

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

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

TURMANOVA ULBOSIN MAXMUTOVNA

**YUQORI HARORATLI O‘TA O‘TKAZUVCHAN KUPRATLARDA
BOZE-SUYUQLIKLI O‘TA O‘TKAZUVCHANLIK VA MAGNIT
MAYDON KIRISH CHUQURLIGI**

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**

Turmanova Ulbosin Maxmutovna

Yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda Boze-suyuqlikli
o‘ta o‘tkazuvchanlik va magnit maydon kirish chuqurligi..... 3

Турманова Улбосын Махмутовна

Бозе-жидкостная сверхпроводимость и глубина проникновения
магнитного поля в ВТСП купратах..... 23

Turmanova Ulbosin Makhmutovna

Bose-liquid superconductivity and the penetration depth of the
magnetic field in HTCS cuprates..... 43

E‘lon qilingan ishlar ro‘uxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 47

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

YADRO FIZIKASI INSTITUTI

TURMANOVA ULBOSIN MAXMUTOVNA

**YUQORI HARORATLI O‘TA O‘TKAZUVCHAN KUPRATLARDA
BOZE-SUYUQLIKLI O‘TA O‘TKAZUVCHANLIK VA MAGNIT
MAYDON KIRISH CHUQURLIGI**

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/FM1114 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Yadro fizikasi institutida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.inp.uz) va "Ziyonet" axborot-ta'lim tarmog'ida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

| | |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ilmiy rahbar: | Djumanov Safarali fizika-matematika fanlari doktori, professor |
| Rasmiy opponentlar: | Jumaev Mustaqim Rofiyevich fizika-matematika fanlari doktori, professor Muxtarov Adil Pazilovich fizika-matematika fanlari nomzodi, katta ilmiy xodim |
| Yetakchi tashkilot: | Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika 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: 100214, 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, YaFI. Tel.: (+99871) 289-31-19.

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

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

O.R. Tojiboyev
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 zaruriyati. Soʻnggi paytlarda yuqori haroratli oʻta oʻtkazuvchan kupratlarda oʻta oʻtkazuvchanlik mexanizmlarini tavsiflovchi nazariyalarni rivojlantirish, ularni zamonaviy oʻta oʻtkazuvchan materialshunoslik fanini rivojlantirish uchun qoʻllash kondensirlangan holat fizikasining eng dolzarb yoʻnalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu sohada tadqiqotlar soni koʻp boʻlishiga qaramay, yuqori haroratli oʻta oʻtkazgichlar fizikasini oʻrganishga qiziqish ortib bormoqda. Bu, avvalo, yuqori haroratli oʻta oʻtkazuvchan materiallar allaqachon texnika va energetikaning turli sohalarida keng qoʻllanilayotgani bilan bogʻliq. Biroq oʻttiz yildan ortiq davom etgan legirlangan yuqori haroratli oʻta oʻtkazuvchan kupratlarning jadal nazariy va eksperimental tadqiqotlaridan soʻng ham, ulardagi oʻta oʻtkazuvchanlikga oʻtish kritik harorati T_c dan past boʻlgan ushbu materiallarning noodatiy yuqori haroratli oʻta oʻtkazuvchanligi tabiatini tushunishda hali ham toʻliq aniqlik yoʻq.

Bardin-Kuper-Shriffer nazariyasi (BKSh) bilan tavsiflangan oddiy oʻta oʻtkazgichlarda London magnit maydonining oʻta oʻtkazgichga kirish chuqurligi $\lambda_L(T)$ ning haroratga bogʻliqligi energiya tirqishi chekli boʻlgan kvazizarralarning tirqishsiz uygʻonish spektri bilan aniqlanadi. Yuqori haroratli kupratli oʻta oʻtkazgichlarning ushbu BKSh simon oʻtkazgichlardan farqli oʻlaroq, $\lambda_L(T)$ ning xatti-harakati anomal hisoblanadi, chunki $\lambda_L(T)$ harorat T ga noodatiy bogʻliqliklarni namoyon qiladi, ularning tabiati hali nomaʼlum va faol tadqiqotlar mavzusi boʻlib qolmoqda. Shuning uchun, kupratlardagi noodatiy oʻta oʻtkazuvchanlik odatdagi Fermi-suyuqlikli BKSh turidagi oʻta oʻtkazuvchanlikdan tubdan farq qiladi va Boze-suyuqlikli oʻta oʻtkazuvchanlik va noodatiy bozonli Kuper juftlarining oʻta oquvchanligi bilan bogʻliq deb taxmin qilinadi. YuHOʻOʻ kupratlar uchun BKSh oʻta oʻtkazuvchanlik nazariyasi bashoratlariga mos kelmaydigan noodatiy haroratga bogʻliqlik $\lambda_L(T)$ xosdir. Kupratli YuHOʻOʻ materiallar kichik Fermi energiyalariga ega $\varepsilon_f \ll 1eV$ va kuchli elektron-fonon bogʻlanish bilan tavsiflanadi, bu ularni noodatiy oʻta oʻtkazgichlarga aylantiradi. YuHOʻOʻ kupratlarda T_c haroratidagi oʻta oʻtkazuvchanlik oʻtishi BKSh-simon fazaviy oʻtish emas, balki oʻta oquvchan 4He dagi λ -oʻtish kabi λ -simon fazaviy oʻtish ekanligi va ulardagi $\lambda_L(T)$ harorat bogʻlanishlari $T \ll T_c$ haroratida ham, T_c harorati yaqinida ham BKSh-model bashoratidan keskin farq qilishi tajribada aniqlangan. Bu esa ushbu YuHOʻOʻ materiallarda fundamental fizika nuqtayi nazaridan katta qiziqish uygʻotadigan Boze-suyuqlik oʻta oʻtkazuvchanligini amalga oshirish mumkinligini koʻrsatadi.

Oʻzbekiston Respublikasida kondensirlangan holat fizikasini, xususan, nanostrukturali, oʻta oʻtkazuvchan va yarimoʻtkazgich materiallar fizikasini rivojlantirishga, shuningdek, ushbu sohada jahon darajasidagi fundamental tadqiqotlarni amalga oshirishga katta eʼtibor qaratilmoqda. Mamlakatning ilmiy-texnologik taraqqiyoti uchun muhim ahamiyatga ega boʻlgan bunday tadqiqotlarning

ustuvor yo‘nalishlari “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi”da¹ o‘z aksini topgan.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2013-yil 1-martdagi PF-4512-son “Muqobil energiya manbalarini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi farmoni, 2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-son “Fanlar akademiyasi faoliyatini, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”, 2019-yil 21-noyabrdagi PQ-4526-son “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 rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot ishi respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II. “Energetika, energiya tejankorligi va muqobil energiya manbalari” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Hozirgi vaqtda yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda o‘ta o‘tkazuvchanlikni tadqiq qilish butun dunyo bo‘ylab ko‘plab olimlar tomonidan olib borilayotgan nazariy va eksperimental ishlarning predmeti hisoblanadi, masalan, amerikalik (R. Prozorov, L. Krusin-Elbaum, L. Drabeck, T. Hylton, K. Char, M.R. Beasley, W.N. Hardy, D.A. Bonn, D.C. Morgan, R. Liang, K. Zhang, J. Rammer va boshqalar), buyuk britaniyalik (A.S. Alexandrov va boshqalar), italyalik (L. Pietronero va boshqalar), kaliforniyalik (J.R. Cooper, C.T. Chu, L.W. Zhou, B. Dunn, G. Grüner va boshqalar), germaniyalik (E.W. Scheidt, C. Hucho, K. Lüders, V. Müller va boshqalar), kanadalik (M. Biderang, R. Molavi, A. Damascelli, A. Kapitulnik va boshqalar), belgiyalik (J.T. Devreese va boshqalar), shvetsariyalik (S. Strässler, K.A. Müller, R. Khasanov, H. Keller va boshqalar), xitoylik (H.C. Yang, B.D. Yao, H.E. Horng va boshqalar), koreyalik (J. Kim, A. Akbari va boshqalar), yaponiyalik (K. Kanoda, K. Akiba, K. Suzuki, T. Takahashi va boshqalar), hindistonlik (J.P. Carini va boshqalar), rossiyalik (A.I. Larkin va boshqalar) va o‘zbekistonlik olimlar (S. Dzhumanov, E.M. Ibragimova, U.T. Kurbanov, B.Ya. Yavidov, P.J. Baimatov, D.R. Jurayev, E.X. Karimboyev, O.K. Ganiyev, Sh.S. Jumanov, B. Abdullayev va boshqalar) hamda boshqa mutaxassislar tomonidan amalga oshirilgan.

Ushbu tadqiqotlar natijasida yuqori haroratli kupratlarda T_c dan past bo‘lgan ikkita harorat oralig‘ida $\lambda_L(T)$ ning haroratga bog‘liqligi aniq farqlanadigan xususiyatlarga ega ekanligi aniqlandi. Bu xususiyatlarni tushuntirish uchun turli nazariy modellar (S. Djumanov, L. Pietronero, S. Strässler, C. Grimaldi va boshqalar tomonidan) taklif etildi. O‘ta o‘tkazuvchan kupratlar past Fermi energiyasi $\varepsilon_f \ll 1$ eV va kuchli elektron-fonon o‘zaro ta’siri bilan tavsiflanishi sababli, ular noodatiy (BKSh-simon bo‘lmagan) o‘ta o‘tkazgichlar turkumiga kiradi. Ko‘pgina tajribalar shuni ko‘rsatdiki, yuqori haroratli kupratlarda T_c dan past haroratgacha bo‘lgan keng

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 28-yanvardagi PF-60 sonli “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risidagi” farmoni

harorat oralig'ida $\lambda_L(T)$ ning haroratga bog'liqligi BKSh nazariyasining bashoratlariga mos kelmaydi.

Biroq ko'p sonli nazariy va eksperimental tadqiqotlarga qaramay, noodatiy o'ta o'tkazuvchan kupratlarda past $T \ll T_c$ haroratlarda ham, T_c ga yaqin yuqori haroratlarda ham $\lambda_L(T)$ ning tabiati yetarlicha o'rganilmagan.

Dissertatsiya tadqiqotining 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 O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 21-noyabrda PQ-4526-sonli qarori asosida 2020-2024-yillarga mo'ljallangan ilmiy tadqiqot ishlari dasturi yuzasidan "Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarning elektron nazariyasi va uning ushbu tizimlarda dielektrik/metall hamda o'ta o'tkazuvchan fazalarning hosil bo'lishi va nanoo'lchamli ajralishini tadqiq qilishda qo'llanilishi" mavzusi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi uch o'lchamli Boze-suyuqlik nazariyasi doirasida Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasini rivojlantirish, past va yuqori haroratlarda legirlangan YuHO'O' kupratlarga London magnit maydoni kirish chuqurligining noodatiy haroratga bog'liqligini aniqlashdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

legirlangan YuHO'O' kupratlar uchun uch o'lchamli (3D) Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasining qo'llanilishini va ulardagi noodatiy yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikni tavsiflash uchun Fermi-suyuqlik (BKSh-simon) nazariyalariga nisbatan afzalliklarini o'rganish;

tadqiq etilayotgan yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarda T_c^* haroratdan past va yuqori haroratlarda, aynan $T_c^* < T < T_c$ va $0 \leq T \leq T_c^*$ ikki harorat oralig'ida uch o'lchamli Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlikning ikki xil (tirqishli va tirqishsiz) rejimlari mavjud bo'lishi imkoniyatlarini o'rganish;

yuqori haroratlarda (T_c ga yaqin) $\lambda_L(T)$ ning anomal eksponensial haroratga bog'liqligi va past haroratlarda $\lambda_L(T)$ ning xarakterli darajali bog'liqligi uch o'lchamli Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasining bevosita natijasi ekanligini aniqlash;

yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda $\lambda_L(T)$ ning noodatiy eksponensial haroratga bog'liqligiga olib keladigan o'ta oquvchan Boze-suyuqlikning uyg'onish spektridagi energetik tirqishning rolini aniqlash va ulardagi $\lambda_L(T)$ ning noodatiy darajali haroratga bog'liqligida o'ta oquvchan Boze-suyuqlik spektrida bunday tirqishning mavjud bo'lmasligi muhimligini aniqlash;

turli YuHO'O' kupratlarda London magnit maydon kirish chuqurligining nazariy hisoblangan ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ va $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) haroratga bog'liqliklarini yuqori haroratli ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ va $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) kupratli o'ta o'tkazgichlarda ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ va $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) haroratga bog'liqlik bo'yicha mavjud eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslash.

Tadqiqotning obykti sifatida yuqori haroratli legirlangan $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ kupratlari va itterbiy asosidagi kupratlarning turli namunalari $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ va $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ olingan.

Tadqiqotning predmetini kuchli o'zaro ta'sirlashuvchi elektron-fonon tizimi, yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanligi va London magnit maydon kirish chuqurligining haroratga bog'liqligi tashkil etadi.

Tadqiqotning usullari: kvant va statistik mexanika hamda qattiq jism nazariyasi, yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikning uch o'lchamli (3D) Boze-suyuqlikli modeli, raqamli usullar, kompyuter grafikasi (Mathematica, OriginPro, CorelDRAW).

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

uch o'lchamli Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasi legirlangan YuHO'O' kupratlar uchun BKSh-simon Fermi-suyuqlikli nazariyalariga nisbatan ushbu kupratli o'ta o'tkazuvchan materiallarda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikni ta'riflashda eksperimental natijalar bilan yaxshi mos kelishi ko'rsatilgan;

ikki turli xil $T_c^* < T < T_c$ va $0 \leq T \leq T_c^*$ harorat oraliqlarda yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarning uch o'lchamli Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanligining ikki xil (tirqishli va tirqishsiz) rejimlari mavjud bo'lishi mumkinligi isbotlangan;

yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda $T > T_c^*$ haroratida o'ta oquvchan Boze-suyuqligining uyg'onish spektrida energetik tirqishning ochilishi va uning ushbu materiallarda mavjud bo'lmasligi mos ravishda Gorter-Kazimirning aniqlashtirilgan formulasi bilan ta'riflangan magnit maydoni kirish chuqurligining noodatiy eksponensial va darajali ravishda haroratga bog'liqligida namoyon bo'lishi birinchi marta ko'rsatilgan;

yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda noodatiy uch o'lchamli Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanligi va yangi o'ta o'tkazuvchanlik tartiblanish parametrining haroratga kinksimon bog'liqligi T_c dan past bo'lgan T_c^* xarakterli harorat yaqinida magnit maydoni kirish chuqurligining haroratga g'ayrioddiy kinksimon bog'liqligiga sabab bo'lishi aniqlangan.

