

Hg-1201 KUPRATIDA POLARON MASSASINING KISLOROD MIQDORIGA BOG'LIQLIGI

Saburova Gulnoza Gulumbaevna – *tayanch doktorant*

g.saburova@ndpi.uz

Yavidov Bahram Yangibayevich – *fizika-matematika fanlari doktori (DSc)*

bakhrom.yavidov@ndpi.uz

Ajiniyoz nomidagi Nukus davlat pedagogika instituti

ЗАВИСИМОСТЬ МАССЫ ПОЛЯРОНА ОТ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В КУПРАТЕ Hg-1201

Сабурова Гульноза Gulumbaevna – *базовый докторант*

Явидов Бахрам Янгibaевич – *доктор физико-математических наук (DSc)*

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

DEPENDENCE OF POLARON MASS ON OXYGEN CONTENT IN Hg-1201 CUPRATE

Saburova Gulnoza Gulumbaevna – *doctoral student*

Yavidov Bahram Yangibayevich – *Doctor of Physical and Mathematical Sciences (DSc)*

Nukus State Pedagogical Institute named after Ajinyaz

Tayanch so'zlar: Hg-1201, (bi)polaron, o'ta o'tkazuvchanlik, Boze-Eynshteyn kondensatsiyasi, massa.

Rezyume. Ushbu maqolada Hg-1201 kupratida polaron massasining kislorod miqdoriga bog'liqligi qaralgan. Tadqiqot modeli sifatida yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlikning bipolaron modeli tanlangan. Hg-1201 kuprati o'ta o'tkazuvchanlik kritik harorati, kristall panjara oddiy katagi hajmi va zaryad tashuvchisi massasi anizotropiya koeffitsiyentining tajribadan kislorod miqdoriga qanday bog'liqligi inobatga olinib, polaron massasining kislorod miqdoriga bog'liqligi topilgan. Nazariy yo'l bilan topilgan polaron massa qiymatlari tajriba bilan taqqoslangan. Kislorodning optimal miqdorida nazariya tajriba bilan uyg'un ekanligi ko'rsatilgan.

Ключевые слова: Hg-1201, (би)полярон, сверхпроводимость, Бозе-Эйнштейновская конденсация, масса.

Резюме. В данной работе рассмотрено зависимость массы полярона от содержания кислорода в купрате Hg-1201. В качестве модели исследования выбрана биполяронная модель высокотемпературной сверхпроводимости. С учетом зависимости критической температуры сверхпроводимости, объема элементарной ячейки кристаллической решетки и коэффициента анизотропии массы носителя заряда от содержания кислорода в купрате Hg-1201, полученной экспериментальным путем, установлена зависимость массы полярона от содержания кислорода. Теоретически полученные значения массы полярона сравнено с экспериментальными. Показано, что теория согласуется с экспериментом при оптимальном содержании кислорода.

Key words: Hg-1201, (bi)polaron, superconductivity, Bose-Einstein condensation, mass.

Summary. In this paper, the dependence of the polaron mass on the oxygen content in Hg-1201 cuprate is studied. The bipolaron model of high-temperature superconductivity is chosen as the research model. Taking into account the dependence of the superconducting critical temperature, the size of the unit cell of the crystal lattice, and the anisotropy coefficient of the charge carrier mass on the oxygen content in Hg-1201 cuprate from the experiment, the dependence of the polaron mass on the oxygen content is found. The theoretically obtained polaron mass values are compared with the experiment. It is shown that the theory is consistent with the experiment at the optimal oxygen content.

