda_{\text{БКШ}}(x)} \right] \quad (29)$$

где $\varepsilon_A = \hbar\omega_0 + \hbar\omega_D$.

Вышеприведенные выражения (28) и (29) позволяют нам проводить численные расчеты основных сверхпроводящих параметров $\Delta_{SC}(0, x)$ и $T_c(x)$ сверхлегированных купратов и сравнить численные результаты для $\Delta_{SC}(0, x)$ и $T_c(x)$ с существующими экспериментальными данными.

Основными наблюдаемыми сверхпроводящими параметрами вышеизложенной БКШ-подобной теории ферми-жидкостной сверхпроводимости в сверхлегированных купратах являются параметры $\Delta_{SC}(x)$ и $T_c(x)$. Поэтому вычисление этих наблюдаемых величин является важным результатом, так как это обеспечивает путь к проверке применимости БКШ-подобной теории сверхпроводимости в сверхлегированных купратах. Теперь, используя выражения (28) и (29), вычисляем сверхпроводящий параметр порядка $\Delta_{SC}(x)$ и критическую температуру сверхпроводящего перехода $T_c(x)$ как функцию двух основных параметров ε_A и $\lambda_{\text{БКШ}}$. При этом нами учтено, что БКШ-подобная теория сверхпроводимости будет хорошо применима при $\lambda_{\text{БКШ}} \lesssim 0.5$. Сначала теоретические расчеты $\Delta_{SC}(x)$ и $T_c(x)$ в сверхлегированных купратах проведем при фиксированном сверхлегированном уровне $x > 0.16$. Результаты этих теоретических расчетов сверхпроводящих параметров Δ_{SC} и T_c , которые определены из выражений (29) и (30), сравнены с экспериментальными значениями Δ_{SC} и T_c в различных сверхлегированных купратах (смотрите Таблицы 5 и 6).

Таблица 5

Теоретические и экспериментальные значения сверхпроводящих параметров порядка Δ_{SC} в различных сверхлегированных купратах

Сверхлегированные купраты	Теория			Эксперимент
	$\hbar(\omega_0 + \omega_D)$, эВ	$\lambda_{\text{БКШ}}$	Δ_{SC} , мэВ	Δ_{SC} , мэВ
<i>La</i> _{2-x} <i>Sr</i> _x <i>CuO</i> ₄ (<i>La214</i>)	0.060	0.395	9.62	10
<i>Bi</i> _{2+x} <i>Sr</i> _{2-x} <i>CuO</i> ₆ (<i>Bi2201</i>)	0.060	0.427	11.65	12
<i>Bi</i> ₂ <i>Sr</i> ₂ <i>CaCu</i> ₂ <i>O</i> _{8+δ} (<i>Bi2212</i>)	0.070	0.495	21.05	25
<i>Bi2212</i>	0.080	0.493	21.4	25

Таблица 6

Теоретические и экспериментальные значения критических температур T_c сверхпроводящих переходов в различных сверхлегированных купратах

Сверхлегированные купраты	Теория			Эксперимент
	$\hbar(\omega_0 + \omega_D)$, эВ	$\lambda_{\text{БКШ}}$	T_c , К	T_c , К
<i>La</i> _{2-x} <i>Sr</i> _x <i>CuO</i> ₄ (<i>La214</i>)	0.06	0.333	38	40
<i>Bi</i> _{2+x} <i>Sr</i> _{2-x} <i>CuO</i> ₆ (<i>Bi2201</i>)	0.05	0.244	10	10
<i>Bi</i> ₂ <i>Sr</i> ₂ <i>CaCu</i> ₂ <i>O</i> _{8+δ} (<i>Bi2212</i>)	0.07	0.417	83	82
<i>Bi2212</i>	0.07	0.410	81	81

Для того, чтобы определить зависимость БКШ-подобного сверхпроводящего параметра порядка (или сверхпроводящей щели) Δ_{SC} и критической температуры T_c сверхпроводящего перехода в сверхлегированных купратах от уровня легирования x , плотность состояний на уровне Ферми приближенно можно выразить в простом виде:

$$D(\varepsilon_F) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon_F} & \text{для } \xi < \varepsilon_F \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (30)$$