Tadqiqotning amaliy natijalari:

uch o'lchamli Boze-suyuqligining rivojlantirilgan yondashuvi doirasida magnit maydoni London kirish chuqurligining hisoblangan haroratga bog'liqligi ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ va $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) past haroratlar sohasida ham ($T < T_c^*$), va yuqori haroratlarda ham ($T > T_c^*$) turli xil YuHO'O' kupratlar uchun eksperimental ma'lumotlar bilan yaxshi mos kelishi aniqlandi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi kvant mexanikasi, kondensirlangan holat nazariy fizikasining zamonaviy usullaridan foydalanganligi va YuHO'O' kupratlarda Boze suyuqligining uch o'lchamli o'ta o'tkazuvchanligi mavjudligi aniqlanganligi, shuningdek, ulardagi magnit maydoni London kirish chuqurligining past - ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$) va yuqori - ($\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) harorat bog'liqliklari o'rnatilganligi va ularning eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslanganligi bilan ta'minlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati: Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ular YuHO‘O‘ kupratlar va boshqa turdosh materiallardagi Boze suyuqligining uch o‘lchamli o‘ta o‘tkazuvchanligi haqidagi fizik tasavvurlarni kengaytirishga yordam beradi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati YuHO‘O‘ kupratlarda energetik tirqishli va energetik tirqishsiz uch o‘lchamli Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlik haqidagi tasavvurlarni rivojlantirishdan iborat. Legirlangan YuHO‘O‘ kupratlardagi Kuper juftlarining ma’lum bir bozon tabiati, shuningdek, Boze suyuqligining o‘ta o‘tkazuvchanligi boshqa turdosh tizimlarda o‘ta o‘tkazuvchanlik va o‘ta oquvchanlikni o‘rganishda keng qo‘llanilishi mumkin.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi. Yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlik va London magnit maydoni kirish chuqurligi bo‘yicha o‘tkazilgan tadqiqotlar natijalariga asoslanib:

yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda uch o‘lchamli Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlik nazariyasini asoslashga oid natijalardan Qizil-qiya gumanitar pedagogika instituti o‘quv jarayonida “Kvant fizikasi” kursi bo‘yicha bakalavriat ta’lim yo‘nalishi doirasida foydalanilgan (Qizil-qiya gumanitar pedagogika institutining 2025-yil 14-apreldagi 126-sonli xatiga asosan). Natijalardan foydalanish talabalarning kondensirlangan holat fizikasining zamonaviy muammolari, xususan, legirlangan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarni tavsiflashda ikki rejimli Boze-suyuqlik modelini qo‘llash, noodatiy o‘ta o‘tkazgichlarga London magnit maydonining kirish chuqurligini nazariy sonli hisoblashlarni amalga oshirish haqidagi tasavvurlarini kengaytirish imkonini bergan;

olingan natijalar xorijiy tadqiqotchilar tomonidan ham foydalanilgan (xalqaro ilmiy jurnallarda havolalar: Physical Review B 109, 014512, 2024; Applied Sciences 2025, 15(4), 2225). Ilmiy natijalardan foydalanish o‘ta o‘tkazuvchan energiya kengligining umumiy simmetriyasi uchun mikroskopik hisob-kitoblarga asoslangan magnit maydoni kirish chuqurligi $\lambda(T)$ ning kompleks nazariy ifodasini aniqlashga xizmat qilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Ishning asosiy natijalari 4 ta xalqaro va respublika miqyosidagi anjumanlarda ma’ruza qilinib, muhokama etilgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha jami 7 ta ilmiy ish, ulardan 3 tasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan dissertatsiyalarning asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun tavsiya etilgan nashrlarda, shu jumladan, 2 tasi xorijiy jurnallarda chop qilingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, uch bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 121 bet.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan hamda muammoning o‘rganilganlik darajasi yoritilgan. Tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyekti,

predmeti va usullari to'g'risida ma'lumotlar keltirilgan, ilmiy yangilik va amaliy natijalar bayon etilgan. Olingan natijalarning amaliy ahamiyati asoslangan, natijalarning ishonchligi, joriy qilinishi va aprotatsiyasi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan, shuningdek, dissertatsiyaning hajmi va tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning **“Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda mavjud o'ta o'tkazuvchanlik mexanizmlari”** deb nomlangan birinchi bobida metallar va legirlangan kupratlarda o'ta o'tkazuvchanlikning kashf etilishi hamda ularning kritik haroratlari evolyutsiyasi haqida ma'lumotlar keltirilgan. O'ta o'tkazuvchan materiallarning asosiy turlari va sinflari, ularning kristall tuzilishlari, birikmalarning nomlari va o'ta o'tkazuvchan holatga o'tish haroratlari ko'rib chiqilgan. Ushbu bobda past haroratli va yuqori haroratli o'ta o'tkazgichlarning kashf etilishi bo'yicha xronologik ma'lumotlar keltirilgan, shuningdek, ularning kristall tuzilishining ba'zi fizik xususiyatlari tavsiflangan. Bu bobda ta'riflanganidek, 1911-yilda o'ta o'tkazuvchanlik hodisasi kashf etilgandan so'ng, keyingi yillar davomida yuqori haroratlarda o'ta o'tkazuvchanlik xossalari ega bo'lgan materiallarni izlash ishlari jadal olib boriladi. Lekin bizga ma'lum bo'lgan barcha metallar, ular asosidagi turli-tuman qotishmalar va kuchli legirlangan yarim o'tkazgichlar juda past temperaturalarda o'ta o'tkazuvchanlik holatiga fazaviy o'tadi. Bunday materiallar uchun $T_c = 23,2 K$ maksimal qiymat Nb_3Ge yupqa pardada olindi va barcha urinishlarga qaramay, o'tish harorati T_c ni oshirishning iloji bo'lmadi, bu qiymat 1986-yilgacha rekord bo'lib qoldi. 1986-yilda Bendorz va Myuller $La_{1.35}Ba_{0.15}CuO_4$ tizimida $35 K$ dan yuqori haroratda o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlarini aniqlaganliklarini ma'lum qilishdi. Hozirda $YBa_2Cu_3O_7$ materialida o'ta o'tkazuvchanlik holatiga o'tish maksimal harorati $T_c \approx 93 K$.

Metallar va kupratli o'ta o'tkazgichlarning xarakterli o'ta o'tkazuvchanlik xossalari aniqlashga bag'ishlangan chop etilgan eksperimental hamda nazariy ishlar tahlil qilingan. Adabiyot ma'lumotlarining tahlili shuni ko'rsatdiki, metallar va kupratlar o'rtasida o'ta o'tkazuvchanlik xususiyatlarida ko'plab farqlar mavjud, ayniqsa, zamonaviy o'ta o'tkazuvchanlik fizikasi nazariyasi doirasida. London kirish chuqurligi λ – bu magnit maydonning o'ta o'tkazgichga kirish darajasini aniqlaydigan o'ziga xos uzunlikdir. Bu kattalik o'ta o'tkazuvchan Kuper juftlari zichligining kvadrat ildiziga teskari proporsional va shuning uchun u o'ta o'tkazuvchan zaryad tashuvchilar zichligi past bo'lgan birikmalarda katta bo'ladi. Kirish chuqurligi haroratga ham bog'liq.

Oddiy o'ta o'tkazgichlarda λ ning temperaturaga bog'liqligi uchun yaxshi yondashuv Gorter-Kazimir empirik formulasi bilan beriladi

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{[1-(T/T_c)^4]^{1/2}}. \quad (1)$$

Metallda $T = 0$ da barcha Kuper elektron juftlari o'ta o'tkazuvchanlik holatida bo'ladi. Oddiy o'ta o'tkazgichlarda $T \rightarrow T_c$ bo'lganda (1) munosabat BKSh nazariyasiga muvofiq (2) ifodaga o'tadi.

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda(0)} \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{-1/2}. \quad (2)$$

Yuqori haroratli kuprat o'ta o'tkazgichlarda magnit maydonining kirish chuqurligi $\lambda_L(T)$ ning haroratga bog'liqligi uning oddiy o'ta o'tkazgichlardagi haroratga bog'liqligidan keskin farq qiladi. YuHO'O' kupratlarda magnit maydonining kirish chuqurligi ancha katta qiymatlarga ega.

Ma'lumki, Bardin-Kuper-Shriffer (BKSh) tipidagi o'ta o'tkazgich haroratga eksponensial bog'liqlik $\lambda_L(T)$ bilan xarakterlanadi. Biroq, T_c dan biroz past bo'lgan energetik tirqishsiz uyg'onish spektriga ega bo'lgan bozon (BKSh emas) o'ta o'tkazgichlar London magnit maydoni kirish chuqurligi $\lambda_L(T)$ ning haroratga darajali bog'liqligi bilan tavsiflanadi. Magnit maydonining o'ta o'tkazgichga kirish xarakterli uzunligini belgilovchi bu kattalik haroratga bog'liq, chunki u o'ta oquvchan zaryad tashuvchilarning zichligi ρ_s bilan aniqlanadi, bu zichlik harorat T ortishi bilan kamayadi. YuHO'O' kupratlarda $\lambda_L(T)$ haroratga bog'liqlik o'ta oquvchan tashuvchilar (kuper juftlari) ning bozon tabiatiga ham bog'liq, chunki bu yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan materiallar Boze-suyuqlik o'ta o'tkazuvchanlik rejimida bo'lganligi sababli, o'ziga xos haroratga bog'liqlik bozon kvazizarralarining ham tirqishsiz, ham tirqishli uyg'onish spektri bilan bog'liq.

Fermi energiyasining katta qiymatlari $\varepsilon_f > 1 \text{ eV}$ va kuchsiz elektron-fonon bog'lanishga ega bo'lgan oddiy metallarda kuchsiz bog'langan (fermion) Kuper juftlarining va Fermi-suyuqlik (BKSh) o'ta o'tkazuvchanligining hosil bo'lishi T_c da bir vaqtning o'zida sodir bo'ladi. Bu hodisalar BKSh nazariyasi tomonidan yaxshi tavsiflanadi. Biroq Fermi energiyasining kichik qiymatlari $\varepsilon_f \ll 1 \text{ eV}$ va kuchli elektron-fonon bog'lanishga ega bo'lgan legirlangan kuprat o'ta o'tkazgichlar noodatiy BKSh turidagi bo'lmagan o'ta o'tkazgichlar sinfiga kiradi. Eksperimental tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, T_c dan past qiymatlargacha bo'lgan barcha harorat oralig'ida yuqori haroratli kupratlarda haroratga bog'liqlik BKSh nazariyasining bashoratlariga mos kelmaydi. Bundan tashqari, $\lambda_L(T)$ uchun ba'zi boshqa eksperimental natijalar BKSh nazariyasi tomonidan bashorat qilingan eksponensial qonundan sezilarli darajada farq qiladi, garchi past haroratli eksperimental ma'lumotlar ushbu nazariyaga mos keladi. BKSh bo'lmagan kupratli o'ta o'tkazgichlarda $\lambda_L(T)$ ning $T \ll T_c$ past haroratlarda va T_c ga yaqin bo'lgan yuqori haroratlardagi tabiati haqidagi savollar ochiq qolmoqda.

Ushbu bobda o'ta o'tkazuvchanlikning turli sinflarga tegishli bo'lgan fenomenologik nazariyalari ham ko'rib chiqilgan. London nazariyasi, Ginzburg-Landau o'ta o'tkazuvchanlik nazariyasi va Bardin-Kuper-Shriffer mikroskopik nazariyasining (BKSh) asosiy qoidalari keltirilgan. Bundan tashqari, yuqori haroratli kuprat o'ta o'tkazgichlarda o'ta o'tkazuvchanlik mexanizmlarini tavsiflovchi turli nazariy modellar tahlil qilingan.

Dissertatsiyaning **“Legirlangan yuqori haroratli kupratli o'ta o'tkazgichlarda Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanlik”** deb nomlangan ikkinchi bobida legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda uch o'lchamli (3D) Boze-suyuqlikli o'ta o'tkazuvchanligini va bu 3D sistemalarda tortishuvchi

bozonlarning farqlanuvchi bir zarrachali va juft kondensatsiyasini tadqiqiga bag'ishlangan. Ideal Boze-gazda $T = 0$ da barcha zarralar nol impuls holatida bo'ladi, $0 < T < T_{BEK}$ harorat oralig'ida esa aksariyat zarralar hali ham eng quyi darajada bo'ladi. Kuchsiz ideal bo'lmagan Boze-gazda $T = 0$ da deyarli barcha zarralar kondensatda bo'ladi (ya'ni $N_B - N_{BO} \ll N_{BO}$ – nol impulsli zarralar soni), $T > 0$ da esa zarrachalarning ko'p qismi hali ham nol impulsli holatda joylashadi. Bogolyubov tomonidan rivojlantirilgan zarralar o'rtasida itaruvchi o'zaro ta'sirga ega kuchsiz ideal bo'lmagan Boze-gaz nazariyasi shu fikrlarga asoslangan. Kuchli o'zaro ta'sirlashuvchi Boze-zarrachalar uchun hatto $T = 0$ da ham kondensatda joylashgan zarrachalarning konsentratsiyasi nisbatan kichik bo'ladi.

Boze-zarrachalar o'rtasidagi juft o'zaro ta'sirni tavsiflovchi obrazli gamiltonian BKSh-simon bozonli analogi quyida keltirilgan (3) tenglamaga o'xshash. O'rtacha maydon yaqinlashganda o'zaro ta'sirlashuvchi Boze-gazning juft gamiltoniani quyidagicha yozilishi mumkin:

$$H_B = \sum_{\vec{k}} [\tilde{\varepsilon}(k) c_{\vec{k}}^+ c_{\vec{k}} - \Delta_B(k) (c_{\vec{k}}^+ c_{-\vec{k}}^+ + c_{-\vec{k}} c_{\vec{k}} - B_{\vec{k}}^*)], \quad (3)$$

bunda $\tilde{\varepsilon}_B(\vec{k}) = \varepsilon(k) - \mu_B + V_B(0)\rho_B + \chi_B(\vec{k})$ – kvazizarralarning Xartri-Fok energiyasi, $\varepsilon(k) = \hbar^2 k^2 / 2 m_B$, $\Delta_B(\vec{k}) = -(1/\Omega) \sum_{\vec{k}'} V_B(\vec{k} - \vec{k}') \langle c_{-\vec{k}'} c_{\vec{k}'} \rangle$ – kogerentlik parametri, $\chi_B(\vec{k}) = (1/\Omega) \sum_{\vec{k}'} V_B(\vec{k} - \vec{k}') n_B(\vec{k}')$, $n_B(\vec{k}) = \langle c_{\vec{k}}^+ c_{\vec{k}} \rangle$ – zarralar soni operatori, $\rho_B = (1/\Omega) \sum_{\vec{k}'} n_B(\vec{k}')$, μ_B – erkin bozonlarning kimyoviy potentsiali, $c_{\vec{k}}^+(c_{\vec{k}})$ – to'liq vektorli bozonlarni hosil qilish (yo'q qilish) operatori \vec{k} , $B_{\vec{k}}^* = \langle c_{\vec{k}}^+ c_{-\vec{k}}^+ \rangle$, $V_B(\vec{k} - \vec{k}')$ – bozonlararo o'zaro ta'sir potentsiali.

Gamiltonian (3) Boze operatorlari uchun Bogolyubov almashtirishlari yordamida diagonallashadi:

$$\begin{aligned} c_{\vec{k}} &= u_k \alpha_{\vec{k}} - v_k \alpha_{\vec{k}}^+, c_{\vec{k}}^+ = u_k \alpha_{\vec{k}}^+ - v_k \alpha_{-\vec{k}}, \\ c_{-\vec{k}} &= u_k \alpha_{-\vec{k}} - v_k \alpha_{\vec{k}}^+, c_{-\vec{k}}^+ = u_k \alpha_{-\vec{k}}^+ - v_k \alpha_{\vec{k}}, \end{aligned} \quad (4)$$

bunda $\alpha_{\vec{k}}$ va $\alpha_{\vec{k}}^+$ – Boze kommutatsiyasi qoidalarini qanoatlantiruvchi bozonlarni yo'q qilish va hosil qilishning yangi operatorlari $[\alpha_{\vec{k}}, \alpha_{\vec{k}}^+] = 1$ hamda $[\alpha_{\vec{k}}, \alpha_{\vec{k}'}] = [\alpha_{\vec{k}}^+, \alpha_{\vec{k}'}^+] = 0$, u_k va v_k – shartni qanoatlantiruvchi moddiy funksiyalar

$$u_k^2 - v_k^2 = 1. \quad (5)$$

(4) tenglamani (3) tenglamaga qo'yib va (5) tenglamani hisobga olib, diagonallashgan gamiltonian hosil qilamiz:

$$H_B = W_0 + \sum_{\vec{k}} E_B(\vec{k}) (\alpha_{\vec{k}}^+ \alpha_{\vec{k}} + \alpha_{-\vec{k}}^+ \alpha_{-\vec{k}}), \quad (6)$$

bunda

$$W_0 = \sum_{\vec{k}} [E_B(\vec{k}) - \tilde{\varepsilon}_B(\vec{k}) + \Delta_B(\vec{k})B_{\vec{k}}^*] \quad (7)$$

Boze-suyuqligining asosiy holat energiyasi, $E_B(\vec{k})$ esa o‘zaro ta’sirlashuvchi bozonlarning uyg‘onish spektri, u quyidagicha aniqlanadi:

$$E_B(\vec{k}) = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_B^2(\vec{k}) - \Delta_B^2(\vec{k})}, \quad (8)$$

bu esa o‘zaro ta’sirlashuvchi fermionlarning bunday uyg‘onish BKSh-simon spektridan farq qiladi.

