NAMANGAN DAVLAT UNIVERSITETI
ILMIY AXBOROTNOMASI, [2026-8]
ISSN:2181-1458
ISSN:2181-0427

01.00.00-FIZIKA-MATEMATIKA
journal.namdu.uz
PHYSICS AND MATHEMATICS

UO‘ K: 538.945.9

$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ YUQORI HARORATLI O‘ TA O‘ TKAZGICHLARIDA KISLOROD STEXIOMET RIYASI HAMDA KRISTALL TUZILISH PARAMETRLARINING KRITIK HARORATGA TA’SIRI

A.A. Turayev
BuxDU «Fizika» kafedrasi professori, f.-m.f.d. (PhD), professor

Annotatsiya: *Maqolada $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) tizimida kritik haroratni (T_c) belgilovchi struktura-kimyoviy omillar — kislorod stexiometriyasi, panjara parametrlari va ortorombik deformatsiya (η) — o‘ rtasidagi bog‘ liqlik uchta nashr etilgan manbadan yig‘ ilgan ma’lumotlar asosida ko‘ p manbali statistik tahlil orqali o‘ rganildi. Qattiq fazali reaksiya usuli bilan sintez qilingan Y123 namunalari bo‘ yicha 11 ta ma’lumot nuqtasi (jumladan mualliflarning yuqori fazaviy tozalikdagi namunasi, T_c = 95,5 K) birlashtirildi. Manba effektini hisobga olgan holda o‘ tkazilgan tahlil kislorod tarkibi bilan T_c o‘ rtasida barqaror bog‘ liqlikni ko‘ rsatdi: umumiy Pearson r = 0,80 (p = 0,003), eng katta manba ichida r = 0,91, manba nazoratga olingandagi qisman (partial) korrelyatsiya esa r = 0,69 (p = 0,019). Ortorombiklik η bilan esa ham global, ham manba nazoratidagi korrelyatsiya deyarli nol (r ≈ −0,03) bo‘ lib chiqdi. Natijalar 2026-yilda e’lon qilingan uch yangi tadqiqot kontekstida muhokama qilindi.*

Kalit so‘ zlar: *YHO‘ O‘ , YBCO, kislorod stexiometriyasi, ortorombiklik, kritik harorat, ko‘ p manbali tahlil, manba effekti, Rietveld tahlili.*

EFFECT OF OXYGEN STOICHIOMETRY AND CRYSTAL STRUCTURE PARAMETERS ON THE CRITICAL TEMPERATURE IN $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

Abstract: *This work analyzes the relationship between the structural-chemical factors governing the critical temperature (T_c) of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ — oxygen stoichiometry, lattice parameters, and orthorhombic distortion (η) — using data compiled from three published sources rather than eleven independent experiments. Eleven data points for solid-state-synthesized Y123, including the authors’ high-phase-purity sample (T_c = 95.5 K), were pooled. Accounting for the source (laboratory) effect, the oxygen–T_c relationship remained robust: overall Pearson r = 0.80 (p = 0.003), within the largest source r = 0.91, and the source-controlled partial correlation r = 0.69 (p = 0.019). Orthorhombicity η showed a near-zero correlation (r ≈ −0.03) both globally and after controlling for source. Cross-study heterogeneity and its limitations are explicitly discussed.*

Keywords: *HTSC, YBCO, oxygen stoichiometry, orthorhombicity, critical temperature, multi-source analysis, Rietveld analysis.*

Kirish

Yuqori haroratli o‘ ta o‘ tkazgichlar (YHO‘ O‘) orasida $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123) o‘ zining nisbatan yuqori kritik harorati, kimyoviy barqarorligi va texnologik jihatdan arzon sintez imkoniyatlari tufayli eng istiqbolli nomzodlardan biri bo‘ lib qolmoqda [1,2]. Y123 ning o‘ ta o‘ tkazuvchanlik xatti-harakatini belgilovchi asosiy parametr Cu–O zanjirlaridagi kislorod miqdori bo‘ lib, u CuO_2 tekisliklaridagi teshik konsentratsiyasiga bevosita ta’sir ko‘ rsatadi va ortorombik–tetragonal struktura o‘ tishini boshqaradi [3,4].