Используя это приближение, условие (6) и выражение $\varepsilon_F = \frac{\hbar^2(3\pi^2 n_h)^{2/3}}{2m_h^*} = \frac{\hbar^2(3\pi^2 n_a x)^{2/3}}{2m_h^*} > 2\varepsilon_A = 2\hbar(\omega_0 + \omega_D)$ для $\varepsilon_F(x)$, получаем из уравнения (28) и (29) следующие выражения для $\Delta_{SC}(x)$ и $T_c(x)$:

$$\Delta_{SC}(x) = \frac{2\varepsilon_A \exp\left[-\frac{\hbar^2(3\pi^2 n_a x)^{2/3}}{2m_h^* \tilde{V}_A}\right]}{1 - \exp\left[-\frac{\hbar^2(3\pi^2 n_a x)^{2/3}}{2m_h^* \tilde{V}_A}\right]} \quad (31)$$

$$T_c(x) \simeq \frac{1.134\varepsilon_A}{k_B} \exp\left[-\frac{\hbar^2(3\pi^2 n_a x)^{2/3}}{2m_h^* \tilde{V}_A}\right] \quad (32)$$

В случае сверхлегированных купратов $\varepsilon_A = \hbar\omega_0 + \hbar\omega_D$ и $m_h^* = m_e$.

Как видно из (31) и (32), как БКШ-подобный сверхпроводящий параметр порядка $\Delta_{SC}(x)$, так и критическая температура $T_c(x)$ сверхпроводящего перехода в сверхлегированных купратах экспоненциально зависят от уровня легирования x и уменьшаются экспоненциально с увеличением x . Действительно, такие зависимости $\Delta_{SC}(x)$ и $T_c(x)$ экспериментально наблюдались в сверхлегированных купратах. В частности, результаты наших численных расчетов концентрационных зависимостей $\Delta_{SC}(x)$ и $T_c(x)$ сопоставлены с экспериментальными данными для сверхлегированных купратных материалов $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ (*La214*). При этом установлено хорошее согласие между теоретическими результатами и экспериментальными данными (смотрите Рисунки 4 и 5).

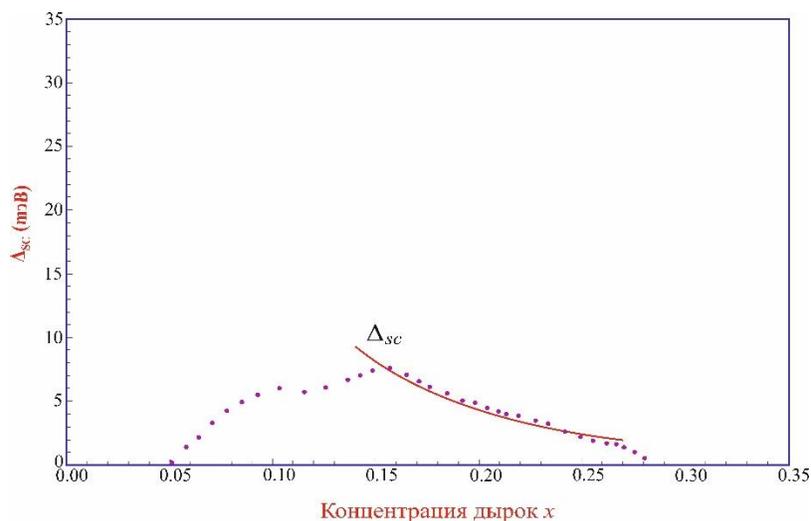


Рис. 4. Теоретическая зависимость БКШ-подобного сверхпроводящего параметра порядка Δ_{SC} в сверхлегированном купратном материале La_{214} от уровня легирования x , вычисленная с использованием выражения (31) (сплошная кривая) и экспериментальные данные по $\Delta_{SC}(x)$ (чёрные кружки) для La_{214}