O‘ta oquvchan Boze-suyuqligining mos parametrlari bog‘langan integral tenglamalar sistemasidan ularning o‘zaro moslashgan yechimlari yordamida aniqlanadi.

$$\Delta_B(\mathbf{k}) = -\frac{1}{\Omega} \sum_{\mathbf{k}'} V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \frac{\Delta_B(\mathbf{k}')}{2E_B(\mathbf{k}')} \coth \frac{E_B(\mathbf{k}')}{2k_B T}, \quad (9)$$

$$N_B = \sum_{\mathbf{k}} n_B(\mathbf{k}) = \sum_{\mathbf{k}} \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_B(\mathbf{k})}{2E_B(\mathbf{k})} \coth \frac{E_B(\mathbf{k})}{2k_B T} - \frac{1}{2} \right], \quad (10)$$

$$\chi_B(\mathbf{k}) = \frac{1}{\Omega} \sum_{\mathbf{k}'} V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \times \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_B(\mathbf{k}')}{2E_B(\mathbf{k}')} \coth \frac{E_B(\mathbf{k}')}{2k_B T} - \frac{1}{2} \right]. \quad (11)$$

O‘ta oquvchan Boze-suyuqligining $E_B(\mathbf{k})$ uyg‘onish spektri Fermi-suyuqligining BKSh-simon uyg‘onish spektridan keskin farq qiladi. (9), (10) va (11) tenglamalarning oddiy yechimini topish uchun $V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$ bozonlararo o‘zaro ta’sirning model potensialini sodda ajraluvchan shaklda tanlash mumkin.

$$V_B(\vec{k} - \vec{k}') = \begin{cases} V_{BR} - V_{BA} & \text{uchun } 0 \leq \varepsilon(k), \varepsilon(k') < \xi_{BA}, \\ V_{BR} & \text{uchun } \xi_{BA} \leq \varepsilon(k) \text{ yoki } \varepsilon(k') < \xi_{BR}, \\ 0 & \text{uchun } \varepsilon(k), \varepsilon(k') > \xi_{BR}, \end{cases} \quad (12)$$

bunda ξ_{BA} va ξ_{BR} – mos ravishda $V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$ ning tortishuvchi va itaruvchi qismlari uchun qirg‘ish parametrlari.

Model potensialini, (12) tenglama, kogerentlik parametri Δ_B , tortishuvchi bozonlar zichligi ρ_B va qayta normallashtirilgan kimyoviy potensial $\tilde{\mu}_B = -\mu_B + V_B(0)\rho_B + \chi_B(\mathbf{k})$ ni to‘liq hisoblash imkonini beradi hamda uch o‘lchamli (3D) o‘ta oquvchan Boze-suyuqligining uyg‘onish spektri shakli xususiyatlarini energetik tirqishli va tirqishsiz holatlar uchun bozonlararo bog‘lanish konstantasiga bog‘liq holda aniqlash imkonini beradi, $\gamma_B = \tilde{V}_B D_B \sqrt{\xi_{BA}}$ (bu yerda, $\tilde{V}_B = V_{BA} - V_{BR}[1 + V_{BR}I_R]^{-1}$, $I_R \simeq D_B[\sqrt{\xi_{BR}} - -\sqrt{\xi_{BA}}]$, $D_B = m_B^{3/2}/\sqrt{2}\pi^2\hbar^3$, $\xi_{BR} \gg \xi_{BA}$).

Ushbu model potensialidan foydalanib (9) va (10) tenglamalardagi yig'indini \mathbf{k} va \mathbf{k}' bo'yicha almashtirib ε bo'yicha integrallash orqali $E_B(\mathbf{k})$ uchun (8) ifodaga kiruvchi haroratga bog'liq $\tilde{\mu}_B$ hamda Δ_B parametrlarni aniqlash uchun quyidagi integral tenglamalarni olish mumkin:

$$\frac{2}{D_B \tilde{V}_B} = \int_0^{\xi_{BA}} \sqrt{\varepsilon} \frac{\coth \left[\frac{\sqrt{E_B(\varepsilon)}}{2k_B T} \right]}{E_B(\varepsilon)} d\varepsilon, \quad (13)$$

$$\frac{2\rho_B}{D_B} = \int_0^{\infty} \sqrt{\varepsilon} \left\{ \frac{\varepsilon + \tilde{\mu}_B}{E_B(\varepsilon)} \times \coth \left[\frac{E_B(\varepsilon)}{2k_B T} \right] - 1 \right\} d\varepsilon, \quad (14)$$

bunda

$$E_B(\varepsilon) = \sqrt{(\varepsilon + \tilde{\mu}_B)^2 - \Delta_B^2}. \quad (15)$$

Dissertatsiyaning **“Bozonli o'ta o'tkazgichga magnit maydonining kirish chuqurligi va uning past va yuqori haroratlarda haroratga bog'liqligi”** deb nomlangan uchinchi bobida o'ta o'tkazuvchanlikning ikki Boze-suyuqlikli modeli tavsiflangan. Legirlangan yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan kupratlarda magnit maydoni kirish chuqurligining xarakterli eksponensial va darajali haroratga bog'liqligi ko'rib chiqilgan. Ushbu YuHO'O kupratlarda London magnit maydoni kirish chuqurligining haroratga bog'liqligini sonli hisoblash natijalari keltirilgan va ularni mavjud eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslash amalga oshirilgan. O'ta oquvchan Boze-suyuqlikda kichik p impulsli elementar uyg'onishlar odatdagi gidrodinamik tovush to'lqinlariga mos keladi, ya'ni fononlardan iborat bo'ladi. Bunday kvazizarralarning energiyasi ularning impulsining chiziqli funksiyasidir:

$$\varepsilon = \vartheta p, \quad (16)$$

bunda, ϑ – suyuqlikdagi tovush tezligi.

Bunday o'ta oquvchan suyuqliklar nazariyasi 1940-1941-yillarda P.L. Kapitsa tomonidan suyuq geliyning o'ta oquvchanlik hodisasi kashf etilgandan so'ng L.D. Landau tomonidan ishlab chiqilgan. L.D. Landau g'alayonlanish tufayli oqayotgan suyuqlik energiyasining o'zgarishi manfiy bo'lishi kerakligini ko'rsatdi, chunki harakatlanayotgan suyuqlikning energiyasi kamayishi kerak. Bu shart quyidagi tengsizlik bilan ifodalanadi:

$$\varepsilon + p\vartheta < 0 \quad (17)$$

bunda ε – uyg'onish energiyasi, p – uyg'onish impuls, ϑ – suyuqlik oqimining tezligi.

Boze-suyuqligida bir vaqtning o'zida kvazizarralar harakatining ikki turi mavjud bo'lishi mumkin, ularning har biri o'zining effektiv massasi bilan bog'liq. Bunda bu harakatlardan biri "normal", ya'ni odatdagi yopishqoq suyuqlik harakatiga o'xshash xossalarga ega, ikkinchisi esa – o'ta oquvchan.

Mos ravishda, Boze-suyuqligining zichligi $\rho = \rho_n + \rho_s$ normal va o'ta oquvchan qismlarning yig'indisi ko'rinishida ifodalanishi mumkin, ularning har biri o'z tezligi – v_n va v_s bilan bog'langan. Boze-suyuqligida suyuqlik zichligining $T = 0$ bo'lganda normal qismi mavjud emas $\rho_n = 0$, ya'ni suyuqlik faqat o'ta oquvchan harakatni amalga oshirishga qodir. $T > 0$ da ρ_n kattalik quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$\rho_n = \frac{1}{3m_B^*} \int \left(-\frac{dn}{d\varepsilon} \right) p^2 d\varepsilon. \quad (18)$$

(16) ifodaga ko'ra, ρ_n dagi fonon hissasini aniqlashda (18) ga $\varepsilon = \vartheta p$ ni qo'yamiz. U holda quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\rho_n = -\frac{1}{3\vartheta} \int_0^\infty \frac{dn}{dp} p^2 \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3} \quad (19)$$

O'ta o'tkazgichlarning fenomenologik London nazariyasida magnit maydonning o'ta o'tkazgichga kirishining xarakterli chuqurligi temperaturaga bog'liq va quyidagicha aniqlanadi:

$$\lambda_L(T) = \sqrt{m^* c^2 / 4\pi\rho_s(T) e^{*2}} \quad (20)$$

bunda m^* – o'ta oquvchan zaryad tashuvchining effektiv massasi, c – yorug'lik tezligi, ρ_s – o'ta oquvchan zaryad tashuvchilarning zichligi, e^* – bunday zaryad tashuvchining zaryadi.

Gorter va Kazimir (GK) o'ta o'tkazuvchanlikning ikki suyuqlikli modelini va $\lambda_L(T) = \lambda_L(0)[1 - t^4]^{-1/2}$ (bu yerda $t = T/T_c$) harorat bog'liqligi uchun oddiy empirik formulani taklif qildilar, garchi bu empirik qonun mikroskopik asosga ega bo'lmagan. Ikki Boze-suyuqlikli modeliga muvofiq o'ta oquvchan Boze-suyuqlikka kondensatsiyalanadigan tortiluvchi bozonlarning zichligi quyidagicha aniqlanadi:

$$\rho_B = \rho_s(T) + \rho_n(T), \quad (21)$$

bunda ρ_s va ρ_n – mos ravishda o'ta oquvchan va Boze-suyuqligining normal komponentlarining zichligi. U holda, $T = 0$ da $\rho_s = \rho_B$ va $T = T_c$ da $\rho_n = \rho_B$ ekanligini e'tiborga olib, $0 \leq T \leq T_c$ harorat oralig'ida bozonli o'ta o'tkazgichlarda magnit maydonning kirish chuqurligi quyidagi munosabatdan aniqlanadi:

$$\lambda_L(T) = \sqrt{\frac{m_B c^2}{4\pi(\rho_B - \rho_n(T)) e^{*2}}} = \lambda_L(0) \left[1 - \frac{\rho_n(T)}{\rho_B} \right]^{-1/2}, \quad (22)$$

bunda $\lambda_L(0) = (m^*c^2/4\pi\rho_s(T)e^{*2})^{1/2}$, m_B – bozonli Kuper juftlarining massasi, $e^* = 2e$ – Kuper juftlarining zaryadi. Uch o‘lchamli Boze-suyuqligining normal komponentining zichligi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\rho_n(T) = -\frac{1}{3m_B} \int \frac{dn_B(p)}{dE_B(p)} p^2 \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3}, \quad (23)$$

bunda $n_B(p) = [\exp(E_B(p)/k_B T) - 1]^{-1}$, Boze-taqsimot funksiyasi, $E_B(p) = \sqrt{(\varepsilon(p) + \tilde{\mu}_B)^2 - \Delta_B^2}$ o‘zaro ta’sirlashuvchi bozon kvazizarralarining uyg‘onish energiyasi, $\varepsilon(p) = p^2/2m_B$ massasi m_B va impulsi p bo‘lgan erkin bozonning kinetik energiyasi.

Kuchsiz bozon o‘zaro ta’sirida ($\gamma_B \ll 1$) uch o‘lchamli o‘ta oquvchan Boze-suyuqligining uyg‘onish spektri fononnikiga yaqinlashadi va quyidagi ko‘rinishga ega bo‘ladi: $E_B(p) \approx \sqrt{2\varepsilon\Delta_B} = v_c p$, T_c dan past keng harorat $0 \leq T \leq T_c^*$ oralig‘ida $T \leq T_c^*$ da energetik tirqish $\Delta_g(T)$ ning yo‘qolishi hisobiga. U holda (23) tenglama qismlarga bo‘lib integrallashdan so‘ng quyidagi natijani beradi:

$$\begin{aligned} \rho_n(T) &= \frac{2}{3\pi^2 m_B \hbar^3 v_c(T)} \int_0^\infty \frac{p^3 dp}{\exp\left[\frac{v_c(T)p}{k_B T}\right] - 1} = \\ &= \frac{2(k_B T)^4}{3\pi^2 m_B \hbar^3 v_c^5(T)} \Gamma(4)\zeta(4), \end{aligned} \quad (24)$$

bunda $\Gamma(4) = 3!$, $\zeta(4) = \pi^4/90$, $v_c(T) = \sqrt{\Delta_B(T)/m_B}$ – o‘ta oquvchan bozon tashuvchilarning kritik tezligi. (24) ifoda $T \leq T_c^*$ bo‘lganda hosil bo‘lganligi uchun $(k_B T)^4$ ni $(k_B T_c^*)^4 T/T_c^{*4}$ ga almashtirishimiz mumkin. U holda (24) ni (22) ga qo‘yib va $\Delta_g(T)$ energetik tirqish T_c ga yaqin T_c^* haroratda yo‘qoladi deb faraz qilib, quyidagi ifodani olamiz:

$$\frac{\lambda_L(T)}{\lambda_L(0)} = \left[1 - a_L(T) \left(\frac{T}{T_c^*}\right)^4\right]^{-1/2}, \quad (25)$$

bunda, $a_L(T) = 2\pi^2(k_B T_c^*)^4/45m_B\rho_B\hbar^3v_c^5(T)$, $a_L(T < T_c^*) < 1$ va $T_c^* < T_c$. (22) munosabatdan olingan $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ uchun aniq ifodani (23) tenglamadagi integralni hisoblash orqali quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

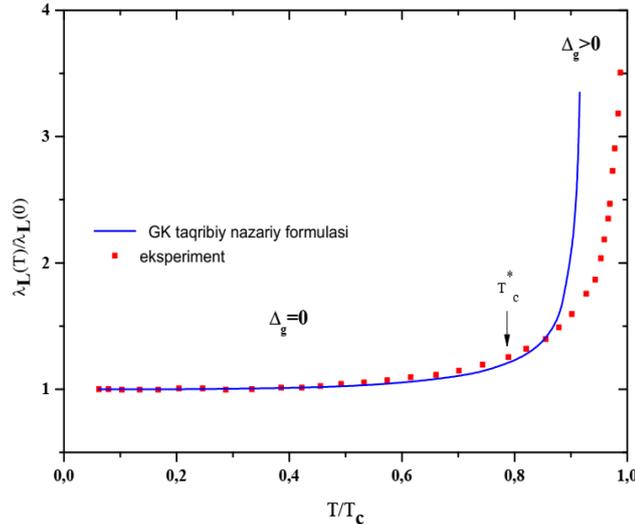
$$\frac{\lambda_L(T)}{\lambda_L(0)} = \left\{1 - \frac{\sqrt{2}m_B^{\frac{3}{2}}}{3\pi^2\rho_B\hbar^3k_B T} \times\right.$$

$$\times \int_0^{\xi_{BA}} \frac{\varepsilon^{\frac{3}{2}} \exp\left(\sqrt{(\varepsilon + \tilde{\mu}_B(T))^2 - \Delta_B^2(T)}/k_B T}\right)}{\left[\exp\left(\sqrt{(\varepsilon + \tilde{\mu}_B(T))^2 - \Delta_B^2(T)}/k_B T}\right) - 1\right]^2} d\varepsilon \left. \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (26)$$

bunda ξ_{BA} parametri o'ta oquvchan Boze-suyuqligida kondensatsiyalangan barcha Boze-zarralarni o'z ichiga olgan kondensatsiya qatlamining qalinligini tavsiflaydi.