Adabiyotda struktura parametrlari (panjara o‘ lchamlari a, b, c, ortorombik deformatsiya η) bilan T_c o‘ rtasidagi bog‘ liqlik ko‘ p marta muhokama qilingan [5–8], biroq bu ishlarning aksariyati alohida sintez seriyasi doirasida olib borilgan. Turli mustaqil laboratoriyalarning natijalarini birlashtirgan holda statistik tekshirish nisbatan kamdan-kam uchraydi. Shu bilan birga, bunday birlashtirish manba (laboratoriya) effektini hisobga olishni talab qiladi, chunki turli manbalarda kislorodni aniqlash, T_c ni o‘ lchash va strukturaviy tavsiflash usullari farq qilishi mumkin. Ushbu ishning maqsadi ikki tomonlama: (i) qattiq fazali reaksiya usuli bilan sintez qilingan Y123 namunalari bo‘ yicha nashr etilgan struktura–T_c ma’lumotlarini manba effektini hisobga olgan holda statistik tahlil qilish; (ii) olingan natijalarni 2026-yilda e’lon qilingan eng so‘ nggi uchta ilmiy ish [11,12,13] kontekstida muhokama qilish.

Muhim uslubiy izoh: mazkur ishda tahlil qilingan 11 ta ma’lumot nuqtasi 11 ta o‘ zaro to‘ liq mustaqil eksperimental tadqiqot emas, balki uchta nashr etilgan manbadan yig‘ ilgan kuzatuvlardir. Xususan, 1–6-ma’lumot nuqtalari [8] manbadan (Howe), 7–10-nuqtalar [5] manbadan (Sahoo va h.k.), 11-nuqta esa mualliflarning o‘ z ishidan [1] (Turayev va

h.k.) olingan (1-jadval). Shu sababli bir xil manbadan olingan nuqtalar o‘ zaro to‘ liq statistik mustaqil deb hisoblanmaydi va manba (laboratoriya) effekti tahlilga alohida kiritilgan (quyida «Statistik tahlil» bo‘ limiga qarang).

1-jadval. Qattiq fazali reaksiya usuli bilan sintez qilingan Y123 namunalarining birlashtirilgan struktura–T_c ma’lumotlari (n=11; uchta manbadan). Ortorombiklik η=(b−a)/(b+a) hisoblab chiqildi.

№	7−δ	a, Å	b, Å	c, Å	T_c, K	Manba
1	6.60	3.81	3.87	7.81	78	[8]
2	6.65	3.81	3.87	7.81	80	[8]
3	6.69	3.81	3.88	9.10	89.5	[8]
4	6.75	3.82	3.87	6.50	90	[8]
5	6.77	3.84	3.91	9.03	91	[8]
6	6.79	3.82	3.88	7.79	90	[8]
7	6.84	3.8212	3.8850	8.28	88.2	[5]
8	6.84	3.8230	3.8868	8.27	90.2	[5]
9	6.85	3.8202	3.8854	8.46	91.3	[5]
10	6.72	3.8311	3.8502	2.49	91.68	[5]
11	6.91	3.8227	3.8929	9.10	95.5	[1]