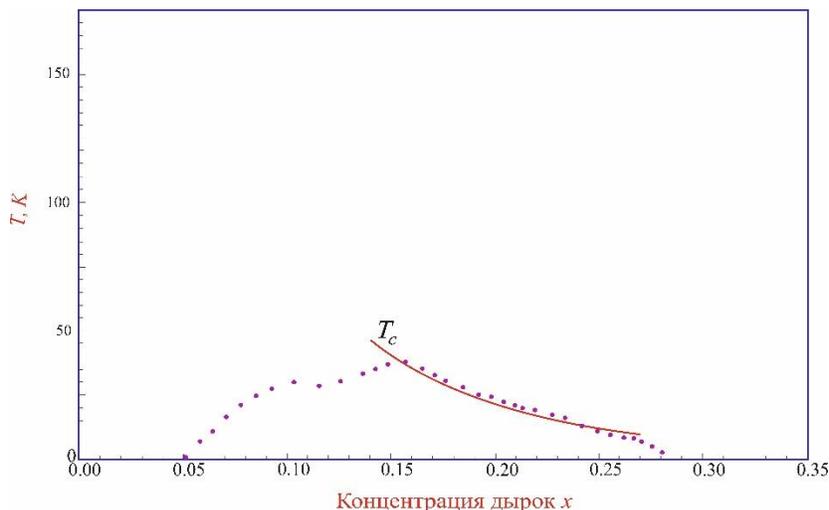


Рис. 5. Теоретическая зависимость критической температуры T_c сверхпроводящего перехода в сверхлегированном купратном материале La_{214} от уровня легирования x , вычисленная с использованием выражения (32) (сплошная кривая), и экспериментальные данные по $T_c(x)$ (чёрные кружки) для La_{214}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему: «О возможности реализации БКШ-подобной ферми-жидкостной сверхпроводимости в сверхлегированных купратах» представлены следующие выводы:

1. Определены и теоретически рассчитаны характерные энергии Ферми ε_F недолегированных, оптимально легированных и сверхлегированных купратов. Полученные значения ε_F находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными, согласно которым энергия Ферми в этих материалах составляет $\varepsilon_F \simeq (0.1 \div 0.4)$ эВ. Показано, что энергии Ферми больших поляронов в недолегированных и оптимально легированных купратах достаточно малы ($\varepsilon_F \simeq (0.10 \div 0.25)$ эВ) и существенно ниже энергии Ферми квазисвободных дырок в сверхлегированных купратах, где экспериментальные значения ε_F не превышают ~ 0.4 эВ.

2. Впервые получены универсальные количественные критерии для определения фермионной природы куперовских пар и фермион-бозонного перехода (т.е. изменения природы куперовских пар от фермионного типа к бозонному) в легированных ВТСП-купратах, которые зависят от двух фундаментальных соотношений $\varepsilon_A/\varepsilon_F$ и $\Delta_{\text{БКШ}}/\varepsilon_F$, а также от константы БКШ-подобной электрон-фононной связи $\lambda_{\text{БКШ}}$. Показано, что указанные критерии, определяющие фермионную природу куперовских пар, хорошо выполняются в сверхлегированных купратах (в частности, в *LSCO* и *YBCO*). В этих материалах куперовские пары квазисвободных дырок имеют фермионную природу, а фермион-бозонный переход реализуется в области слегка сверхлегированного режима при $x \geq 0.17$.

3. Развита модифицированная БКШ-подобная теория куперовского спаривания квазисвободных дырок в сверхлегированных купратных сверхпроводниках при их взаимодействии с оптическими и акустическими фононами. Получены БКШ-подобные выражения для определения сверхпроводящего параметра порядка $\Delta_{SC} = \Delta_{\text{БКШ}}$ и критической температуры сверхпроводящего перехода T_c . Установлено, что только спектр возбуждений наиболее подвижных куперовских пар, а не часто используемый БКШ-подобный спектр возбуждений их ферми-компонент, является пригодным для определения критерия возникновения БКШ-подобной ферми-жидкостной сверхпроводимости в твердых телах в целом и в сверхлегированных купратах в частности.