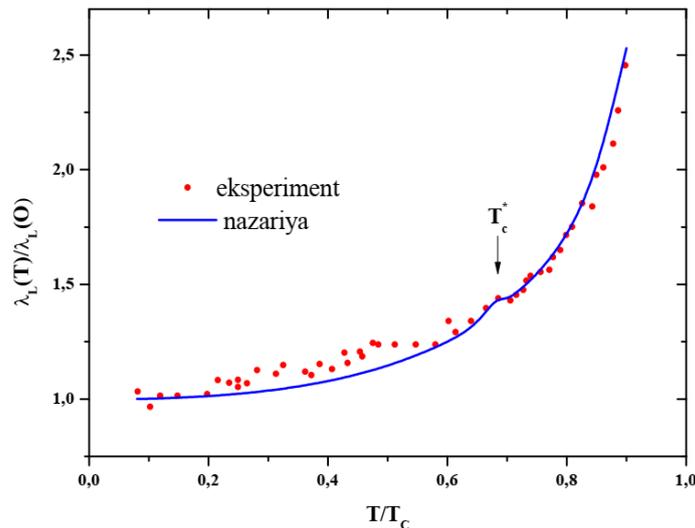
O'ta o'tkazuvchan kupratlarda magnit maydon kirish chuqurligini o'rganish bo'yicha bir qator tajribalar o'tkazildi, ular yuqori haroratli kupratlarda (BKSh-emas) $\lambda_L(T)$ noodatiy harorat bog'liqligi mavjudligini ko'rsatdi. Jumladan, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (*YBCO*) da kuzatiladigan $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ harorat bog'liqligi T_c dan past haroratgacha bo'lgan barcha haroratlar oralig'ida BKSh-simon haroratga bog'liqligi bilan mos kelmasligi eksperimental ravishda aniqlandi. *YBCO* va $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (*GBCO*) larda kuzatiladigan $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ farqlanuvchi past hamda yuqori haroratli bog'lanishlar hozirgacha tegishli nazariy izohga ega emas. 1 va 2-rasmlarda *YBCO* va *GBCO* larda tajribada kuzatilgan xarakterli $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ harorat bog'lanishlari ko'rsatilgan bo'lib, ular (25) va (26) ifodalar asosida olingan $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ harorat bog'lanishlari bilan taqqoslanadi.

1-rasmdan ko'rinib turibdiki, eksperiment ma'lumotlari T_c dan biroz past haroratlarda sekinroq o'zgaradi va $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, ning yuqori haroratdagi o'zgarishi (25) taqribiy nazariy formula bilan bashorat qilingan qiymatlardan farq qiladi.



1-rasm. Magnitlanganlikni o'lchash natijalari bo'yicha aniqlangan *GBCO* kukunsimon namunasi uchun London kirish chuqurligi $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning T/T_c (■) funksiyasi sifatida haroratga bog'liqligi. $m_B = 3.2 m_e$, $\rho_B = 3.45 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ va $T_c = 92.5 K$ bo'lganda tajriba ikkita Boze-suyuqlik (uzluksiz chiziq) modelining (25) formulasi bilan mos keladi. Strelka birinchi tartibli fazaviy o'tish $T_c^* \approx 0.85T_c$ harorati mavjudligini ko'rsatadi, undan yuqorida energetik tirqish Δ_g ning ochilishi tufayli $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning haroratga bog'liqligida chetlashish kuzatiladi

London kirish chuqurligining kuzatilgan haroratga bog‘liqligining $\lambda_L(T)/\lambda_L(0) \sim (T/T_c)^n$ (bu yerda $n \approx 4$) darajali qonundan bunday farqlanishi T_c^* dan yuqori haroratlarda o‘ta oquvchan Boze-suyuqlikning uyg‘onish spektrida $\Delta_g(T)$ energiya kengligi mavjudligining bevosita natijasidir. Shu bilan birga, aniq nazariy ifoda (26) eksperimental ma’lumotlarga yaxshi mos keladi. 1 va 2-rasmlardan ko‘rinib turibdiki, *YBCO* namunasida $T_c^* \approx 0.68T_c$ harorat yaqinida va *GBCO* namunasida $T_c^* \approx 0.85T_c$ harorat yaqinida $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ haroratga bog‘liqlikning xarakterli egilishga o‘xshash o‘zgarishi sodir bo‘ladi.

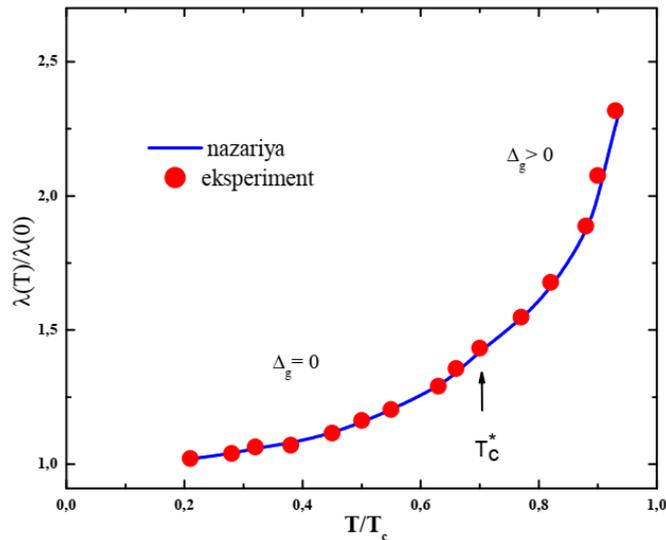


2-rasm. YBCO uchun sirt impedansi parametrlarini o‘lchashdan aniqlangan London kirish chuqurligi $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning T/T_c (●) funksiyasi sifatida haroratga bog‘liqligi. $m_B = 4.2 m_e$, $\rho_B = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $T_c^* \approx 56 \text{ K}$ va $T_c = 82 \text{ K}$ bo‘lganda tajriba ikkita Boze-suyuqlik modelining (26) formulasiga mos keladi. Strelka birinchi tartibli fazaviy o‘tish $T_c^* \approx 0.68T_c$ harorati mavjudligini ko‘rsatadi, undan yuqorida energetik tirqish Δ_g ning ochilishi tufayli $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning haroratga bog‘liqligida chetlashish kuzatiladi

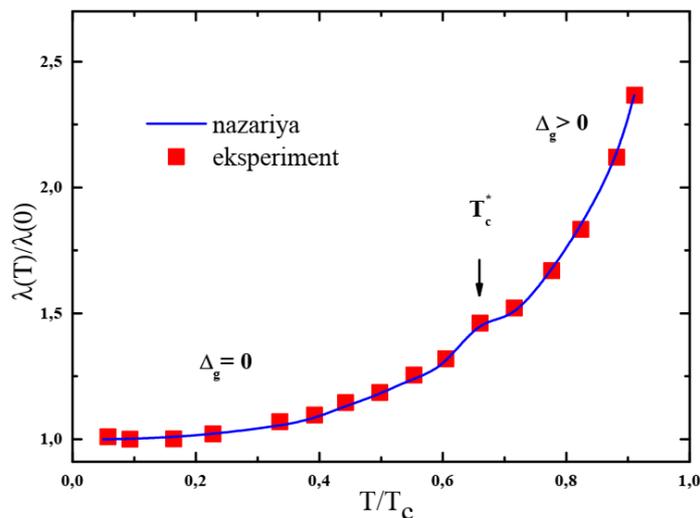
Turli (*A*, *B*, *C* va *D*) $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($T_c \approx 90 \text{ K}$) namunalarda magnit kirish chuqurligini birinchi marta Kuper va hammualliflar tomonidan bajarilgan. Kuzatilayotgan haroratga bog‘liqlik $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ushbu o‘ta o‘tkazuvchan kupratning barcha namunalari uchun taxminan bir xil va $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ BKSh-simon xarakterdan sezilarli darajada farq qiladi. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ birikmali *B* va *D* namunalari uchun $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning haroratga bog‘liqligiga oid tajriba ma’lumotlari 3- hamda 4-rasmlarda keltirilgan, bu yerda (26) ifoda yordamida olingan nazariy harorat bog‘liqliklari ushbu tajriba ma’lumotlari bilan taqqoslanadi.

3- va 4-rasmlarda ko‘rsatilganidek, *B* va *D* namunalari o‘lchangan $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning haroratga bog‘liqligi, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ birikmasi uchun, xarakterli $T_c^* \approx 65 \text{ K} \approx 0.72T_c$ (*B* namunasida) harorat yaqinida egilish xususiyatlariga ega va $T_c^* \approx 60 \text{ K} \approx 0.67T_c$ (*D* namunasida). $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ uchun olgan nazariy natijalarimiz, tajriba ma’lumotlariga mos ravishda shuni ko‘rsatadiki, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ birikmasidagi uch o‘lchamli o‘ta oquvchan Boze-suyuqligining uyg‘onish spektrida $\Delta_g(T)$

energetik tirqishning T_c^* dan yuqori haroratda paydo bo'lishi, $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning haroratga bog'liqligini T_c gacha bo'lgan oraliqda darajali qonundan eksponensial qonunga o'zgartiradi. 3 va 4-raslarda ko'rsatilganidek, $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ uchun olgan nazariy natijalarimiz $0 \leq T \leq T_c$ harorat oralig'ida tajriba ma'lumotlari bilan to'liq mos keladi.

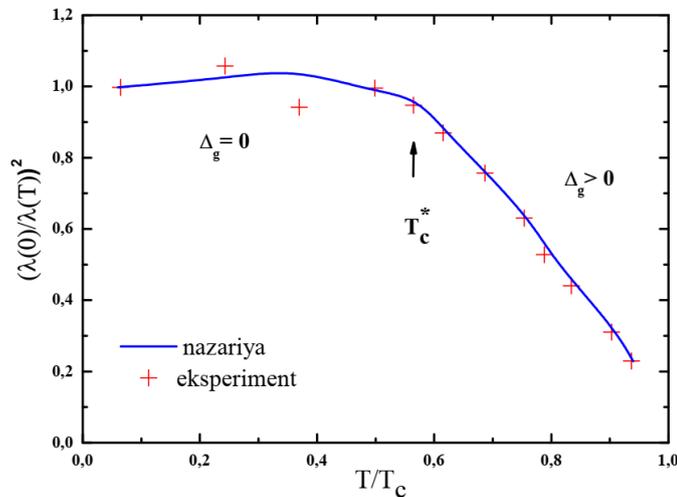


3-rasm. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ning B namunasi uchun $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning T/T_c (●) funksiyasi sifatida haroratga bog'liqligi. $m_B = 7.2m_e$, $\rho_B = 1.55 \cdot 10^{19} cm^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.5 eV$ va $T_c = 90 K$ bo'lganda tajriba ma'lumotlari (26) tenglama bilan mos keladi (uzluksiz chiziq)



4-rasm. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ning D namunasi uchun $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ ning T/T_c (■) funksiyasi sifatida haroratga bog'liqligi. $m_B = 7.2m_e$, $\rho_B = 1.35 \cdot 10^{19} cm^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.5 eV$ va $T_c = 90 K$ da tajriba ma'lumotlari (26) tenglama bilan mos keladi (uzluksiz chiziq)

B va *D* $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ namunalari uchun haroratli bog‘liqliklar $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ eksponensial hamda darajali qonunlar bilan mos ravishda $T_c^* < T < T_c$ va $0 \leq T \leq T_c^*$ harorat sohaslarida oldindan aytib o‘tilgan uch o‘lchamli Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlik nazariyasi bilan yaxshi ta‘riflanadi. (26) tenglama yordamida olingan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ uchun sonli natijalar, boshqa yuqori haroratli kupratli o‘ta o‘tkazgichlar $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ va $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ da tajribaviy o‘lchangan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning haroratga bog‘liq o‘zgarishlari bilan taqqoslanadi. $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ birikmasidagi $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ nisbatning kuzatilgan haroratga bog‘liqligi 7-rasmda keltirilgan va (26) tenglama bo‘yicha hisoblangan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ haroratga bog‘liqlik bilan taqqoslangan. $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ kattaligi past haroratlarda yuqori haroratli sohaga nisbatan sekinroq o‘zgaradi.

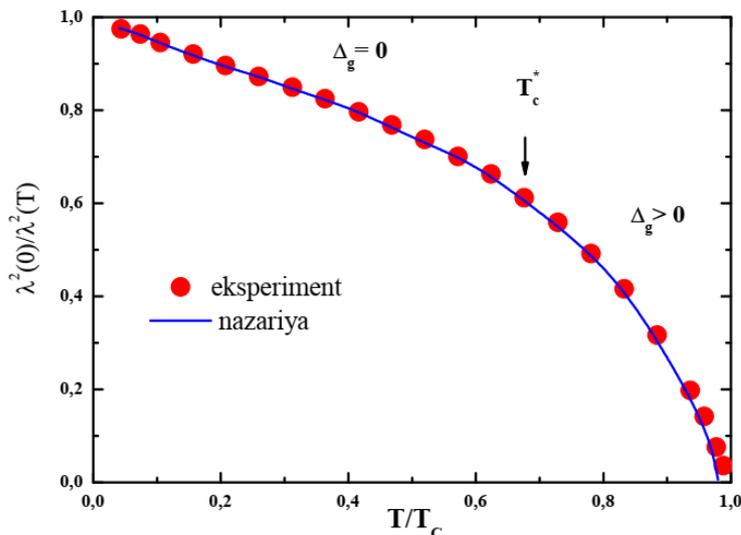


5-rasm. $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ ($\delta = 2.05$) uchun $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning T/T_c (+) funksiya sifatida haroratga bog‘liqligi. $m_B = 5.2m_e$, $\rho_B = 3.25 \cdot 10^{19} cm^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.8 eV$ va $T_c = 90 K$ da eksperiment ma’lumotlari (26) tenglama bilan mos keladi (uzluksiz chiziq)

Bu o‘zgarish T_c dan ancha pastda sodir bo‘ladi va $T_c^* \approx 0.56T_c$ da uch o‘lchamli o‘ta oquvchan Boze-suyuqlikning uyg‘onish spektridagi $\Delta_g(T)$ energiya kengligining yo‘qolishi bilan bog‘liq. 5-rasmda keltirilgan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning haroratga bog‘liqligi $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ uchun $T_c^* < T < T_c$ va $0 \leq T \leq T_c^*$ harorat oraliqlarida uch o‘lchamli Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanligining ikki xil rejimlari mavjudligining bevosita isboti bo‘lib xizmat qiladi.

6-rasmda $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ monokristallarida o‘lchangan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning past haroratli va yuqori haroratli sohalardagi haroratga bog‘liqliklari tasvirlangan. Ushbu eksperimental ma’lumotlar (26) ifoda asosida olingan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning haroratga bog‘liqligi bilan taqqoslanadi. Eksperimental kuzatilgan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ haroratga bog‘liqliklar aniq anomal xarakterga ega va BKSh nazariyasi tomonidan bashorat qilingan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ harorat xatti-harakatlaridan sezilarli darajada farq qiladi.

Shuningdek, $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ da past haroratlarda kuzatiladigan $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ chiziqli haroratga bog‘liqlik d -to‘liqlik tirqishning BKSh-simon funksiyasining chiziqli qismlarida energetik tirqish mavjud emasligini tasdiqlamasligini isbotlaymiz. Bu kuprat o‘ta o‘tkazgichda past haroratlarda $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning chiziqli (yoki egri chiziqli) xarakterining boshqa mos keluvchi tushuntirilishi $T_c^* \simeq 0.7T_c$ xarakterli haroratdan past bo‘lgan energetik tirqishsiz 3D Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanligi bilan bog‘liq.



6-rasm. $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ uchun $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ ning T/T_c (●) funksiya sifatida haroratga bog‘liqligi. $m_B = 5.2m_e$, $\rho_B = 1.8 \cdot 10^{19} cm^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.07 eV$ va $T_c = 93 K$ da eksperiment ma’lumotlari (26) tenglama bilan mos keladi (uzluksiz chiziq)

T_c^* haroratdan yuqorida uch o‘lchamli o‘ta oquvchan Boze-suyuqlikning uyg‘onish spektrida $\Delta_g(T)$ $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ energetik tirqish paydo bo‘ladi, o‘ta o‘tkazgichdagi $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ haroratga bog‘liqligi esa (26) tenglama bilan bashorat qilingan T_c gacha bo‘lgan yangi eksponensial qonuniyat bilan yaxshi ifodalangan. 5 va 6-rasmlardan ko‘rinib turibdiki, (26) tenglamaning ikkita turli xil o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ haroratga bog‘liqlik bo‘yicha eksperimental ma’lumotlarga yetarlicha yaxshi mos keladi.