Strukturaviy ma’lumotlarning kelib chiqishi va Rietveld tahlili

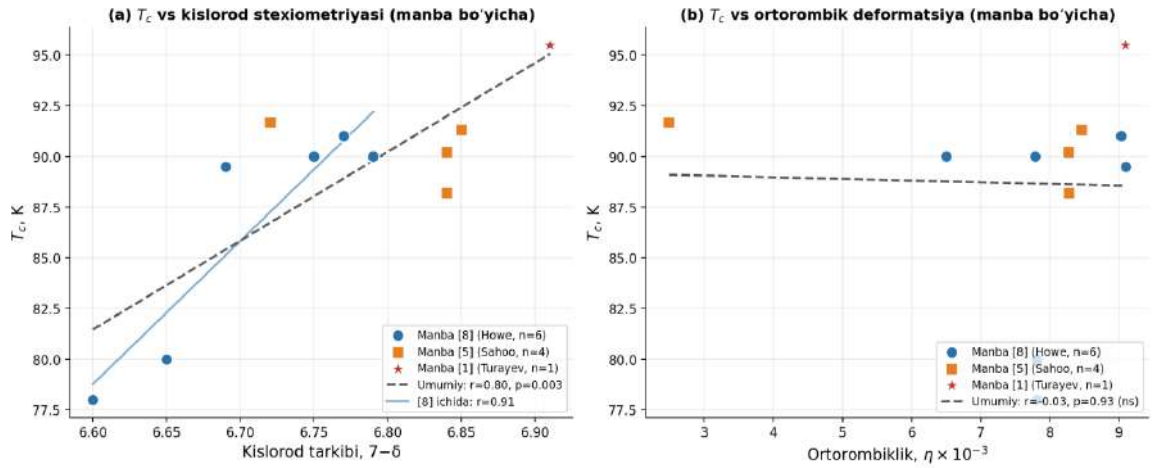
Panjara parametrlari (a, b, c) va kislorod tarkibi (7−δ) har bir manbada rentgen (yoki neytron) kukun difraksiyasi va Rietveld/WPPF tahlili orqali aniqlangan. Meta-tahlilning tabiatidan kelib chiqib, dastlabki tozalash (refinement) sifat ko‘ rsatkichlari barcha manbalarda bir xil darajada keltirilmaganini alohida ta’kidlash lozim — bu ushbu ishning cheklovi bo‘ lib, 2-jadvalda umumlashtirilgan. Mualliflarning o‘ z namunasi ([1]) uchun tahlil To‘ liq Difraktogramma Moslashtirish (WPPF) va Rietveld usuli bilan bajarilib, faza sofligi 99,21 %, panjara parametrlari a = 3,8227 Å, b = 3,8929 Å, c = 11,6889 Å, elementar yacheyka hajmi 173,952 $Å^3$ va mikrodeformatsiya 0,064 % qiymatida aniqlangan; kislorod indeksi esa atom pozitsiyalari bandligini yig‘ ish orqali $O_{total} \approx 6{,}91$ deb hisoblangan [1].

2-jadval. Manbalar bo‘ yicha strukturaviy va o‘ lchov usullarining bir xil emasligi (cross-study heterogeneity).

Ko‘ rsatkich	Manba [8]	Manba [5]	Manba [1]
Difraksiya/tahlil	XRD, Rietveld	XRD, Rietveld	XRD, WPPF+Rietveld
Refinement sifati (R_{wp}, χ^2)	to‘ liq keltirilmagan	to‘ liq keltirilmagan	keltirilgan
Kislorod aniqlash	struktura/kalibr.	struktura/kalibr.	site occupancy
T_c mezoni	o‘ tish (onset/mid)	o‘ tish (onset/mid)	$T_{c,mid}$=95,5 K
Faza sofligi	keltirilmagan	qisman	99,21 %
Nuqtalar soni	6	4	1

Har bir juftlik uchun Pearson korrelyatsiya koeffitsienti (r), unga mos p-qiymati va chiziqli regressiya (eng kichik kvadratlar usuli) hisoblandi. Manba effektini hisobga olish uchun uch qo‘ shimcha tahlil bajarildi: (i) har bir ko‘ p namunali manba ichida alohida korrelyatsiya; (ii) manbani soxta o‘ zgaruvchi (dummy) sifatida kiritib, qoldiqlar asosida qisman (partial) korrelyatsiya; (iii) bitta manbani chiqarib tashlab qayta hisoblash (leave-one-source-out) sezuvchanlik tahlili. Tahlil Python (SciPy) muhitida bajarildi; statistik ishonchlilik chegarasi $p < 0{,}05$ sifatida qabul qilindi.

Umumiy tahlil (n=11) kislorod tarkibi (7−δ) T_c ning statistik jihatdan yagona ishonchli bashoratchisi ekanligini ko‘ rsatdi ($r = 0{,}80$; $p = 0{,}003$; $R^2 = 0{,}64$), ortorombiklik η bilan esa amaliy jihatdan hech qanday chiziqli bog‘ liqlik kuzatilmadi ($r = -0{,}03$; $p = 0{,}93$) (1-rasm, 3-jadval).



1-rasm. (a) T_c ning kislorod stexiometriyasiga va (b) ortorombik deformatsiyaga bog‘ liqligi, manba bo‘ yicha ranglangan. Kislorod–T_c trendi eng katta manba ([8]) ichida ham saqlanadi.