Kirish. Simob (Hg) asosli yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchan ($O'O'$) ($YuHO'O'$) kupratlar $HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2+\delta}$ yoki qisqa tarzda $Hg-12(n-1)n$ kimyoviy formula orqali ifodalanadi. Bu $YuHO'O'$ oilasiga mansub $HgBa_2CuO_{4+\delta}$ ($n=1$ dagi Hg-1201), $HgBa_2CaCu_2O_{6+\delta}$ ($n=2$ dagi Hg-12012) va $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ ($n=3$ dagi Hg-12023) kupratlar so'ngi davrda faol tadqiqot ob'yektiga aylanagan. Sababi, oila a'zosi Hg-1223 kuprati odatdagi atmosfera bosimi ostida eng katta $O'O'$ kritik harorati (KH) $T_c=133$ K, 22 GPa gidrostatik bosim ostida esa $T_c=153$ K ga teng $O'O'$ KH bilan mashhur [1]. Bu KH hozirgi vaqtda kupratlar orasida eng yuqori KH o'laroq saqlanib qolmoqda. Oila tarkibidagi 1-birikma, $HgBa_2CuO_{4+\delta}$ yoki Hg-1201 kuprati, eng sodd kristall tuzulish va nisbatan past $O'O'$ KH $T_c=97$ K ga ega.

So'ngi davrda, kupratlar nazariya va tajriba orqali keng qamrovli tadqiq etildi. Bunday tadqiqotlar ilmiy markazlarda hamon davom etmoqda. Ammo quyidagilarni aniq aytish mumkin: (i) kupratlar $O'O'$ yagona tamoyil negizida tushuntiruvchi nazariya mavjud emas [2] va (ii) kupratlarning $YuHO'O'$ muammosi hamon o'z yechimini kutmoqda [3]. Xuddi shunday, Hg-asosli $YuHO'O'$ larning

odatiy va $O'O'$ xossalari mavjud an'anaviy nazariyalar tushuntirishi to'liq emas. Bunga misol qilib, Hg-asosli $YuHO'O'$ larda zaryad tashuvchisi massasi muammosini keltirish mumkin. Boshqa kupratlardagi kabi, Hg-asosli $YuHO'O'$ larda ham, xususan, Hg-1201 kupratida zaryad tashuvchisi massasi masalasi zamonaviy qattiq jismlar fizikasi oldida o'z yechimini topishi kerak bo'lgan dolzarb masala hisoblanadi. Atab aytganda, Hg-1201 kupratida zaryad tashuvchi massasining kislorod miqdoriga qanday bog'liq bo'lishi hali ham nazariy o'rganilmay kelayotgan masala hisoblanadi. Massa zarraning inertligini, uning dinamikasini aniqlab beruvchi hamda odatiy va $O'O'$ holatlarni birgalikda tavsiflovchi eng asosiy fizikaviy miqdor hisoblanadi. Shu sabab, Hg-1201 kupratida zaryad tashuvchisi massasining kislorod miqdoriga bog'liqligini o'rganish, nainki $YuHO'O'$ fizikasiga, balki quyuqlashgan muhitlar fizikasi rivojiga qo'shiladigan salmoqli ulush hisoblanadi. Mazkur maqola aynan shu masala yechimiga bag'ishlangan.

Nazariy model. Muammoni o'rganishda biz $YuHO'O'$ ning bipolaron modelidan foydalanamiz. Bu modelga ko'ra, mo'tadil haroratlarda $YuHO'O'$ kupratlarida zaryad

tashuvchisi o'zini polaron kabi tutadi, yetarlicha past haroratlarda esa polaronlar juftlashib qo'shtugunli bipolaronlarni hosil qiladi. Kuprat birikmasining O'O' holati qo'shtugunli bipolaronlardan iborat suyuqlikning o'taoquvchanligi (O'Oq) tufayli yuzaga keladi [4]. Biz, yetarlicha aniqlikda, Hg-1201 kuprati O'O' KH, T_c , ni Hg-1201 birikma kristall panjarasi tarkibidagi qo'shtugunli bipolaronlardan iborat suyuqlik O'Oq ning KH, T_s , ga teng deb qabul qilamiz. Qo'shtugunli bipolaronlar suyuqligi O'Oq ning KH, T_s , esa shu bipolaronlar ideal boze-gazi Boze-Eynshtein kondensatsiyasi (BEK) harorati, T_{BEC} , ga teng deb qabul qilamiz. Ya'ni