Shunday qilib, (26) tenglama yordamida legirlangan yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlardagi haroratga bog‘liqlik bo‘yicha olingan nazariy natijalar turli xil eksperimental ma’lumotlar bilan yaxshi mos keladi.

XULOSA

Fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun “Yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchan kupratlarda Boze-suyuqlikli o‘ta o‘tkazuvchanlik va magnit maydon kirish chuqurligi” mavzusidagi dissertatsiya

yuzasidan olib borilgan tadqiqotlar asosida nazariy hamda amaliy ahamiyatga ega quyidagi xulosalar chiqarildi:

1. Legirlangan YuHO‘O‘ kupratlar uchun uch o‘lchamli (3D) Boze-suyuqlik o‘ta o‘tkazuvchanlik nazariyasini qo‘llash mumkinligi va ushbu materiallarda noodatiy yuqori haroratli o‘ta o‘tkazuvchanlikni ta’riflashda ushbu nazariyaning BKSh-simon o‘ta oquvchan Fermi-suyuqlik nazariyalariga nisbatan afzalliklari birinchi marta isbotlandi;

2. Yuqori haroratli kupratli o‘ta o‘tkazgichlarda 3D Boze-suyuqlik o‘ta o‘tkazuvchanlikning ikki xil (tirqishli va tirqishsiz) rejimlarining ikki xil $T_c^* < T < T_c$ va $0 \leq T \leq T_c^*$ harorat oralig‘larida mavjud bo‘lish imkoniyatlari ko‘rsatildi;

3. YuHO‘O‘ kupratlarda energetik tirqish o‘ta oquvchan Boze-suyuqlik kvazizarralarining uyg‘onish spektrida $T > T_c^*$ haroratida ochilishi va noodatiy eksponensial haroratga $\lambda_L(T)$ bog‘liqlikda namoyon bo‘lishi va bu tirqish o‘ta oquvchan Boze-suyuqlik spektrida ancha pastroq $T \leq T_c^*$ haroratlarda mavjud bo‘lmasligi $\lambda_L(T)$ ning darajali haroratga bog‘liqlikda ega ekanligi ko‘rsatilgan;

4. YuHO‘O‘ kupratlarda noodatiy 3D Boze-suyuqlik o‘ta o‘tkazuvchanligi va yangi o‘ta o‘tkazuvchanlik tartiblanish parametrining o‘ziga xos haroratga bog‘liqligi ushbu YuHO‘O‘ kupratlarda magnit maydoni kirish chuqurligi $\lambda_L(T)$ ning T_c haroratidan past T_c^* harorat yaqinida anomal kinksimon haroratga bog‘liqligiga sabab bo‘lishi ko‘rsatildi;

5. Past ($T < T_c^*$) haroratlarda va ancha yuqori ($T > T_c^*$) haroratlarda 3D Boze-suyuqlik o‘ta o‘tkazuvchanlik nazariyasi doirasida hisoblangan turli YuHO‘O‘ ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ va $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$) kupratlarda London magnit maydon kirish chuqurligining xarakterli haroratga ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ va $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) bog‘liqliklari ushbu YuHO‘O‘ materiallarda eksperimental haroratga ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ va $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) bog‘liqliklari bilan yaxshi mos kelishi aniqlandi.

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ТУРМАНОВА УЛБОСЫН МАХМУТОВНА

**БОЗЕ-ЖИДКОСТНАЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И ГЛУБИНА
ПРОНИКНОВЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВТСП 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 Узбекистан за номером B2024.2.PhD/FM1114.

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики Академия наук Республики Узбекистан.

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

Научный руководитель:

Джуманов Сафарали

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Жумаев Мустахим Рофиевич

доктор физико-математических наук, профессор

Мухтаров Адил Пазилович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ведущая организация:

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

Защита диссертации состоится «___» _____ 2025 года в _____ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 при Институте ядерной физики (Адрес: 100214, Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУ. Тел. (+99871) 289-31-41; факс (+99871) 289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрирована за № _____). Адрес: 100214, Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН РУз. Тел. (+99871) 289-31-19.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2025 г.
(протокол 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. Игамов

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В последнее время развитие теорий, описывающих механизмы сверхпроводимости в высокотемпературных сверхпроводящих купратах, их применение для развития современной науки сверхпроводящего материаловедения является одним из наиболее актуальных направлений в физике конденсированного состояния. Интерес к изучению физики высокотемпературных сверхпроводников растет, несмотря на беспрецедентное количество исследований в этой области. Это связано, в первую очередь, с тем, что высокотемпературные сверхпроводящие материалы уже широко используются в различных направлениях техники и энергетики. Однако, даже после интенсивных теоретических и экспериментальных исследований легированных ВТСП купратов, которые продолжаются уже более трех десятилетий, все еще нет полной ясности в понимании природы необычной высокотемпературной сверхпроводимости этих материалов ниже критической температуры сверхпроводящего перехода T_c в них.

В обычных сверхпроводниках, описываемых теорией Бардина–Купера–Шриффера (БКШ), температурная зависимость лондоновской глубины проникновения магнитного поля $\lambda_L(T)$ определяется наличием энергетической щели в спектре возбуждений квазичастиц. В отличие от этих БКШ сверхпроводников, в высокотемпературных купратных сверхпроводниках, поведение $\lambda_L(T)$ является аномальным, так как $\lambda_L(T)$ проявляет необычные от температуры T зависимости, природа которых остаётся еще не до конца выясненной и является предметом активных исследований. Поэтому предполагается, что в купратах необычная сверхпроводимость принципиально отличается от обычной ферми-жидкостной сверхпроводимости БКШ-типа и связана с бозе-жидкостной сверхпроводимостью, а также со сверхтекучестью необычных бозонных куперовских пар. Для ВТСП-купратов характерна необычная температурная зависимость $\lambda_L(T)$, не согласующаяся с предсказаниями теории БКШ-сверхпроводимости. Купратные ВТСП материалы имеют низкие энергии Ферми $\varepsilon_f \ll 1$ eV и характеризуются сильной электрон-фононной связью, что делает их необычными сверхпроводниками. Экспериментально установлено, что в ВТСП-купратах сверхпроводящий переход при T_c является -подобным фазовым переходом, аналогичным λ -переходу в сверхтекучем ^4He , а не БКШ-подобным фазовым переходом. Температурные зависимости $\lambda_L(T)$ в них сильно отклоняются от предсказаний БКШ-модели как при $T \ll T_c$, так и вблизи T_c . Это указывает на возможность реализации в этих ВТСП-материалах бозе-жидкостной сверхпроводимости, которая представляет большой интерес с точки зрения фундаментальной физики.

В Республике Узбекистан уделяется большое внимание развитию физики конденсированного состояния, в частности, физике наноструктурных, сверхпроводящих и полупроводниковых материалов, а также проведению

фундаментальных исследований мирового уровня в данной области. Приоритетные направления таких исследований, имеющих важное значение для научного и технологического развития страны, отражены в «Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 годы»².

Исследования в этой области соответствуют целям и задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан № УП-4512 от 1 марта 2013 года «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии», Постановлениях Президента Республики Узбекистан № 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 других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. В настоящее время исследование сверхпроводимости в высокотемпературных сверхпроводящих купратах является предметом теоретических и экспериментальных работ, проводимых многими учеными по всему миру, например, американскими (R. Prozorov, L. Krusin-Elbaum, L. Drabeck, T. Hylton, K. Char, M.R. Beasley, W.N. Hardy, D.A. Bonn, D.C. Morgan, R. Liang, K. Zhang, J. Rammer, D. Emin и др.), английскими (A.S. Alexandrov и др.), итальянскими (L. Pietronero, A. Bianconi и др.), калифорнийскими (J.R. Cooper, C.T. Chu, L.W. Zhou, B. Dunn, G. Grüner и др.), германскими (E.W. Scheidt, C. Hucho, K. Lüders, V. Müller, A. Bussmann-Holder и др.), канадскими (M. Biderang, R. Molavi, A. Damascelli, A. Kapitulnik и др.), бельгийскими (J.T. Devreese и др.), швейцарскими (S. Strässler, K.A. Müller, R. Khasanov, H. Keller, и др.), китайскими (H.C. Yang, B.D. Yao, H.E. Horng, и др.), корейскими (J. Kim, A. Akbari и др.), японскими (K. Kanoda, K. Akiba, K. Suzuki, T. Takahashi, и др.), индийскими (J.P. Carini, и др.), российскими (A.I. Larkin и др.), узбекистанскими (S. Dzhumanov, E.M. Ibragimova, U.T. Kurbanov, B.Ya. Yavidov, P.J. Baimatov, D.R. Juraev, E.X. Karimboev, O.K. Ganiev, Sh.S. Jumanov, V. Abdullaev и др.) и другими специалистами.

В результате этих исследований было показано, что в высокотемпературных купратах в двух температурных интервалах ниже T_c наблюдается отчетливо различное поведение температурной зависимости $\lambda_L(T)$. Были предложены различные теоретические модели (S. Dzhumanov, L. Pietronero, S. Strässler, C. Grimaldi и др.) для описания этих особенностей.

² Указ Президента Республики Узбекистан № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022–2026 гг.» от 28 января 2022 г.

Поскольку купратные сверхпроводники характеризуются низкими энергиями Ферми $\varepsilon_f \ll 1eV$ и сильным электрон-фононным взаимодействием, они относятся к необычным (не БКШ-подобным) сверхпроводникам. Многие эксперименты показали, что в высокотемпературных купратах температурная зависимость $\lambda_L(T)$ в широком температурном диапазоне от T_c до низких температур не согласуется с предсказаниями теории БКШ.

Однако, несмотря на огромное количество теоретических и экспериментальных исследований, поведение $\lambda_L(T)$ как при низких температурах $T \ll T_c$, так и высоких, близких к T_c , в необычных купратных сверхпроводниках остается недостаточно изученным.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденной Постановлением Президента РУз № ПП-4526 от 21 ноября 2019 года программы научно-исследовательских работ Института ядерной физики АН РУз на 2020–2024 годы по теме: «Электронная теория ВТСП-купратов и её применение в исследованиях образования и наномасштабного разделения диэлектрических/металлических и сверхпроводящих фаз в этих системах».

Целью исследования является развитие теории бозе-жидкостной сверхпроводимости и определение необычной температурной зависимости лондоновской глубины проникновения магнитного поля в легированных ВТСП-купратах при низких и высоких температурах в рамках теории трехмерной бозе-жидкости.

Задачи исследования:

изучить применимость теории трехмерной (3D) бозе-жидкостной сверхпроводимости для легированных ВТСП-купратов и ее преимущества перед ферми-жидкостными (БКШ-подобными) теориями, для описания необычной высокотемпературной сверхпроводимости в них;

изучить возможности существования двух различных (щелевого и бесщелевого) режимов трехмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости в исследованных высокотемпературных купратных сверхпроводниках ниже и выше характеристической температуры T_c^* , а именно, в двух температурных диапазонах $T_c^* < T < T_c$ и $0 \leq T \leq T_c^*$;

выяснить причины происхождения аномальной экспоненциальной температурной зависимости $\lambda_L(T)$ при высоких температурах (близких к T_c) и характерной степенной зависимости $\lambda_L(T)$ при более низких температурах, которые являются прямым следствием теории трехмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости;

выявить роль энергетической щели в спектре возбуждения сверхтекучей бозе-жидкости, приводящей к необычной экспоненциальной температурной зависимости $\lambda_L(T)$ в ВТСП-купратах и определить важность отсутствия такой щели в спектре сверхтекучей бозе-жидкости в необычной степенной температурной зависимости $\lambda_L(T)$;

сравнить теоретически рассчитанные температурные зависимости глубины лондоновских проникновений ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ и $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) в различных ВТСП-купратах с существующими экспериментальными данными по температурной зависимости ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ и $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) в высокотемпературных купратных сверхпроводниках ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ и $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$).

Объектом исследования являются легированные ВТСП купраты $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, а также различные образцы купратов на основе иттербия; $YBa_2Cu_3O_{6.95}$, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($\delta = 0.02$) и $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ ($\delta = 2.05$).

Предметом исследования являются сильно взаимодействующая электрон-фононная система, бозе-жидкостная сверхпроводимость и температурная зависимость лондоновской глубины проникновения магнитного поля в ВТСП купратах.

Методы исследований: методы квантовой и статистической механики и теории твердого тела, трехмерной (3D) бозе-жидкостной модели высокотемпературной сверхпроводимости, численные методы, компьютерная графика (Mathematica, OriginPro, CorelDRAW).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

показано, что теория трёхмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости лучше согласуется с экспериментальными данными для легированных ВТСП-купратов по сравнению с БКШ-подобными ферми-жидкостными теориями при описании природы необычной высокотемпературной сверхпроводимости в этих материалах;

доказана возможность существования двух различных (щелевого и бесщелевого) режимов трехмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости высокотемпературных купратных сверхпроводников в двух различных температурных диапазонах $T_c^* < T < T_c$ и $0 \leq T \leq T_c^*$;

впервые показано, что в ВТСП-купратах открытие энергетической щели в спектре возбуждения сверхтекучей бозе-жидкости при $T > T_c^*$ и ее исчезновение в этих материалах проявляются соответственно в необычной экспоненциальной и степенной температурной зависимости глубины проникновения магнитного поля, описанной уточненной формулой Гортера-Казимира;

установлено, что необычная трехмерная бозе-жидкостная сверхпроводимость и кинк-образная температурная зависимость нового параметра сверхпроводящего порядка в ВТСП-купратах являются ответственными за аномальную кинк-образную температурную зависимость глубины проникновения магнитного поля вблизи характерной температуры T_c^* ниже T_c .

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

в рамках развитого подхода трехмерной бозе-жидкости установлено, что рассчитанные температурные зависимости глубины лондоновского проникновения магнитного поля ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ и $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) демонстрируют хорошее согласие с экспериментальными данными для различных ВТСП-

купратов как в области низких температур ($T < T_c^*$), так и при более высоких температурах ($T > T_c^*$).

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием современных методов квантовой механики, теоретической физики конденсированного состояния и определением существования трехмерной сверхпроводимости бозе-жидкости в ВТСП-купратах, а также установлением низко- ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$) и высоко- ($\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) температурных зависимостей глубины лондоновских проникновений магнитного поля в них и сравнением их с экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов заключается в том, что они способствуют расширению физических представлений о трехмерной сверхпроводимости бозе-жидкости в ВТСП-купратах и других родственных материалах.

Практическая значимость результатов исследования заключается в развитии представлений о щелевых и бесщелевых режимах трехмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости в ВТСП-купратах. Определенная бозонная природа куперовских пар в легированных ВТСП-купратах, а также сверхпроводимость бозе-жидкости могут найти широкое применение при изучении сверхпроводимости и сверхтекучести в других родственных системах.

Внедрения результатов исследования. На основе полученных результатов по исследованию бозе-жидкостной сверхпроводимости и глубины проникновения магнитного поля в ВТСП купратах:

результаты, касающиеся обоснования теории трехмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости в легированных ВТСП-купратах были использованы в образовательном процессе Кызыл-кийского гуманитарного педагогического института БатГУ в рамках программы бакалавриата по курсу «Квантовая физика» (Письмо Кызыл-кийского гуманитарного педагогического института БатГУ № 126 от 14.04.2025 года). Использование результатов позволило расширить представления студентов о современных проблемах физики конденсированного состояния, в частности: о применении двухрежимной бозе-жидкостной модели в описании легированных высокотемпературных сверхпроводящих купратов; о выполнении теоретических численных расчетов глубины проникновения лондонского магнитного поля в необычные сверхпроводники.

Полученные результаты также были использованы зарубежными исследователями (ссылки в международных научных журналах: *Physical Review B* 109, 014512, 2024; *Applied Sciences* 2025, 15(4), 2225). Использование научных результатов позволило определить комплексную теоретическую формулировку глубины магнитного проникновения $\lambda(T)$, основанную на микроскопических расчетах для общей симметрии сверхпроводящей щели.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 4 международных и республиканских конференциях.