Taqrizda ko‘ tarilgan asosiy masala — ma’lumotlarning bir necha manbadan olingani va ularning to‘ liq mustaqil emasligi — ni hal qilish uchun manba effektini hisobga oluvchi qo‘ shimcha tahlil o‘ tkazildi (3-jadval). Natijalar quyidagicha: (i) eng katta manba ([8], n=6) ichida kislorod–T_c korrelyatsiyasi kuchli va ishonchli (r = 0,91; p = 0,013); (ii) manba soxta o‘ zgaruvchi sifatida nazoratga olinganda qisman korrelyatsiya baribir ishonchli bo‘ lib qoladi (r = 0,69; p = 0,019). Ikkinchi ko‘ p namunali manba ([5], n=4) ichida esa korrelyatsiya zaif va statistik jihatdan ishonchsiz (r = −0,52; p = 0,48) bo‘ lib, bu ushbu manbada kislorod tarkibi oralig‘ ining juda tor (6,72–6,85) bo‘ lishi va namunalar sonining kamligi bilan izohlanadi. Ortorombiklik η esa manba nazoratra olingandan keyin ham T_c bilan bog‘ lanmagan (partial r = −0,04; p = 0,91).

3-jadval. Manba (laboratoriya) effektini hisobga oluvchi statistik tahlil natijalari.

Tahlil	n	kislorod–T_c (r, p)	η–T_c (r, p)
Umumiy (barcha manbalar)	11	0,80; 0,003	−0,03; 0,93
Manba [8] ichida (Howe)	6	0,91; 0,013	0,17; 0,74
Manba [5] ichida (Sahoo)	4	−0,52; 0,48	−0,55; 0,45
Manba nazoratda (partial)	11	0,69; 0,019	−0,04; 0,91

Ushbu qo‘ shimcha tahlil taqrizchining e’tiroziga aniq javob beradi: kislorod–T_c bog‘ liqligi shunchaki manbalarni birlashtirish artefakti emas, balki eng katta manba ichida ham, manba effekti statistik jihatdan nazoratga olingandan keyin ham saqlanadigan barqaror bog‘ liqlikdir. Aksincha, ortorombiklik η T_c ning global bashoratchisi bo‘ la olmaydi.

Bir necha manbadan olingan T_c va strukturaviy qiymatlarni birlashtirishda quyidagi omillar bir xil bo‘ lmasligi mumkin va bu tahlil natijalariga ta’sir qiladi: namuna tayyorlash sharoiti, kuydirish (annealing) harorati, kislorodlash protokoli va sovutish tezligi, namuna zichligi va donalar o‘ lchami, faza sofligi, T_c ni o‘ lchash usuli hamda T_c ning onset yoki midpoint sifatida olinishi (2-jadval). Ushbu bir xil emaslik (heterogeneity) korrelyatsiyalarni ham kuchaytirishi, ham susaytirishi mumkin. Shu sababli mazkur ishda olingan miqdoriy koeffitsientlar mutlaq emas, balki umumiy tendensiyani ko‘ rsatuvchi baholar sifatida talqin qilinishi lozim. Shunga qaramay, kislorod–T_c bog‘ liqligining manba ichida va manba nazoratida saqlanishi bu tendensiyaning mustahkamligini ko‘ rsatadi.

Olingan xulosa 2026-yilgi uch muhim ishning natijalari bilan uyg‘ un: (i) Conradson va h.k. (PNAS, 2026) an’anaviy «legirlash gumbazi» modelining legirlash usuliga xos artefakt bo‘ lishi mumkinligini ko‘ rsatdi [12]; (ii) Kethamkuzhi va h.k. (Scientific Reports, 2026) kislorod kinetikasining YBCO plyonkalarida ham markaziy rol o‘ ynashini tasdiqladi [13]; (iii) Luccas va h.k. (arXiv, 2026) past haroratli kislorodlashda Ortho-II o‘ ta strukturasi orqali o‘ tish yakuniy strukturada doimiy iz qoldirishini, ya’ni η tarqoqligining mexanistik sababini ko‘ rsatdi [11]. Bu ishlar mazkur tahlil xulosasini — kislorod tarkibi (va u orqali teshik konsentratsiyasi) T_c ning asosiy boshqaruvchisi, η esa kislorod tartiblanishining hosilaviy «barmoq izi» ekanligini — mustahkamlaydi.