4. Получены аналитические выражения для БКШ-подобного сверхпроводящего параметра порядка Δ_{SC} и критической температуры T_c сверхпроводящего перехода в легированных купратах, зависящие от уровня их дырочного легирования x . Проведены численные расчеты зависимостей $\Delta_{SC}(x)$ и

$T_c(x)$ в сверхлегированных купратах. Результаты расчетов основных сверхпроводящих параметров $\Delta_{SC}(x)$ и $T_c(x)$ сопоставлены с экспериментальными данными для сверхлегированных купратных сверхпроводников, и выявлено хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов. Это подтверждает применимость предложенной БКШ-подобной теории сверхпроводимости к сверхлегированным купратам.

**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

SHERALIYEV MASHRAB UMURZAKOVICH

**ON THE POSSIBILITY OF REALIZING BCS - LIKE FERMI - LIQUID
SUPERCONDUCTIVITY IN OVERDOPED CUPRATES**

01.04.07 – Condensed matter physics

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

Tashkent – 2025

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 Ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under No. B2024.2.PhD/FM1119.

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at the Institute of Nuclear Physics of 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.uz and on the website of “Ziyonet” informational and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific consultant:	Dzhumanov Safarali Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Official opponents:	Rakhimov Abdulla Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior researcher Rasulov Rustam Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
Leading organization:	Bukhara State University

The defense of the dissertation will be held on “___” _____ 2025, 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: Institute of Nuclear Physics, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871) 289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “___” _____ 2025.
(Registry record No. ___ dated “___” _____ 2025.)

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

O.R. Tojiboev
Scientific Secretary of the Scientific Council on Award
of Scientific Degrees, PhD Ph.-M.S.,
Senior Researcher

S.B. Igamov
Chairman of the Scientific seminar of the Scientific Council
on ward of Scientific Degrees, D.Ph-M.S., Professor

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research work the development of a BCS-like theory of Fermi-liquid superconductivity in heavily doped cuprates and the determination of the fermionic nature of Cooper pairs and the fermion-boson transition in them.

The tasks of the research work:

determine the characteristic Fermi energies in underdoped, optimally doped, and overdoped cuprates;

study the universal and microscopic criteria that determine the fermionic nature of Cooper pairs and the possibilities of fermion-boson transition in doped cuprates;

develop an adequate BCS-like theory of Cooper pairing of hole charge carriers in overdoped cuprates;

determine the criterion for superfluidity of the BCS-like Fermi liquid in overdoped cuprates;

to demonstrate the possibility of implementing BCS-like Fermi-liquid superconductivity in heavily doped cuprates and to determine the superconducting parameters (superconducting order parameter and critical temperature) in them as functions of the doping level.

The objects of the research-work are overdoped cuprate superconductors and interacting quasi-free hole Fermi gas in them.

The subject of the research work is the superconducting parameters of super overdoped cuprates and the influence of the doping level on these parameters.

Scientific novelty of the research work:

the characteristic Fermi energies in underdoped, optimally doped, and overdoped cuprates have been determined; it has been shown that the Fermi energy in overdoped cuprates significantly exceeds the corresponding values in underdoped and optimally doped cuprates;

universal quantitative criteria for determining the fermionic nature of Cooper pairs in overdoped cuprates have been obtained; an adequate BCS-like theory of Cooper pairing of quasi-free hole carriers during their interaction with optical phonons in these superconductors has been developed;

for the first time, a corresponding Landau superfluidity criterion for fermionic Cooper pairs has been proposed, and the concentration dependencies of the BCS-like superconducting order parameter and the critical temperature of the superconducting transition in overdoped cuprates have been determined;

analytical expressions for the superconducting order parameter Δ_{SC} and the critical temperature T_c of the superconducting transition in overdoped cuprate materials have been obtained. The calculated values of T_c and Δ_{SC} are in good agreement with experimental data.