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, из них 2 статьи в зарубежных журналах.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Объём диссертации составляет 121 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определено соответствие проведенных исследований приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики, а также степень изученности рассматриваемой проблемы. Сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об объектах, предметах и методах исследования, изложены научная новизна и практические результаты. Обоснована практическая значимость полученных результатов, представлена информация о достоверности результатов, их внедрении и апробации, а также приведены сведения об объеме и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Существующие механизмы сверхпроводимости в купратных высокотемпературных сверхпроводниках»** представлены сведения об открытии сверхпроводимости в металлах и легированных купратах, а также прослежена эволюция их критических температур. Рассмотрены основные типы и классы сверхпроводящих материалов, их кристаллические структуры, наименования соединений и температуры перехода в сверхпроводящее состояние. В этой главе приведены хронологические данные об открытии низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников, а также описаны некоторые физические особенности их кристаллической структуры. Как описано в данной главе, после открытия явления сверхпроводимости в 1911 году все последующие годы шел интенсивный поиск таких материалов, которые бы обладали сверхпроводящими свойствами при более высоких температурах. Однако все известные металлы, разнообразные сплавы на их основе и сильно легированные полупроводники претерпевали фазовый переход в сверхпроводящее состояние при очень низких температурах. Максимальное значение $T_c = 23,2\text{ K}$ для таких материалов было получено на пленке Nb_3Ge и, несмотря на все усилия, повысить температуру перехода T_c не удавалось: эта величина оставалась рекордной до 1986 года. В 1986 году Бендорц и Мюллер сообщили, что в системе $La_{1.35}Ba_{0.15}CuO_4$ они обнаружили сверхпроводящие свойства при температуре выше 35 K . В настоящее время в материале $YBa_2Cu_3O_7$ максимальная температура перехода в сверхпроводящее состояние составляет $T_c \approx 93\text{ K}$.

Проанализированы опубликованные экспериментальные и теоретические работы, посвященные определению характерных сверхпроводящих свойств металлов и купратных сверхпроводников. Анализ литературных данных показал, что между металлами и купратами существует множество отличий в сверхпроводящих свойствах, особенно в контексте современной теории физики сверхпроводимости. Лондонская глубина проникновения λ – это характерная длина, определяющая степень проникновения магнитного поля в сверхпроводник. λ обратно пропорциональна квадратному корню из плотности сверхпроводящих куперовских пар, и потому она оказывается больше в соединениях с низкой плотностью сверхпроводящих носителей заряда. Лондонская глубина проникновения также зависит от температуры.

В обычных сверхпроводниках хорошее приближение для температурной зависимости λ дается эмпирической формулой Гортера-Казимира

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{[1-(T/T_c)^4]^{1/2}}. \quad (1)$$

В металле при $T = 0$ все куперовские пары электронов находятся в сверхпроводящем состоянии. В обычных сверхпроводниках при $T \rightarrow T_c$ соотношение (1), согласно теории БКШ, переходит в выражение (2).

$$\frac{\lambda(T)}{\lambda(0)} \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{-1/2}. \quad (2)$$

Температурная зависимость глубины проникновения магнитного поля $\lambda_L(T)$ в купратных высокотемпературных сверхпроводниках сильно отличается от её температурной зависимости в обычных сверхпроводниках. В ВТСП-купратах глубины проникновения магнитного поля имеют гораздо большие значения.

Как известно, сверхпроводник типа Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) характеризуется экспоненциальной температурной зависимостью $\lambda_L(T)$. Однако, бозонный (не БКШ) сверхпроводник с бесщелевым спектром возбуждений несколько ниже T_c характеризуются степенной температурной зависимостью лондоновской глубины проникновения $\lambda_L(T)$. Эта величина, определяющая характерную длину проникновения магнитного поля в сверхпроводник, зависит от температуры, поскольку определяется плотностью сверхтекучих носителей ρ_s , которая уменьшается с ростом температуры T . Температурная зависимость $\lambda_L(T)$ в ВТСП-купратах также зависит от бозонной природы сверхтекучих носителей (куперовских пар). Поскольку высокотемпературные сверхпроводящие материалы находятся в режиме бозе-жидкостной сверхпроводимости, характерная температурная зависимость обусловлена как наличием бесщелевого, так и щелевого спектра возбуждений бозонных квазичастиц. В обычных металлах с высокими значениями энергии Ферми $\varepsilon_f > 1 \text{ eV}$ и слабой электрон-фононной связью образование слабосвязанных (фермионных) куперовских пар и ферми-жидкостной (БКШ)

сверхпроводимости происходит одновременно при T_c . Эти явления хорошо описываются теорией БКШ. Однако, легированные купратные сверхпроводники с малыми значениями энергии Ферми $\varepsilon_f \ll 1 \text{ eV}$ и сильной электрон-фононной связью относятся к классу необычных, не БКШ-сверхпроводников. Экспериментальные исследования показали, что температурная зависимость в высокотемпературных сверхпроводящих купратах во всем диапазоне температур от T_c до низких значений не соответствует предсказаниям теории БКШ. Кроме того, некоторые другие экспериментальные результаты для $\lambda_L(T)$ существенно отличаются от экспоненциального закона, предсказываемого теорией БКШ, хотя низкотемпературные экспериментальные данные предположительно согласуются с этой теорией. Остаются открытыми вопросы о поведении $\lambda_L(T)$ при низких температурах $T \ll T_c$ и высоких температурах, близких к T_c в не БКШ купратных сверхпроводниках.

В данной главе также рассмотрены феноменологические теории сверхпроводимости, применимые к различным классам сверхпроводников. Приведены основные положения теории Лондона, теории сверхпроводимости Гинзбурга–Ландау и микроскопической теории БКШ. Кроме того, проанализированы различные теоретические модели, описывающие механизмы сверхпроводимости в купратных высокотемпературных сверхпроводниках.

Вторая глава диссертации **«Бозе-жидкостная сверхпроводимость в легированных высокотемпературных купратных сверхпроводниках»** посвящена исследованию трехмерной (3D) бозе-жидкостной сверхпроводимости в легированных ВТСП-купратах и отличительной одночастичной и парной конденсации притягивающих бозонов в этих 3D системах. В идеальном бозе-газе при $T = 0$ все частицы находятся в состоянии нулевого импульса, а в интервале температур $0 < T < T_{\text{БЭК}}$ большинство частиц все еще находятся на наинизшем уровне. В слабо неидеальном бозе-газе при $T = 0$ почти все частицы находятся в конденсате (т.е. $N_B - N_{B0} \ll N_{B0}$ – число частиц с нулевыми импульсами), а при $T > 0$ преобладающее число частиц все еще будет находиться в состоянии нулевого импульса. Теория слабо неидеального бозе-газа с отталкивательным взаимодействием между частицами, развитая Боголюбовым, основана на этих предложениях. Для сильно взаимодействующих бозе-частиц даже при $T = 0$ концентрация частиц, находящихся в конденсате, будет относительно небольшой.

Бозонный аналог БКШ-подобного гамильтониана, который описывает парное взаимодействие между бозе-частицами, аналогичен ниже приведенному уравнению (3). В приближении среднего поля парный гамильтониан взаимодействующего бозе-газа может быть записан как:

$$H_B = \sum_{\vec{k}} [\tilde{\varepsilon}(k) c_{\vec{k}}^+ c_{\vec{k}} - \Delta_B(k) (c_{\vec{k}}^+ c_{-\vec{k}}^+ + c_{-\vec{k}} c_{\vec{k}} - B_{\vec{k}}^*)], \quad (3)$$

где $\tilde{\varepsilon}_B(\vec{k}) = \varepsilon(k) - \mu_B + V_B(0)\rho_B + \chi_B(\vec{k})$ – энергия квазичастицы Хартри-Фока, $\varepsilon(k) = \hbar^2 k^2 / 2m_B$, $\Delta_B(\vec{k}) = -(1/\Omega) \sum_{\vec{k}'} V_B(\vec{k} - \vec{k}') \langle c_{-\vec{k}'} c_{\vec{k}'} \rangle$ – параметр когерентности, $\chi_B(\vec{k}) = (1/\Omega) \sum_{\vec{k}'} V_B(\vec{k} - \vec{k}') n_B(\vec{k}')$, $n_B(\vec{k}) = \langle c_{\vec{k}}^\dagger c_{\vec{k}} \rangle$ – оператор числа частиц, $\rho_B = (1/\Omega) \sum_{\vec{k}'} n_B(\vec{k}')$, μ_B – химический потенциал свободных бозонов, $c_{\vec{k}}^\dagger$ ($c_{\vec{k}}$) – оператор рождения (уничтожения) бозонов с волновым вектором \vec{k} , $B_{\vec{k}}^* = \langle c_{\vec{k}}^\dagger c_{-\vec{k}}^\dagger \rangle$, $V_B(\vec{k} - \vec{k}')$ – потенциал межбозонного взаимодействия.

Гамильтониан (3) диагонализуется с помощью преобразований Боголюбова для бозе-операторов

$$\begin{aligned} c_{\vec{k}} &= u_k \alpha_{\vec{k}} - v_k \alpha_{\vec{k}}^+, & c_{\vec{k}}^+ &= u_k \alpha_{\vec{k}}^+ - v_k \alpha_{-\vec{k}}, \\ c_{-\vec{k}} &= u_k \alpha_{-\vec{k}} - v_k \alpha_{\vec{k}}^+, & c_{-\vec{k}}^+ &= u_k \alpha_{-\vec{k}}^+ - v_k \alpha_{\vec{k}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_{\vec{k}}$ и $\alpha_{\vec{k}}^+$ – новые операторы рождения (уничтожения) бозонов, которые удовлетворяют правилам бозе-коммутиации $[\alpha_{\vec{k}}, \alpha_{\vec{k}}^+] = 1$ и $[\alpha_{\vec{k}}, \alpha_{\vec{k}}] = [\alpha_{\vec{k}}^+, \alpha_{\vec{k}}^+] = 0$, u_k и v_k – вещественные функции, удовлетворяющие условию

$$u_k^2 - v_k^2 = 1. \quad (5)$$

Подставляя уравнение (4) в уравнение (3) и учитывая уравнение (5), получим диагонализированный гамильтониан

$$H_B = W_0 + \sum_{\vec{k}} E_B(\vec{k}) (\alpha_{\vec{k}}^+ \alpha_{\vec{k}} + \alpha_{-\vec{k}}^+ \alpha_{-\vec{k}}), \quad (6)$$

где

$$W_0 = \sum_{\vec{k}} [E_B(\vec{k}) - \tilde{\varepsilon}_B(\vec{k}) + \Delta_B(\vec{k}) B_{\vec{k}}^*] \quad (7)$$

– энергия основного состояния бозе-жидкости, а $E_B(\vec{k})$ – спектр возбуждения взаимодействующих бозонов, определяемый следующим образом

$$E_B(\vec{k}) = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_B^2(\vec{k}) - \Delta_B^2(\vec{k})}, \quad (8)$$

что отличается от БКШ-подобного спектра возбуждения взаимодействующих фермионов.

Соответствующие параметры сверхтекучей бозе-жидкости определяются из связанной системы интегральных уравнений с помощью их самосогласованных решений.

$$\Delta_B(\mathbf{k}) = -\frac{1}{\Omega} \sum_{\mathbf{k}'} V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \frac{\Delta_B(\mathbf{k}')}{2E_B(\mathbf{k}')} \coth \frac{E_B(\mathbf{k}')}{2k_B T}, \quad (9)$$

$$N_B = \sum_{\mathbf{k}} n_B(\mathbf{k}) = \sum_{\mathbf{k}} \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_B(\mathbf{k})}{2E_B(\mathbf{k})} \coth \frac{E_B(\mathbf{k})}{2k_B T} - \frac{1}{2} \right], \quad (10)$$

$$\chi_B(\mathbf{k}) = \frac{1}{\Omega} \sum_{\mathbf{k}'} V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}') \times \left[\frac{\tilde{\varepsilon}_B(\mathbf{k}')}{2E_B(\mathbf{k}')} \coth \frac{E_B(\mathbf{k}')}{2k_B T} - \frac{1}{2} \right]. \quad (11)$$

Спектр возбуждения $E_B(\mathbf{k})$ сверхтекучей бозе-жидкости сильно отличается от спектра возбуждения БКШ-подобной ферми-жидкости. Для простого решения уравнений (9), (10) и (11) модельный потенциал межбозонного взаимодействия $V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$ может быть выбран в простой разделимой форме.

$$V_B(\vec{k} - \vec{k}') = \begin{cases} V_{BR} - V_{BA} & \text{для } 0 \leq \varepsilon(k), \varepsilon(k') < \xi_{BA}, \\ V_{BR} & \text{для } \xi_{BA} \leq \varepsilon(k) \text{ или } \varepsilon(k') < \xi_{BR}, \\ 0 & \text{для } \varepsilon(k), \varepsilon(k') > \xi_{BR}, \end{cases} \quad (12)$$

где ξ_{BA} и ξ_{BR} – параметры отсечки для притягивающей и отталкивающей частей $V_B(\mathbf{k} - \mathbf{k}')$, соответственно.

Модельный потенциал, уравнение (12), позволяет провести тщательный расчет параметра когерентности Δ_B , плотности ρ_B притягивающих бозонов и перенормированного химического потенциала $\tilde{\mu}_B = -\mu_B + V_B(0)\rho_B + \chi_B(\mathbf{k})$ и дает возможность определить особенности формы спектра возбуждения 3D бозе-сверхтекучей жидкости с щелями и без щелей в зависимости от константы межбозонной связи $\gamma_B = \tilde{V}_B D_B \sqrt{\xi_{BA}}$ (где $\tilde{V}_B = V_{BA} - V_{BR}[1 + V_{BR}I_R]^{-1}$, $I_R \simeq D_B[\sqrt{\xi_{BR}} - \sqrt{\xi_{BA}}]$, $D_B = m_B^{3/2}/\sqrt{2}\pi^2\hbar^3$, $\xi_{BR} \gg \xi_{BA}$).

Используя этот модельный потенциал и заменив суммирование в уравнениях (9) и (10) по \mathbf{k} и \mathbf{k}' интегрированием по ε , можно получить следующие интегральные уравнения для определения зависящих от температуры параметров $\tilde{\mu}_B$ и Δ_B , входящих в выражение (8) для $E_B(\mathbf{k})$:

$$\frac{2}{D_B \tilde{V}_B} = \int_0^{\xi_{BA}} \sqrt{\varepsilon} \frac{\coth \left[\frac{\sqrt{E_B(\varepsilon)}}{2k_B T} \right]}{E_B(\varepsilon)} d\varepsilon, \quad (13)$$

$$\frac{2\rho_B}{D_B} = \int_0^{\infty} \sqrt{\varepsilon} \left\{ \frac{\varepsilon + \tilde{\mu}_B}{E_B(\varepsilon)} \times \coth \left[\frac{E_B(\varepsilon)}{2k_B T} \right] - 1 \right\} d\varepsilon, \quad (14)$$

где

$$E_B(\varepsilon) = \sqrt{(\varepsilon + \tilde{\mu}_B)^2 - \Delta_B^2}. \quad (15)$$

В третьей главе диссертации «Глубина проникновения магнитного поля в бозонный сверхпроводник и её характерные температурные зависимости

в области низких и высоких температур» описана двух бозе-жидкостная модель сверхпроводимости. Рассмотрены характерные экспоненциальные и степенные температурные зависимости глубины проникновения магнитного поля в легированных ВТСП-купратах. Представлены результаты численных расчетов температурной зависимости лондоновской глубины проникновения магнитного поля в рассматриваемых ВТСП-купратах и проведено сравнение расчетных данных с имеющимися экспериментальными результатами. В сверхтекучей бозе-жидкости элементарные возбуждения с малыми импульсами p соответствуют обычным гидродинамическим звуковым волнам, т.е. представляют собой фононы. Энергия таких квазичастиц является линейной функцией их импульса:

$$\varepsilon = v p, \quad (16)$$

где, v — скорость звука в жидкости.