$$T_c = T_s = T_{BEC} = \frac{3.31\hbar^2 n_{Bp}^{2/3}}{k_B m_{Bp}} \quad (1)$$

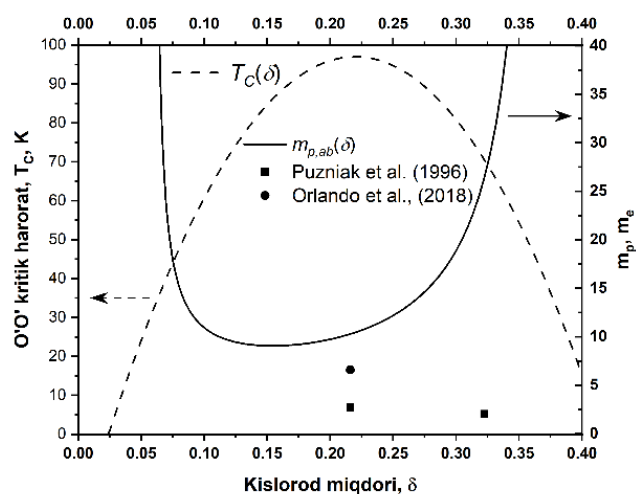
bu yerda $\hbar(k_B)$ Plank (Boltzmann) doimiysi, m_{Bp} – qo'shtugunli bipolaron massasi bo'lib, ikkita polaron massasiga teng: $m_{Bp} = 2m_p$, n_{Bp} – qo'shtugunli bipolaronlar zichligi. Boze-gazning ideallashtirilishi bizning hisob-kitoblarimizga ko'pi bilan 5% xatolik kiritishi mumkin [5]. Biparonlar zichligi $n_{Bp} = p/2V_a$ munosabat yordamida Hg-1201 birikmasi kristall panjarasining bitta oddiy katagiga mos keluvchi kovaklar soni p va shu oddiy katak hajmi V_a orqali ifodalanadi. Tajribalardan Hg-1201 kuprati O'O' kritik haroratining, kristall panjarasi oddiy katagi hajmining va kovaklar miqdorining kislorod miqdoriga sifat va miqdoriy bog'liqlik ma'lum. U holda, yuqoridagi formulalar yordamida biz polaron massasini hisoblashimiz mumkin. Hisoblangan polaron massasi hajmiy polaron yoki uch o'lchamli (3D) polaron massasi deb qaraladi. 3D polaron massasini Hg-1201 kuprati kristall panjarasi anizotrop tuzulishini e'tiborga olib, massaning kristall panjaraning ab -tekisligi bo'yicha tashkil etuvchisi $m_{p,ab}$ va c -o'q bo'yicha tashkil etuvchisi $m_{p,c}$ larning ko'paytmasi shaklida yozishimiz mumkin: $m_p = m_{p,ab}^{2/3} m_{p,c}^{1/3}$. Massa anizotropiya koeffitsiyenti $\gamma_m = m_c/m_{ab}$ ni kiritib, $m_{p,ab} = m_p \gamma_m^{-2/3}$ deb yozsak bo'ladi. Tajribalardan massa anizotropiya koeffitsiyentining kislorod miqdoriga bog'liqligini bilsak, oxirgi formulalar yordamida polaron massasining kristall panjaraning ab -tekisligi bo'yicha tashkil etuvchisining yoki ikki o'lchamli (2D) polaron massasi $m_{p,ab}$ ning kislorod miqdoriga bog'liqligini topishimiz mumkin.