Xulosa

Uchta nashr etilgan manbadan yig‘ ilgan struktura–T_c ma’lumotlarining manba effektini hisobga oluvchi statistik tahlili shuni ko‘ rsatdiki, kislorod stexiometriyasi (7−δ) T_c ning eng ishonchli struktura-kimyoviy bashoratchisidir: bog‘ liqlik umumiy holatda (r = 0,80; p = 0,003), eng katta manba ichida (r = 0,91) va manba nazoratga olinganda (partial r = 0,69; p = 0,019) saqlanadi. Ortorombik deformatsiya η esa global miqyosda T_c bilan bog‘ lanmagan (r ≈ −0,03) bo‘ lib, u

kislorod tartiblanishining hosilaviy indikatoridir. Ma'lumotlarning ko' p manbadan olingani va ular orasidagi eksperimental heterogeneity ushbu ishning asosiy cheklovi bo' lib, olingan koeffitsientlar tendensiya baholari sifatida talqin qilinishi kerak. Kelgusi tadqiqotlarda kislorod tarkibidan Tallon formulasi orqali hisoblangan teshik konsentratsiyasi p asosiy o' zgaruvchi sifatida qo' llanilishi va manba effekti aralash-effektli (mixed-effects) modellar bilan qat'iyroq hisobga olinishi tavsiya etiladi [14].

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Turayev O., Turayev A., Dzhuraev D., Ahadov A. Enhanced phase purity and superconducting performance of YBa2Cu3O7−δ ceramics synthesized by solid-state route with multi-stage cooling // Ceramics International. 2026. Vol. 52. P. 7761–7767. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.12.513.

[2] Duhoon A., Awana V.P. Synthesis and characterization of pure Yttrium Barium Copper Oxide (YBCO). Amity Institute of Applied Sciences, Noida, India, 2014.

[3] Behera D. Synthesis and characterization of YBCO/CNT composite. Dept. of Physics and Astronomy, NIT Rourkela, 769008.

[4] Wani T., Prabhakar B. Crystal structure visualization and powder diffraction pattern of YBCO superconductor // AIP Conf. Proc. 2020.

[5] Sahoo B., Karmakar S., Behera D. Improvement of critical parameters of YBCO superconductor by addition of graphene oxide // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2162. 020060. DOI: 10.1063/1.5130270.

[6] Gaffoor M.Z., Jarvis A.L.L., Archer J.C. Investigating the critical transitional temperature increase in graphene oxide doped bulk YBCO // Results in Physics. 2023. Vol. 44. 106140. DOI: 10.1016/j.rinp.2022.106140.

[7] Varshney D., Yogi A., Dodiya N., Mansuri I. Alkaline earth (Ca) and transition metal (Ni) doping on the transport properties of Y1−xCaxBa2(Cu1−yNiy)3O7−δ superconductors // J. Mod. Phys. 2011. Vol. 2. P. 922–927. DOI: 10.4236/jmp.2011.28109.

[8] Howe B.A. Crystal structure and superconductivity of YBa2Cu3O7−x. Minnesota State University, Mankato, 2014.

[9] Gaffoor M.Z., Jarvis A.L.L. Comparison of the effect of graphene and graphene oxide doping on YBCO // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1559. P. 20–28.

[10] Dadras S., Dehghani S., Davoudiniya M., Falahati S. Improving superconducting properties of YBCO by graphene oxide doping // Mater. Chem. Phys. 2017. Vol. 193. P. 496–500.

[11] Luccas R.F., Gallo L., Sobrero C.E., Malarría J.A. Influence of the Ortho-II superstructure in the YBa2Cu3O7−δ orthorhombic phase after annealing // arXiv:2604.07060. 2026 (preprint).

[12] Conradson S.D., Geballe T.H. et al. Saturation of superconductivity in cuprates overdoped with high-pressure oxygen: phase diagram with YBa2Cu3O7−δ, δ →1 // PNAS. 2026. DOI: 10.1073/pnas.2520089123.

[13] Kethamkuzhi A., Saltarelli L., Gupta K. et al. Exploring the overdoping effects in transient liquid assisted grown YBa2Cu3O7−δ superconducting films // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 15607. DOI: 10.1038/s41598-026-41613-0.

[14] Tallon J.L., Bernhard C., Shaked H., Hitterman R.L., Jorgensen J.D. Generic superconducting phase behavior in high-Tc cuprates: Tc variation with hole concentration in YBa2Cu3O7−δ // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 51. P. 12911. DOI: 10.1103/PhysRevB.51.12911.