



Комплексное исследование кристаллической,
локальной атомной и электронной структуры
кобальт-оксидных соединений и ВТСП лент

В. Ефимов, С.И. Тютюнников, В. Сиколенко,

А. Великжанин и Р. Светогоров

План доклада

- I** Объект исследования – базовое кобальтитое соединение LaCoO_3 и ВТСП ленты, замещённые церием и гадолинием
- II** Рентгеновская спектроскопия поглощения
 - описание методов EXAFS, XANES и XMCD
 - экспериментальные данные XAFS на K -крае кобальта, XMCD на K - и $L_{2,3}$ –краях кобальта
- III** Рентген-дифракционные порошковые исследования
- IV** Анализ полученных экспериментальных результатов
- V** Выводы

Почему кобальтиты привлекательны для изучения?

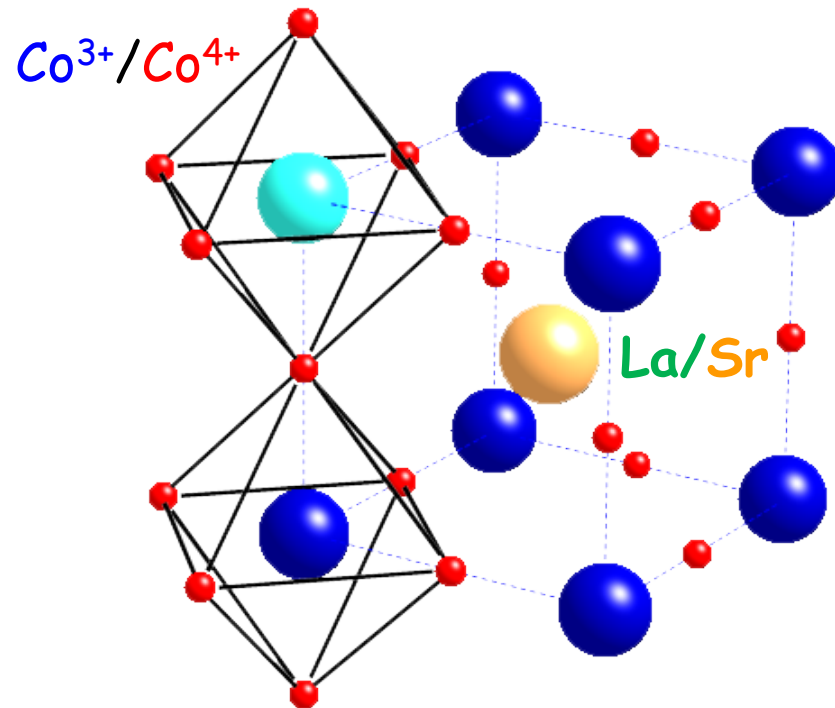
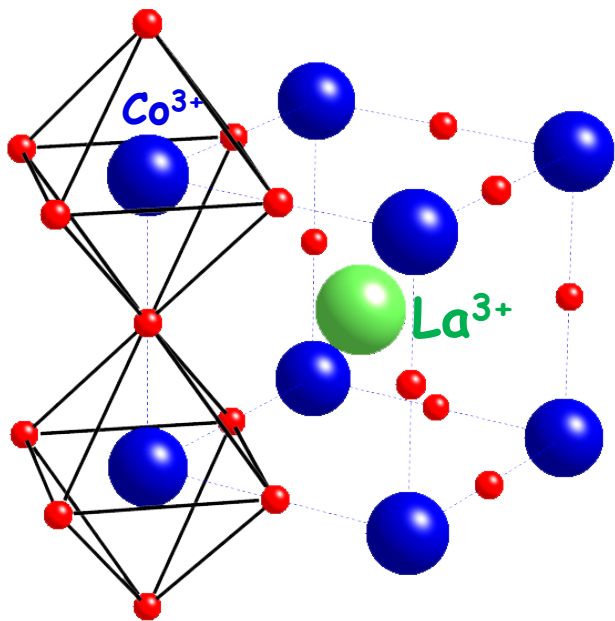
- обладают эффектом колоссального магнитосопротивления
- фазовые переходы диэлектрик-металл, конкуренция антиферромагнитных и ферромагнитных фаз
- проявляют взаимосвязь спиновых и орбитальных степеней свободы
=> конкуренция спиновых состояний, которые ответственны за основные особенности кристаллической структуры, магнитные и электрические свойства