Natijalar va muhokama. Yuqoridagi formulalar asosida polaron massasini (m_p , $m_{p,ab}$) hisoblash uchun p , V_a , T_c va γ_m kabi kattaliklarning kislorod miqdoriga bog'liqligini bilish zarur. Xiong *et al.* tajribasiga muvofiq Hg-1201 kuprati tarkibidagi kovaklar soni va uning O'O' KH birikma tarkibidagi kislorod miqdoriga, mos ravishda, $p = 0.72\delta$ va

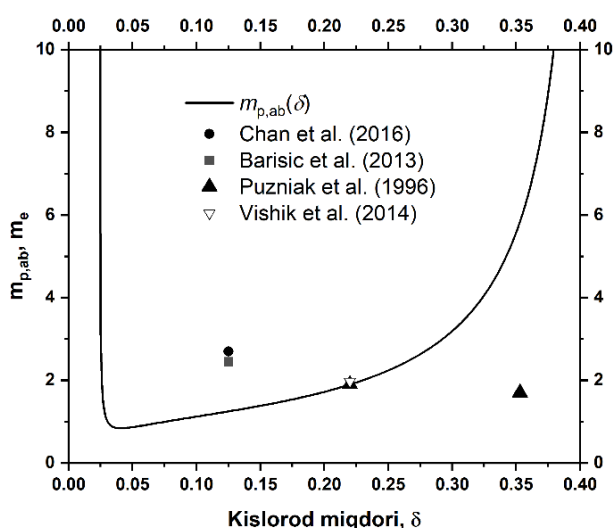
$$T_c(\delta) = T_{c,max}[1 - 0.26(\delta - 0.22)^2], \quad (2)$$

formula orqali bog'liq [6]. Bu yerda $T_{c,max} = 97$ K. Hg-1201 kuprati kristall panjarasi tetragonal tuzulishga egaligi sabab, oddiy katak hajmi $V_a = a^2c$ orqali hisoblanadi. Bunda a – kristall panjaraning CuO_2 yoki ab – kristallografik tekislikdagi davri, c – kristall panjaraning c – kristallografik o'q bo'yicha davri. Bu panjara davrlari ham birikma tarkibidagi kislorod miqdoriga bog'liq. Xususan, Fukuoka *et al.* tajribasida ikkala panjara davrlari ham kislorod miqdori ortishi bilan chiziqli tarzda kamayib borishi ko'rsatilgan [7]. Hg-1201 kuprati panjara

davrlarining Fukuoka *et al.* [7] tajribasida aniqlangan kamayishini $a(\delta) \cong a_0 - \tilde{a}\delta$ ($a_0 = 3.89329703$ Å, $\tilde{a} = 0.18721$ Å) va $c(\delta) \cong c_0 - \tilde{c}\delta$ ($c_0 = 9.54$ Å, $\tilde{c} = 0.28315$ Å) analitik munosabatlar yordamida ifodalash mumkin. U holda, Hg-1201 kuprati kristall panjarasi oddiy katagi hajmi ham kislorod miqdoriga bog'liq bo'ladi: $V_a(\delta) = a^2(\delta)c(\delta)$. Massa anizotropiya koeffitsiyenti γ_m ning kislorod miqdoriga bog'ligi esa Hofer *et al.* maqolasida quyidagicha analitik tarzda berilgan [8]: $\gamma_m(\delta) = [\tilde{\gamma}_1 \delta^{-1/2} \cdot \exp(\tilde{\gamma}_2/\delta)]^{1/2}$, $\tilde{\gamma}_1 = 33$ va $\tilde{\gamma}_2 = 0.18$. Yuqoridagi munosabatlar yordamida 3D va 2D polaron massalarini kislorod miqdori funksiyasi sifatida o'rganishimiz mumkin. Hisoblash natijalari 1- va 2- rasmlarda ko'rsatilgan. 3D polaron massasining kislorod miqdoriga bog'liqligi nomonoton tarzda o'zgaradi. Kislorod miqdori $0.05 < \delta < 0.10$ sohasida δ ortishi bilan m_p keskin kamayishi kuzatiladi. Kislorod miqdorining $0.10 < \delta < 0.25$ sohasida 3D m_p qiymati juda sekin tarzda kamayib, keyin yana orta boshlaydi. Kislorod miqdori $\delta = 0.14$ atrofida 3D m_p eng kam $m_p \approx 9m_e$ qiymatiga erishadi. Ya'ni, $m_p(\delta)$ grafigining eng kichik qiymat (minimum) ga erishishi ($\delta = 0.15$ atrofida) $T_c(\delta)$ grafigining eng katta qiymat (maksimum) ga erishishi ($\delta = 0.22$ atrofida) bilan mos tushmaydi. Buning sababi, Hg-1201 O'O' KH bipolaron massasidan tashqari, bipolaronlar zichligiga ham bog'liqligidir. $m_p(\delta)$ grafigi shakli Hg-1201 O'O' KH T_c ning δ ga bog'likligining teskarisini eslatadi ya'ni 1-rasmdan $m_p \sim T_c^{-1}$ munosabat o'rinli ekanini kuzatamiz. Xuddi shu rasmda, R. Puźniak *et al.* [9] va M. Orlando *et al.* [10] mualliflar tomonidan tajribalarda aniqlangan zaryad tashuvchisi massalarining qiymatlari, mos ravishda, qora kvadrat va qora doira shakllarda ko'rsatilgan. R. Puźniak *et al.* [9] ishida topilgan massa qiymatlari, $\delta = 0.22$ da $m_p = 2.74m_e$ va $\delta = 0.352$ da $m_p = 2.05m_e$, biz hisoblab topgan nazariy natijalardan ancha kichik, ammo, Orlando *et al.* [10] ishida Kazimir energiyasi O'O' modeli bo'yicha $\delta = 0.22$ da topilgan massa qiymati $m_p = 6.6m_e$ bo'lib, bizning nazariy natijalarimizga ancha yaqin.