Implementation of research results: based on the study of superconductivity in BCS-like Fermi liquid in heavily doped cuprates:

results on determining the Fermi energy of weakly doped, optimally doped, and superdoped cuprates; universal quantitative criteria for determining the fermion nature of Cooper pairs in superdoped cuprates and the BCS-like theory of Cooper pairing in the interaction of quasi-free hole carriers with optical phonons in these cuprate superconductors; Landau superfluidity criterion for Fermion Cooper pairs; The BCS-like superconducting parameter order in superdoped cuprates, as well as the critical transition temperature to the superconducting state, were used at the Namangan Engineering and Construction Institute within the framework of the project FZ-20200929243 "Kuchli elektromagnit maydonda qizdirilgan elektronlar va fononlarning yarim o'tkazgichli quyosh fotoelektrik elementlari hamda nanostrukturalar xususiyatlariga ta'siri" (2022-2026) (letter from Namangan State Technical University No. 01/10-09/682 dated 04.06.2025). The use of the results served as a scientific and methodological basis for studying the influence of electrons and phonons heated in a strong electromagnetic field on the properties of semiconductor solar photovoltaic cells and nanostructures.

Structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references, and an appendix. The volume of the dissertation is 117 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (I часть; I part)

1. Dzhumanov S., Sheraliev M.U. The validity of the BCS-like theory of fermi-liquid superconductivity in overdoped cuprates // International Journal of Modern Physics B. – Singapore: World Scientific Publishing, 2024. – id. 2450140 (7pp.) (№3. Scopus; IF=1.4)
2. Dzhumanov S., Sheraliev M.U. The BCS-Like Theory of Fermi-Liquid Superconductivity in Overdoped Cuprates // AIP Conference Proceedings. – United States: American Institute of Physics, 2024. – Vol. 3020. – id.030002 (4pp.) (№3. Scopus; IF=0.41)
3. Dzhumanov S., Sheraliev M.U. The relevant criteria for the BCS-type Fermi-liquid superconductivity in doped cuprate superconductors // Доклады Академии наук РУз. – Ташкент: АН РУз, 2024. – №4. – С. 24-32 (01.00.00. №7)
4. Dzhumanov S., Tashmetov M.Yu., Sheraliev M.U., Zaripov O.O., Djumanov Sh.S. Specific criteria for determining the fermionic and bosonic natures of Cooper pairs in doped cuprate superconductors // Journal of Physics: Conference Series. – United Kingdom: IOP Publishing, 2025. – Vol.2984. – id.012007 (8pp.) (№3. Scopus; IF=1.3)

II bo'lim (Часть II; Part II)

5. Dzhumanov S., Gulamova D.D., Djumanov Sh.S., Sheraliev M.U. Two-dimensional room-temperature superconductivity emerging within the new Bi/Pb-based ceramic cuprate superconductors at ambient pressure // Труды Международной конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики”. 19-21 октября 2023 г. – Ташкент: ФТИ АН РУз, 2023. – С. 190-191.
6. Dzhumanov S., Karimbaev E.X., Kurbanov U.T., Sheraliyev M.U. Possible anomalies of electronic entropy in high- T_c cuprates // Modern problems of nuclear energetics and nuclear technologies: International Conference, November 23-25, 2021. – Tashkent: Institute of Nuclear Physics, 2021. – pp.115-117.
7. Dzhumanov S., Sheraliev M.U. The BCS-Like Theory of Fermi-Liquid Superconductivity in Overdoped Cuprates // Тезисы докладов IV Международного научного форума «Ядерная наука и технологии», 26-30 сентября 2022. – Алматы, Республика Казахстан: Институт ядерной физики, 2022. – С. 90-91.

8. Dzhumanov S., Tashmetov M.Yu., Sheraliev M.U., Zaripov O.O., Djumanov Sh.S. Specific criteria for determining the fermionic and bosonic natures of Cooper pairs in doped cuprate superconductors // “Nuclear Science and technologies”: V International Scientific Forum, 7-12 октября, 2024. – Almaty, Kazakhstan: Institute of Nuclear Physics, 2024. – pp. 143.