Основные применения кобальтитов:

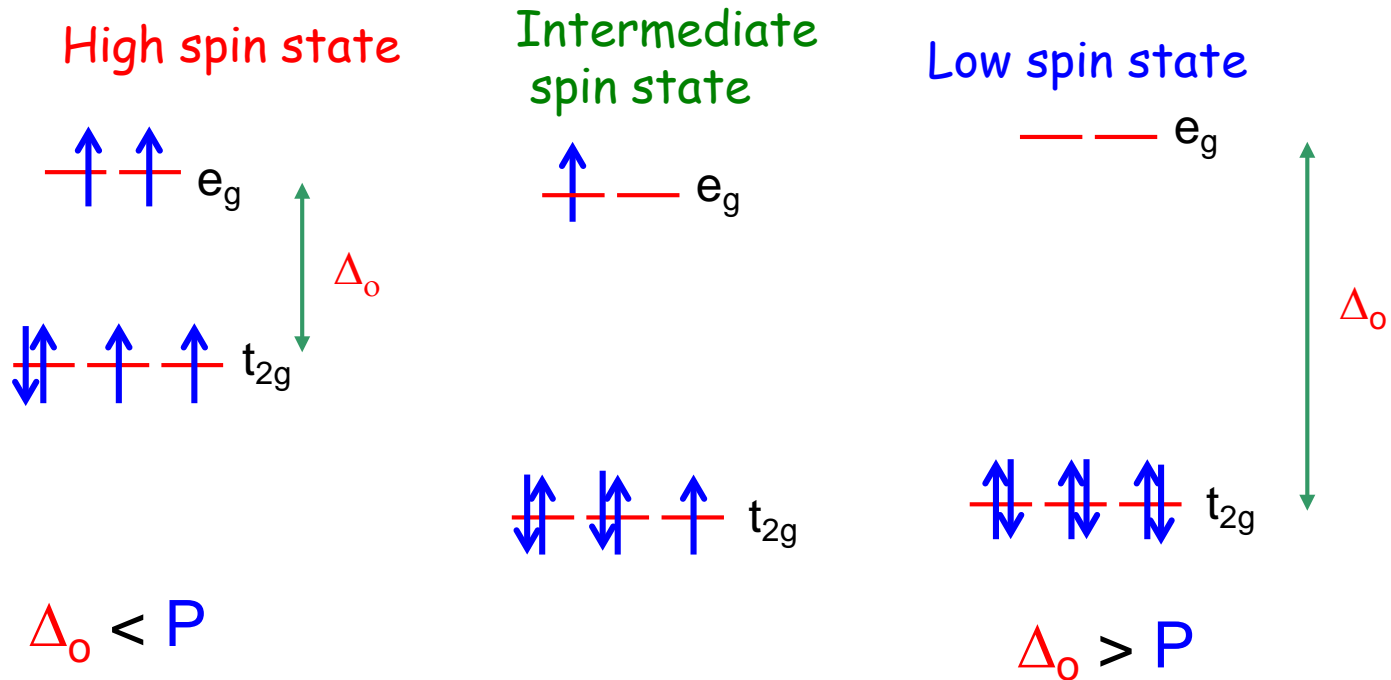
- магнитные головки записи информации, увеличение плотности записи на жестких дисках, хранение информации
- катализаторы химических реакций, топливные ячейки, в мембранах по разделению газов

Какие основные объяснения их уникальных свойств существуют в настоящее время?