1-rasm. Hg-1201 kuprati O'O' KH T_c va 3D polaron massasi m_p larning kislorod miqdori δ ga bog'liqlik graflari.



2-rasm. Hg-1201 kupratida 2D polaron massasi $m_{p,ab}$ ning kislorod miqdori δ ga bog'liqlik grafigi

Hg-1201 kupratida 2D polaron massasi $m_{p,ab}$ ning kislorod miqdori δ ga bog'liqlik grafigi 2-rasmda keltirilgan. Grafikning diqqatga sazovar bir nechta jihatlari mavjud. Ko'rinib turganiday, tadqiqotda tanlangan nazariy model xususiyatiga ko'ra, O'O' paydo bo'lishi ($\delta \approx 0.02$) va yo'qolishi ($\delta \approx 0.4$) sohalarida, 2D polaron massasi $m_{p,ab}$ ning qiymati cheksizlikka intiladi. Kam legirlash sohasida, kislorodning juda oz miqdorida ortishi 2D polaron massasining keskin kamayishiga olib keladi. Xususan, $m_{p,ab}(0.024) = 26.82m_e$, $m_{p,ab}(0.025) = 3.2m_e$, $m_{p,ab}(0.026) = 1.9m_e$ va $m_{p,ab}(0.041) = 0.84m_e$ bo'ladi. Kislorod miqdori $\delta \approx 0.041$ dan boshlab to O'O' yo'qolishiga mos keluvchi kislorod miqdori $\delta \approx 0.4$ gacha 2D polaron massasi $m_{p,ab}$ qiymati ortib boradi. Ammo, bu ortish monoton emas. Kislorod miqdori $0.041 < \delta < 0.18$ va $0.18 < \delta < 0.4$ oraliklarida o'zgarganida $m_{p,ab}$ ning ortishini, mos ravishda, $m_{p,ab}(\delta) \cong 0.59 + 5.4\delta$ kabi chiziqli o'zgaruvchan va $m_{p,ab}(\delta) \cong 1/(1.12499 - 2.70234\delta)$ kabi ratsional analitik formulalar orqali yetarlicha aniqlikda ifodalash mumkin. Bog'lanish grafigining o'zini esa asimmetrik parabola o'xshatish mumkin. Polaron massasining zaryad tashuvchi (kislorod) miqdoriga bunday tarzda bog'liq bo'lishi, boshqa kupratlarda, jumladan, LSCO va YBCO kupratlarida kuzatiladi [11,12]. Buning asosiy sababi, massa anizotropiya koeffitsiyenti γ_m ning kislorod miqdori ortishi bilan eksponensial kamayishidir. 2-rasmda Hg-1201 kupratida bajarilgan ba'zi tajribalarda topilgan zaryad tashuvchisi massalari qiymatlari ham keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turganiday, nazariy yo'l bilan hisoblagan 2D polaron massasi qiymatlari kislorodning oz miqdorlarida zaryad tashuvchisining tajribaviy massalaridan kichik, kislorodning ko'p miqdorlarida esa zaryad tashuvchisining tajribaviy massalaridan katta. Kislorodning optimal miqdorida nazariya va tajriba o'zaro