Теория таких сверхтекучих жидкостей была разработана Л.Д. Ландау в 1940-1941 гг., после открытия П.Л. Капицей явления сверхтекучести жидкого гелия. Л.Д. Ландау показал, что изменение энергии текущей жидкости в результате возникновения возбуждения должно быть отрицательным, поскольку энергия движущейся жидкости должна уменьшаться. Это условие выражается неравенством:

$$\varepsilon + p v < 0, \quad (17)$$

где ε — энергия возбуждения, p — импульс возбуждения, а v — скорость потока жидкости.

В бозе-жидкости могут существовать одновременно два типа движения квазичастиц, каждое из которых связано со своей эффективной массой. При этом одно из них является «нормальным» и проявляет свойства обычной вязкой жидкости, а другое — сверхтекучее, не обладающее вязкостью.

Соответственно, плотность бозе-жидкости может быть представлена в виде суммы нормальной и сверхтекучей компонент $\rho = \rho_n + \rho_s$, каждая из которых движется со своей скоростью — v_n и v_s . При температуре $T = 0$ нормальная компонента отсутствует $\rho_n = 0$, и жидкость способна совершать только сверхтекучее движение. При $T > 0$ величина ρ_n определяется формулой:

$$\rho_n = \frac{1}{3m_B^*} \int \left(-\frac{dn}{d\varepsilon} \right) p^2 d\varepsilon. \quad (18)$$

Согласно (16), при определении фононного вклада в ρ_n полагаем в (18) $\varepsilon = v p$. Тогда имеем

$$\rho_n = -\frac{1}{3v} \int_0^\infty \frac{dn}{dp} p^2 \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3} \quad (19)$$

В феноменологической лондоновской теории сверхпроводников характерная глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник зависит от температуры и определяется следующим образом:

$$\lambda_L(T) = \sqrt{m^*c^2/4\pi\rho_s(T)e^{*2}} \quad (20)$$

где m^* – эффективная масса сверхтекучего носителя заряда, c – скорость света, ρ_s – плотность сверхтекучих носителей, e^* – заряд такого носителя.

Гортер и Казимир (ГК) предложили двухжидкостную модель сверхпроводимости и простую эмпирическую формулу для температурной зависимости $\lambda_L(T) = \lambda_L(0)[1 - t^4]^{-1/2}$ (где $t = T/T_c$), хотя этот эмпирический закон не имел микроскопического обоснования. Согласно модели двух бозе-жидкостей, плотность притягивающихся бозонов, которые конденсируются в сверхтекучую бозе-жидкость, определяется следующим образом:

$$\rho_B = \rho_s(T) + \rho_n(T), \quad (21)$$

где ρ_s и ρ_n – плотности сверхтекучей и нормальной компонент бозе-жидкости, соответственно. Тогда, принимая во внимание, что $\rho_s = \rho_B$ при $T = 0$ и $\rho_n = \rho_B$ при $T = T_c$, глубина проникновения магнитного поля в бозонных сверхпроводниках в диапазоне температур $0 \leq T \leq T_c$ определяется из соотношения:

$$\lambda_L(T) = \sqrt{\frac{m_Bc^2}{4\pi(\rho_B - \rho_n(T))e^{*2}}} = \lambda_L(0) \left[1 - \frac{\rho_n(T)}{\rho_B}\right]^{-1/2}, \quad (22)$$

где $\lambda_L(0) = (m^*c^2/4\pi\rho_s(T)e^{*2})^{1/2}$, m_B – масса бозонных куперовских пар, $e^* = 2e$ – заряд куперовских пар.

Плотность нормальной компоненты трехмерной бозе-жидкости определяется из выражения:

$$\rho_n(T) = -\frac{1}{3m_B} \int \frac{dn_B(p)}{dE_B(p)} p^2 \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3}, \quad (23)$$

где $n_B(p) = [\exp(E_B(p)/k_B T) - 1]^{-1}$, функция Бозе-распределения, $E_B(p) = \sqrt{(\varepsilon(p) + \tilde{\mu}_B)^2 - \Delta_B^2}$ энергия возбуждения взаимодействующих бозонных квазичастиц, $\varepsilon(p) = p^2/2m_B$ кинетическая энергия свободного бозона с массой m_B и импульсом p .

При слабом межбозонном взаимодействии ($\gamma_B \ll 1$) спектр возбуждений трехмерной сверхтекучей бозе-жидкости приближается к фононному и имеет вид: $E_B(p) \approx \sqrt{2\varepsilon\Delta_B} = v_c p$ в широком диапазоне температур $0 \leq T \leq T_c^*$ ниже T_c за счет исчезновения энергетической щели $\Delta_g(T)$ при $T \leq T_c^*$. Тогда уравнение (23), после выполнения интегрирования по частям, дает выражение:

$$\begin{aligned} \rho_n(T) &= \frac{2}{3\pi^2 m_B \hbar^3 v_c(T)} \int_0^\infty \frac{p^3 dp}{\exp\left[\frac{v_c(T)p}{k_B T}\right] - 1} = \\ &= \frac{2(k_B T)^4}{3\pi^2 m_B \hbar^3 v_c^5(T)} \Gamma(4)\zeta(4), \end{aligned} \quad (24)$$

где, $\Gamma(4) = 3!$, $\zeta(4) = \pi^4/90$, $v_c(T) = \sqrt{\Delta_B(T)/m_B}$ – критическая скорость сверхтекучих бозонных носителей.

Так как выражение (24) получено при $T \leq T_c^*$, мы можем заменить $(k_B T)^4$ на $(k_B T_c^*)^4 T/T_c^{*4}$. Тогда, подставляя (24) в (22) и полагая, что энергетическая щель $\Delta_g(T)$ исчезает при температуре T_c^* , близкой к T_c , получаем выражение:

$$\frac{\lambda_L(T)}{\lambda_L(0)} = \left[1 - a_L(T) \left(\frac{T}{T_c^*} \right)^4 \right]^{-1/2}, \quad (25)$$

где $a_L(T) = 2\pi^2(k_B T_c^*)^4/45m_B\rho_B\hbar^3v_c^5(T)$, $a_L(T < T_c^*) < 1$ и $T_c^* < T_c$.

Точное выражение для $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, полученное из соотношения (22), путем вычисления интеграла в уравнении (23), может быть записано в виде:

$$\frac{\lambda_L(T)}{\lambda_L(0)} = \left\{ 1 - \frac{\sqrt{2}m_B^{\frac{3}{2}}}{3\pi^2\rho_B\hbar^3k_B T} \times \right. \\ \left. \times \int_0^{\xi_{BA}} \frac{\varepsilon^{\frac{3}{2}} \exp\left(\sqrt{(\varepsilon + \tilde{\mu}_B(T))^2 - \Delta_B^2(T)}/k_B T}\right)}{\left[\exp\left(\sqrt{(\varepsilon + \tilde{\mu}_B(T))^2 - \Delta_B^2(T)}/k_B T}\right) - 1 \right]^2} d\varepsilon \right\}^{-\frac{1}{2}}. \quad (26)$$

где параметр ξ_{BA} характеризует толщину конденсационного слоя, в который входят все бозе-частицы, сконденсированные в бозе-сверхтекучую жидкость.

Был проведен ряд экспериментов по изучению глубины магнитного проникновения в купратных сверхпроводниках, которые показали, что в высокотемпературных сверхпроводящих купратах существует необычная (не БКШ) температурная зависимость $\lambda_L(T)$. В том числе экспериментально было установлено, что наблюдаемая температурная зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($YBCO$) не может быть согласована с температурной зависимостью БКШ во всем интервале температур от T_c до низких температур. Отличительные низко- и высокотемпературные зависимости $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, наблюдаемые в $YBCO$ и $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($GBCO$), до сих пор не имеют подходящего теоретического объяснения. На рисунках 1 и 2 показаны характерные температурные зависимости $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, наблюдаемые экспериментально в $YBCO$ и $GBCO$, которые сравниваются с температурными зависимостями $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, полученными на основе выражений (25) и (26).

Как видно из рисунка 1, экспериментальные данные изменяются медленнее при температурах несколько ниже T_c , а высокотемпературное изменение $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ отклоняется от значений, предсказанной приближенной теоретической формулой (25). Такое отличие наблюдаемой температурной зависимости проведенной глубины проникновения Лондона от степенного закона $\lambda_L(T)/\lambda_L(0) \sim (T/T_c)^n$ (где $n \simeq 4$) выше T_c^* является прямым

следствием наличия энергетической щели $\Delta_g(T)$ в спектре возбуждения сверхтекучей бозе-жидкости при температурах выше T_c^* .

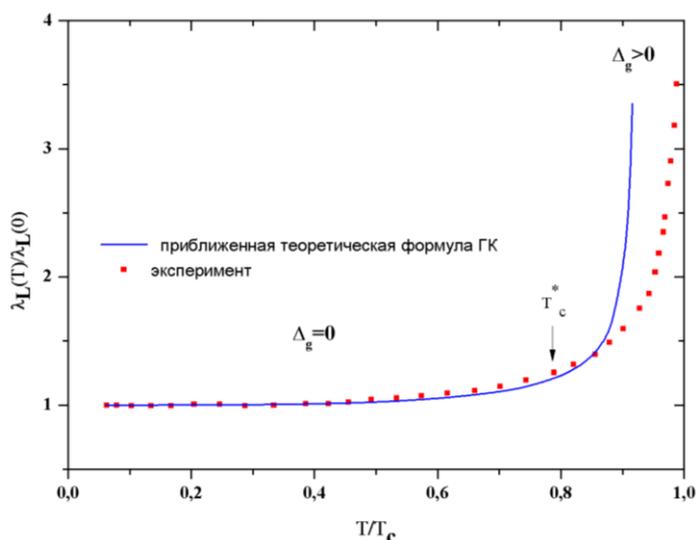


Рис. 1. Температурная зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ как функция T/T_c (■) для порошкообразного образца *GBCO*, определенная из измерений намагниченности. Эксперимент согласуется с формулой (25) двух бозе-жидкостной модели (сплошная линия) при $m_B = 3.2 m_e$, $\rho_B = 3.45 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ и $T_c = 92.5 \text{ K}$. Стрелка указывает на фазовый переход первого рода $T_c^* \approx 0.85T_c$, выше которого появляется отклонение из-за открытия энергетической щели Δ_g

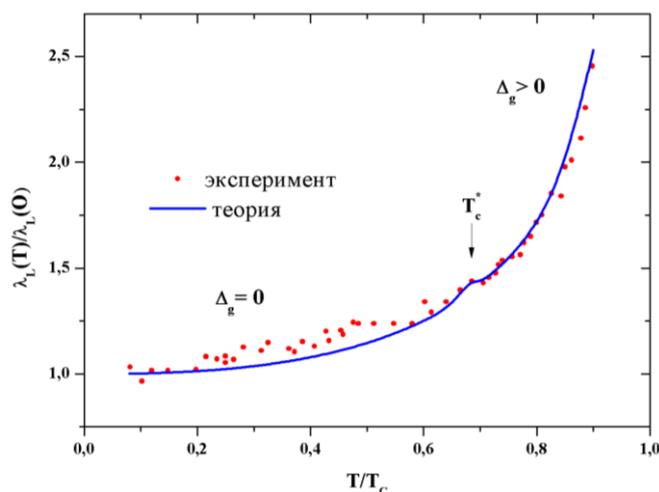


Рис. 2. Температурная зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ как функция T/T_c для *YBCO*, полученная из измерений параметров поверхностного импеданса (●). Сплошная линия – расчет по формуле (26) двух бозе-жидкостной модели при $m_B = 4.2 m_e$, $\rho_B = 1.5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $T_c^* \approx 56 \text{ K}$ и $T_c = 82 \text{ K}$. Стрелка указывает на фазовый переход при $T_c^* \approx 0.68T_c$, выше которого проявляется энергетическая щель Δ_g

В то же время точное теоретическое выражение (26) хорошо согласуется с экспериментальными данными. Как видно из рисунков 1 и 2, характерное изгиб-подобное изменение наблюдаемой температурной зависимости $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ происходит вблизи температуры $T_c^* \simeq 0.68T_c$ в образце $YBCO$ и вблизи температуры $T_c^* \simeq 0.85T_c$ в образце $GBCO$.

Первые измерения глубины магнитного проникновения на различных (А, В, С и D) образцах $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (с $T_c \simeq 90\text{ K}$) были выполнены Купером и соавторами. Наблюдаемая температурная зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ примерно одинакова для всех образцов этого купратного сверхпроводника и существенно отличается от БКШ-подобного поведения $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$. Экспериментальные данные по температурным зависимостям $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ для образцов В и D из $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ приведены на рисунках 3 и 4, где теоретические температурные зависимости, полученные с помощью выражения (26), сравниваются с этими экспериментальными данными. Как видно из рисунков 3 и 4, температурные зависимости $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, измеренные в образцах В и D $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, имеют изгибообразные особенности вблизи характерных температур $T_c^* \simeq 65\text{ K} \simeq 0.72T_c$ (в образце В) и $T_c^* \simeq 60\text{ K} \simeq 0.67T_c$ (в образце D). Наши теоретические результаты для $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, соответствующие экспериментальным данным, показывают, что открытие энергетической щели $\Delta_g(T)$ в спектре возбуждения трехмерной сверхтекучей бозе-жидкости в $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ выше T_c^* изменяет температурную зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ со степенного на экспоненциальный закон вплоть до T_c . Как видно из рисунков 3 и 4, наши теоретические результаты для $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ согласуются с экспериментальными данными во всем диапазоне температур $0 \leq T \leq T_c$.

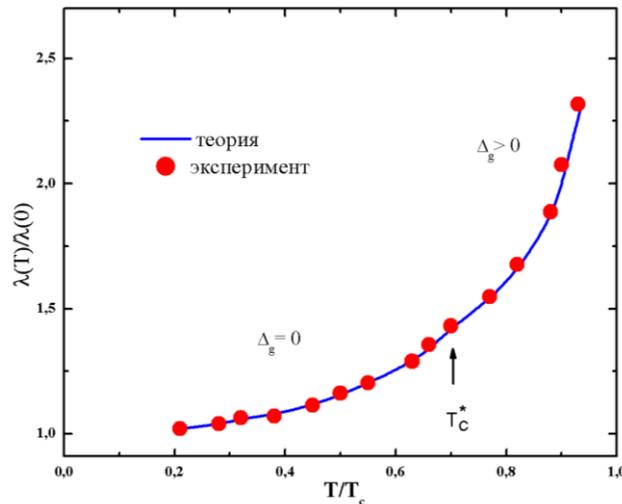


Рис. 3. Измеренная температурная зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, изображенная как функция T/T_c (●) для образца В из $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Экспериментальные данные согласуются с уравнением (26) (сплошная линия) при $m_B = 7.2m_e, \rho_B = 1.55 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}, \xi_{BA} = 0.5 \text{ eV}$ и $T_c = 90 \text{ K}$

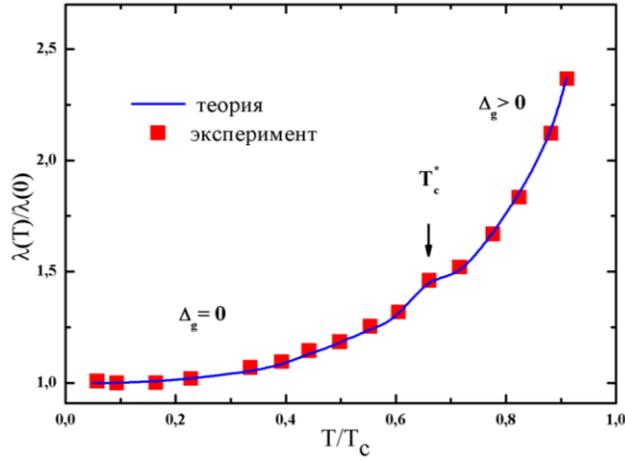


Рис. 4. Измеренная температурная зависимость $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$, изображенная как функция T/T_c (■) для образца $D YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Экспериментальные данные согласуются с уравнением (26) (сплошная линия) при $m_B = 7.2m_e$, $\rho_B = 1.35 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.5 \text{ eV}$ и $T_c = 90 \text{ K}$

Для образцов В и D $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ температурные зависимости $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ хорошо описываются экспоненциальным и степенным законами, соответственно в температурных областях $T_c^* < T < T_c$ и $0 \leq T \leq T_c^*$, предсказываемых теорией 3D бозе-жидкостной сверхпроводимости. Численные результаты для $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, полученные с помощью уравнения (26), также сравниваются с экспериментально измеренными температурными зависимостями $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ в других высокотемпературных купратных сверхпроводниках $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ и $YBa_2Cu_3O_{6.95}$. Наблюдаемая температурная зависимость отношения $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ в соединении $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ представлена на рисунке 5 и сопоставляется с температурной зависимостью $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, рассчитанной по уравнению (26). Величина $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ при низких температурах изменяется медленнее, чем в высокотемпературной области, что указывает на заметное изменение наблюдаемого наклона кривой вблизи характерной температуры $T_c^* \approx 0.56T_c$. Это изменение происходит значительно ниже T_c и связано с исчезновением энергетической щели $\Delta_g(T)$ в спектре возбуждений трехмерной сверхтекучей бозе-жидкости при $T = T_c^*$. Наблюдаемая температурная зависимость $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, представленная на рисунке 5, служит прямым доказательством существования двух различных режимов трехмерной бозе-жидкостной сверхпроводимости в температурных областях $T_c^* < T < T_c$ и $0 \leq T \leq T_c^*$ для $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$. На рисунке 6 показаны температурные зависимости $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, измеренные в монокристаллах $YBa_2Cu_3O_{6.95}$, в низкотемпературной и высокотемпературной областях. Эти экспериментальные данные сравниваются с температурными зависимостями $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, полученными на основе выражения (26). Экспериментально наблюдаемые температурные зависимости $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ имеют явно

аномальный характер и существенно отличаются от температурного поведения $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, предсказанного теорией БКШ.

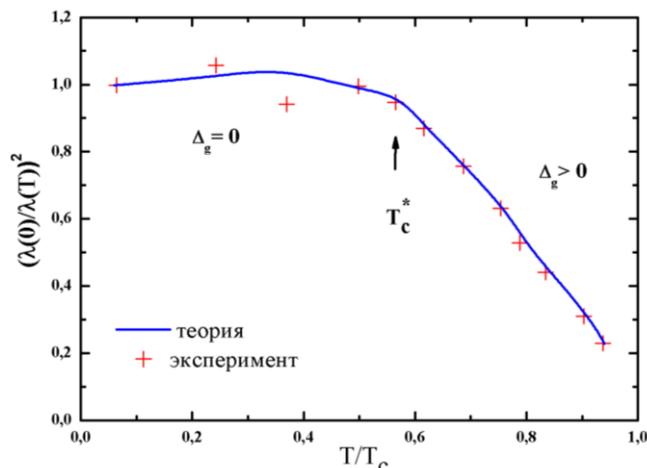


Рис. 5. Измеренная температурная зависимость $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ как функция T/T_c (+) для $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ ($\delta = 2.05$). Экспериментальные данные согласуются с уравнением (26) (сплошная линия) при $m_B = 5.2m_e$, $\rho_B = 3.25 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.8 \text{ eV}$ и $T_c = 90 \text{ K}$

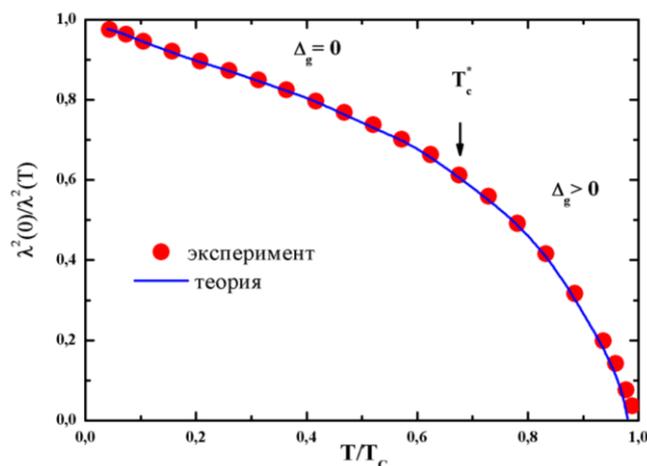


Рис. 6. Измеренная температурная зависимость $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, как функция T/T_c (●) для кристалла $YBa_2Cu_3O_{6.95}$. Экспериментальные данные согласуются с уравнением (26) (сплошная линия) при $m_B = 5.2m_e$, $\rho_B = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\xi_{BA} = 0.07 \text{ eV}$ и $T_c = 93 \text{ K}$

Нами также доказано, что линейная температурная зависимость $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$, наблюдаемая в $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ при низких температурах, вовсе не является подтверждением отсутствием энергетической щели в линейных участках БКШ-подобной функции d -волновой щели. Другое подходящее объяснение линейного (криволинейного) поведения $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ в этом купратном сверхпроводнике при низких температурах связано с бесщелевой 3D бозе-жидкостной сверхпроводимостью ниже характерной температуры $T_c^* \simeq 0.7T_c$. Выше T_c^* в спектре возбуждения трехмерной сверхтекучей бозе-жидкости в $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ появляется энергетическая щель $\Delta_g(T)$, а температурная

зависимость $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ в этом сверхпроводнике хорошо описана новым экспоненциальным законом вплоть до T_c , предсказанным уравнением (26). Как видно из рисунков 5 и 6, соответствие уравнение (26) экспериментальным данным по температурным зависимостям $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ в двух различных купратных сверхпроводниках достаточно хорошее.

Таким образом, полученные нами теоретические результаты по температурным зависимостям глубины магнитного проникновения в легированных ВТСП купратах с помощью уравнения (26) находятся в хорошем согласии с различными экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований по диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам на тему «**Бозе-жидкостная сверхпроводимость и глубина проникновения магнитного поля в ВТСП купратах**» представлены следующие выводы:

1. Впервые доказана применимость теории трехмерной (3D) бозе-жидкостной сверхпроводимости для легированных ВТСП-купратов и преимущества этой теории перед БКШ-подобными теориями сверхтекучей ферми-жидкости при описании необычной высокотемпературной сверхпроводимости в этих материалах.

2. Показана возможность существования двух различных (щелевого и бесщелевого) режимов 3D бозе-жидкостной сверхпроводимости в высокотемпературных купратных сверхпроводниках в двух различных температурных диапазонах $T_c^* < T < T_c$ и $0 \leq T \leq T_c^*$.

3. Продемонстрировано, что в ВТСП-купратах энергетическая щель открывается в спектре возбуждений квазичастиц сверхтекучей бозе-жидкости при $T > T_c^*$, что проявляется в необычной экспоненциальной температурной зависимости $\lambda_L(T)$. При более низких температурах $T \leq T_c^*$ эта щель исчезает, и $\lambda_L(T)$ приобретает степенной характер температурной зависимости.

4. Показано, что необычная трехмерная бозе-жидкостная сверхпроводимость и характерная температурная зависимость нового параметра сверхпроводящего порядка в ВТСП-купратах ответственны за аномальную кинк-образную температурную зависимость глубины проникновения магнитного поля $\lambda_L(T)$ в этих материалах вблизи характерной температуры T_c^* ниже T_c .

5. Обнаружено, что характерные температурные зависимости глубины лондоновских проникновений ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ и $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) в различных ВТСП-купратах ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ и $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$), рассчитанные в рамках теории 3D бозе-жидкостной сверхпроводимости при низких температурах ($T < T_c^*$) и более высоких температурах ($T > T_c^*$), находятся в хорошем согласии с экспериментальными температурными зависимостями $\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ и $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$ в этих ВТСП-материалах.

**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

TURMANOVA ULBOSIN MAKHMUTOVNA

**BOSE LIQUID SUPERCONDUCTIVITY AND THE PENETRATION
DEPTH OF THE MAGNETIC FIELD IN HTSC 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 physics-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/FM1114.

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” information and educational portal at www.ziyonet.uz.

Scientific supervisor: **Dzhumanov Safarali**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Jumaev Mustaqim Rofiyevich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Muxtarov Adil Pazilovich
Kandidate of Physical and Mathematical Sciences,
senior researcher

Leading organization: **Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov**

The defense of the dissertation will be held on “_____” _____ 2025 at _____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.02/30.12.2019.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics (Address: INP, Ulugbek settlement, 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 in the Information Resource Center of Institute of Nuclear Physics (registered under No. _____) Address: INP, Ulugbek settlement, 100124 Tashkent city. tel. (+99871)289-31-19.

The abstract of dissertation was distributed on “_____” _____ 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 award of scientific Degrees, D.Ph-M.S., Senior researcher

INTRODUCTION (annotation of PhD dissertation)

The aim of the research work is to develop the theory of Bose-liquid superconductivity and determine the unusual temperature dependence of the London penetration depth of the magnetic field in doped HTSC cuprates at low and high temperatures within the framework of the three-dimensional Bose-liquid theory.

The tasks of the research work:

to investigate the applicability of the three-dimensional (3D) Bose-liquid superconductivity theory to doped HTSC cuprates and its advantages over Fermi-liquid (BCS-like) theories for describing the unusual high-temperature superconductivity in them;

to investigate the possibility of two different modes (gap and gapless) of three-dimensional Bose-liquid superconductivity in the investigated high-temperature cuprate superconductors below and above the characteristic temperature T_c^* , namely, in two temperature ranges $T_c^* < T < T_c$ and $0 \leq T \leq T_c^*$;

to determine the causes of the anomalous exponential temperature dependence of $\lambda_L(T)$ at high temperatures (close to T_c) and the characteristic power dependence of $\lambda_L(T)$ at lower temperatures are a direct consequence of the theory of three-dimensional Bose-liquid superconductivity;

to reveal the role of the energy gap in the excitation spectrum of superfluid Bose-liquid condensate, leading to an unusual exponential temperature dependence $\lambda_L(T)$ in HTSC cuprates and determine the importance of the absence of such a gap in the spectrum of superfluid Bose-liquid in the unusual power-law temperature dependence $\lambda_L(T)$ in them;

to compare theoretically calculated temperature dependencies of London penetration depths ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ and $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) in various HTSC cuprates with existing experimental data on the temperature dependence ($\lambda_L(T)/\lambda_L(0)$ and $\lambda_L^2(0)/\lambda_L^2(T)$) in high-temperature cuprate superconductors ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$, $YBa_2Cu_3O_{6.95}$ and $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$).

The objects of the research work are doped HTSC cuprates $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ and various samples of cuprates based on ytterbium $YBa_2Cu_3O_{6.95}$, $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ($\delta = 0.02$) and $YBa_2Cu_3O_{9-\delta}$ ($\delta = 2.05$).

The subject of the research work are the strongly interacting electron-phonon system, Bose-liquid superconductivity, and the temperature dependence of the London magnetic field penetration depth in HTSC cuprates.

Scientific novelty of the research work:

it has been shown that theories of three-dimensional Bose-liquid superconductivity are better suited to doped HTSC cuprates than BCS-like Fermi-liquid theories in describing high-temperature superconductivity in these cuprate superconducting materials;

it has been proven the possibility of two different modes (gap and gapless) of three-dimensional Bose-liquid superconductivity in high-temperature cuprate superconductors in two different temperature ranges, $T_c^* < T < T_c$ and $0 \leq T \leq T_c^*$;

it has been shown for the first time that in HTSC cuprates, the opening of the energy gap in the excitation spectrum of the superfluid Bose liquid at $T > T_c^*$ and its vanishing in these materials are manifested, respectively, in the unusual exponential and power-law temperature dependence of the magnetic field penetration depth, described by the refined Gorter-Casimir formula;

it has been established that unusual three-dimensional Bose-liquid superconductivity and the kink-like temperature dependence of a new parameter of superconducting order in HTSC cuprates are responsible for the anomalous kink-like temperature dependence of the magnetic field penetration depth $\lambda_L(T)$ in them near the characteristic temperature T_c^* below T_c .

Implementation of the research results: based on the obtained results from the study of Bose-liquid superconductivity and magnetic field penetration depth in HTSC cuprates:

the results related to the substantiation of the theory of three-dimensional Bose-liquid superconductivity in doped HTSC cuprates were used in the educational process of the Kyzyl-Kiya Humanitarian Pedagogical Institute of BatSU within the framework of the bachelor's program in the course «Quantum Physics» (Letter of the Kyzyl-Kiya Humanitarian Pedagogical Institute of BatSU No. 126 dated 14.04.2025). The use of the results made it possible to expand students' understanding of modern problems of condensed state physics, in particular: the application of the two-mode Bose-liquid model in the description of doped high-temperature superconducting cuprates; the implementation of theoretical numerical calculations of the penetration depth of the London magnetic field into unusual superconductors.

the obtained results were also used by foreign researchers (references in international scientific journals: Physical Review B 109, 014512, 2024; Applied Sciences 2025, 15(4), 2225). The use of scientific results made it possible to determine a comprehensive theoretical formulation of the magnetic penetration depth $\lambda(T)$, based on microscopic calculations for the overall symmetry of the superconducting gap.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a list of references, and appendices. The volume of the dissertation is 121 pages.

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

I bo'lim (Часть I; Part I)

1. Dzhumanov S., Turmanova U.M., Kurbanov U.T. Two distinctive temperature dependences of the London penetration depth in high- T_c cuprate superconductors as support for the theory of Bose-liquid superconductivity // Physics Letters A. – Elsevier (Netherlands), 2022 – Vol. 452. – id. 128447 (№3. Scopus; IF=2.6).
2. Dzhumanov S., Turmanova U.M., Mayinova U.K. Unusual temperature dependence of the magnetic field penetration depth in the high-temperature superconductors $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$: Evidence for Bose-liquid superconductivity // Доклады Академии наук Республики Узбекистан: Математика технические науки естествознание. – Toshkent: “FAN” nashriyoti, 2024. – №1. – С. 27-32 (01.00.00. №7)
3. Dzhumanov S., Turmanova U.M., Kurbanov U.T., Mayinova U.K. Distinctive low- and high-temperature dependences of the magnetic penetration depth in organic and high- T_c cuprate superconductors: Evidence for the gapped and gapless Bose-liquid superconductivity” // Fizyka Nyzkykh Temperatur / Low Temperature Physics. – American Institute of Physics (USA), 2024. – Vol. 50. – No. 11. – pp. 1119–1127 (№3. Scopus; IF=0,9)

II bo'lim (Часть II; Part II)

4. Dzhumanov S., Turmanova U.M., Kurbanov U.T. Two distinctive temperature dependences of the London penetration depth in high- T_c cuprate superconductors as support for the theory of Bose-liquid superconductivity // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг III Республика илмий анжумани (ЁОФТРИА- III), 2023 йил 15 июнь. – Тошкент: Ўзбекистон Миллий Университети ҳузуридаги яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий-тадқиқот институти, 2023. – С. 271-272.
5. Dzhumanov S., Turmanova U.M., Kurbanov U.T. The magnetic field penetration depth in high- T_c cuprate superconductors $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$: support for the theory of Bose-liquid superconductivity // Материалы международной научно-практической конференции «Физика и экология» 15-16 сентября 2023. – Нукус: Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза, 2023. – С. 99-102.
6. Dzhumanov S., Turmanova U.M. Temperature dependences of the London penetration depth in unconventional superconductors as evidence for the theory of Bose-liquid superconductivity // Конференция молодых физиков института ядерной физики «Ядерная физика и ядерные технологии»

Сборник докладов. 9 октября, 2023. – ИЯФ АН РУз, пос. Улугбек, Ташкент, 2023 – С. 54-56.

7. Dzhumanov S., Turmanova U.M., Kurbanov U.T., Mayinova U.K. Distinctive low- and high- temperature dependences of the magnetic penetration depth in organic and high- T_c cuprate superconductors: evidence for the gapped and gapless Bose-liquid superconductivity” // V International Scientific Forum “Nuclear Science And Technologies”, October 7-11, 2024. Abstracts. – Almaty (Kazakhstan): Institute of Nuclear Physics, 2024. – pp. 124.