mos. Xususan, kislorodning $\delta=0.125$ miqdori uchun hisoblangan 2D polaron massasining $m_{p,ab}(0.125) \cong 1.25m_e$ qiymati, Barišić *et al.* [13] va Chan *et al.* [14] ishlarida keltirilgan zaryad tashuvchisi massalari, $(2.45 \pm 0.15)m_e$ [13] va $2.7m_e$ [14] qiymatlaridan, taxminan, ikki marta kichik. Puźniak *et al.* [9] ishida kislorodning $\delta=0.353$ miqdorida zaryad tashuvchisi massasining $1.7m_e$ ga teng ekanligi keltirilgan. Kislorodning ayni shu miqdori uchun biz hisoblagan 2D polaron massasi $m_{p,ab}(0.353) \cong 5.83m_e$ bo'lib, u tajribaviy natijadan taxminan 3.5 marta katta. Ammo shuni ham ta'kidlab o'tish joiz, Hg-1201 ning optimal legirlanish darajasi $\delta=0.22$ uchun biz hisoblagan 2D polaron massasi $m_{p,ab}(0.22)=1.897m_e$ bo'lib, u Puźniak *et al.* [9] ishida topilgan zaryad tashuvchisi massasi $1.9m_e$ va Vishik *et al.* [15] ishida topilgan zaryad tashuvchisi massasi $1.97m_e$ tajriba natijalari bilan mos. Mavjud tajribaviy ma'lumotlar va hisoblash natijalarini tahlil qilib quyidagi xulosaga kelamiz: 1-rasmda ko'rsatilganiday $T_c(\delta)$ maksimumining $m_p(\delta)$ minimumiga mos kelmasligini, $m_p(\delta)$ va $m_{p,ab}(\delta)$ minimumlarining o'zaro mos kelmasligi hamda $m_{p,ab}(\delta)$ ning Hg-1201 O'O' sohasida kislorod miqdori ortishi bilan ortishi Hg-1201 kuprati kristall panjarasining kvazi-2D bo'lishi natijasida kristall panjara oddiy katagi hajmi $V_a(\delta)$ va massa anizotropiya koeffitsiyenti $\gamma_m(\delta)$ ning kislorod miqdoriga o'ziga xos tarzda bog'liqligining oqibatidir.

Xulosa. Biz ushbu maqolada Hg-1201 kupratida zaryad tashuvchisi massasining kislorod miqdoriga bog'liqligini YuHO'O' likning bipolaron modeli negizida o'rgandik. Bunda, Hg-1201 kupratida zaryad tashuvchisi (bi)polaron va kuprat O'O' bipolaron suyuqligining o'taoquvchanligi natijasi deb qaraladi. O'O' KH esa bipolaron suyuqlik o'taoquvchanlik KH ning o'zidir. Ammo maqolada biz yetarli aniqlikda va asoslangan holda o'taoquvchanlik KH ni bipolaronlar ideal gazi BEK haroratiga teng deb oldik. Oxirgi harorat esa Hg-1201 kupratining tajribada topilgan $T_c(\delta)$ ga tenglashtirib (1) formulaga muvofiq 3D polaron massasi $m_p(\delta)$ topildi. Bunda, $T_c(\delta)$ va $V_a(\delta)$ bog'liqlik inobatga olindi. Undan keyin, massa anizotropiya koeffitsiyenti $\gamma_m(\delta)$ ning kislorod miqdoriga bog'liqligi inobatga olinib, 2D polaron massasi $m_{p,ab}(\delta)$ ning qiymatlari hisoblandi. Hisoblash natijalari $T_c(\delta)$ maksimumining $m_p(\delta)$ minimumiga mos kelmasligini ko'rsatdi. Shu bilan birga, LSCO va YBCO kupratlarida kuzatilgani kabi, O'O' sohasida Hg-1201 kupratida $m_{p,ab}(\delta)$ kislorod miqdori ortishi bilan ortishi topildi. 2D polaron massasining bunday o'sishi massa anizotropiya koeffitsiyenti $\gamma_m(\delta)$ ning kislorod miqdoriga o'ziga xos tarzda bog'liqligining oqibati ya'ni eksponensial kamayishi ekanligi ko'rsatildi. Hisoblangan massa qiymatlar tajribada topilgan natijalarga kislorodning optimal qiymatida mos keladi. Maqolada qo'llanilgan tadqiqot metodikasi boshqa kupratlarda zaryad tashuvchining kislorod miqdoriga bog'liqligini o'rganishda ham qo'llanilishi mumkin.

Adabiyotlar

1. Yamamoto A. *et al.* High-pressure effects revisited for the cuprate superconductor family with highest critical temperature. // Nat. Commun. **6**(1), 2015. 8990.
2. Singh N. Leading theories of the cuprate superconductivity: A critique. // Physica C: Superconductivity and its Applications, vol. 580, 2021. 1353782.
3. Yamamoto A. Toward elucidating the mechanism of high- T_c superconducting cuprates. // JPSJ News and Comments, vol. 21. 2024, 08.

4. Alexandrov A.S. Theory of Superconductivity: From Weak to Strong Coupling. – Bristol and Philadelphia: IOP Publishing Ltd., 2003.
5. Zhang C. *et al.* Superconducting Transition Temperature of the Bose One-Component Plasma. // Phys. Rev. Lett. Vol. 130, 2023. 236001.
6. Xiong Q. *et al.* Unusual hole dependence of T_c in $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$. // Phys. Rev. B 50(14), 1994. 10346.
7. Fukuoka A. *et al.* Dependence of superconducting properties on the Cu-valence determined by iodometry in $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$. // Physica C: Superconductivity, 265(1), 1996. 13.
8. Hofer J. *et al.* Doping Dependence of the Effective Mass Anisotropy and Oxygen-Isotope Effect on the Magnetic Penetration Depth: The Role of Lattice Vibrations in High-Temperature Superconductivity. // Journal of Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism, 13(6), 2000. 963.
9. Puźniak R. *et al.* Overdoped regime of the high- T_c superconductor $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ and the relation between normal and superconducting carrier densities. // Phys. Rev. B. 53(1), 1996. 86.
10. Orlando M. *et al.* Correlation among the effective mass (m^*), λ_{ab} and T_c of superconducting cuprates in a Casimir energy scenario. // Physics Letters A 382. 2018. 1486.
11. Otajonov S.M. *et al.* On the mass of the charge carrier in LSCO cuprate: Bose–Einstein condensation of preformed pairs point of view. // Physica B: Condensed Matter 695. 2024. 416589.
12. Otajonov S.M. *et al.* Preformed pairs approach to the mass of the charge carrier in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ cuprate. // Physica B: Condensed Matter 727. 2026. 418383.
13. Barišić N. *et al.* Universal quantum oscillations in the underdoped cuprate superconductors. // Nature Physics 9(12), 2013. 761.
14. Chan M.K. *et al.* Single reconstructed Fermi surface pocket in an underdoped single-layer cuprate superconductor. // Nature Communications 7(1), 2016. 12244.
15. Vishik I.M. *et al.* Angle-resolved photoemission spectroscopy study of $\text{HgBa}_2\text{CuO}_{4+\delta}$. // Phys. Rev. B 89, 2014. 195141.