Перовскитная структура с пр. гр. $R-3c$
кобальт-оксидных соединений LaCoO_3 и $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$

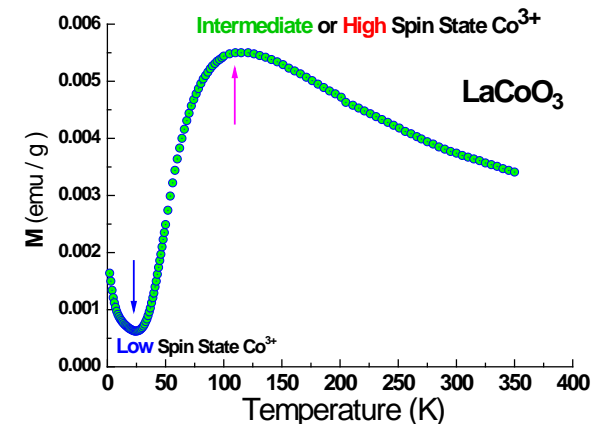


Спиновый переход в кобальтатах



Разница энергии между уровнями e_g и t_{2g} называется параметром расщепления кристаллического поля Δ_o

P есть энергия необходимая для образования пары электронов



Intermediate vs high spin state

Intermediate spin state!

Photoemission spectroscopy, K. Azai, *et al.*, J.Phys.Soc.Jpn. **67** (1998) 290

Magnetic susceptibility, C. Zobel, *et al.*, Phys. Rev. B **66** (2002) R020402

Infrared spectroscopy, S. Yamaguchi, *et al.*, Phys. Rev. B **55** (1998) R8666

Raman spectroscopy, A. Ishikawa, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 136401

LDA+U calculations, M. Korotin, *et al.*, Phys. Rev. B **54** (1996) 5309

Neutron scattering, D. Phelan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 027201

High spin state!

Electron spin resonance, S. Noguchi, *et al.*, Phys. Rev. B **66** (2002) 094404

Magnetic susceptibility, T. Kyomen, *et al.*, Phys. Rev. B **67** (2003) 144424

Heat capacity, T. Kyomen, *et al.*, Phys. Rev. B **71** (2005) 024418

Hartree-Fock calculations, M. Zhuang, *et al.*, Phys. Rev. B **57** (1998) 10705

CoO₆ cluster calculations, M. Haverkort, Ph.D. thesis, cond-mat/0505214 (2005)

X-ray absorption, M. Haverkort *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 176405

Температурная зависимости восприимчивости и электрического сопротивления

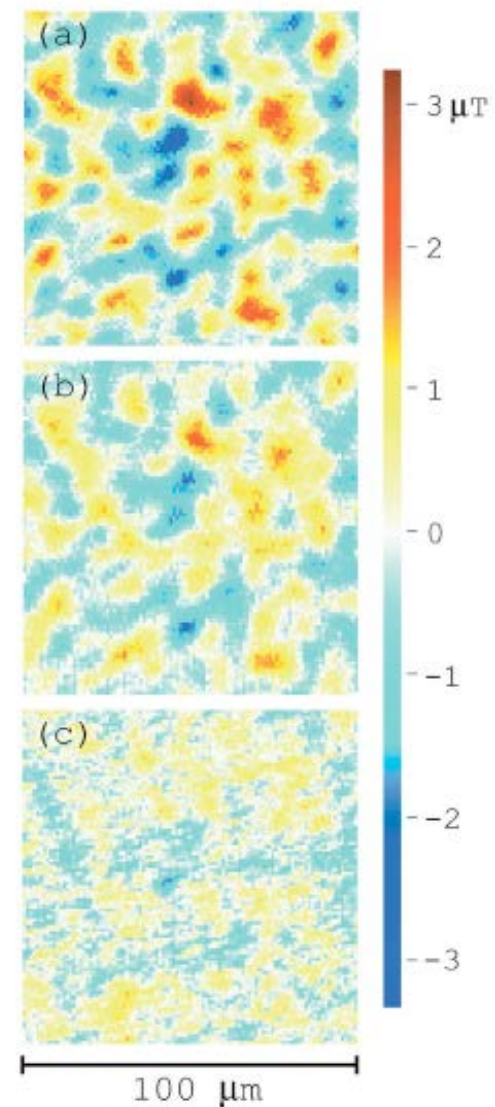
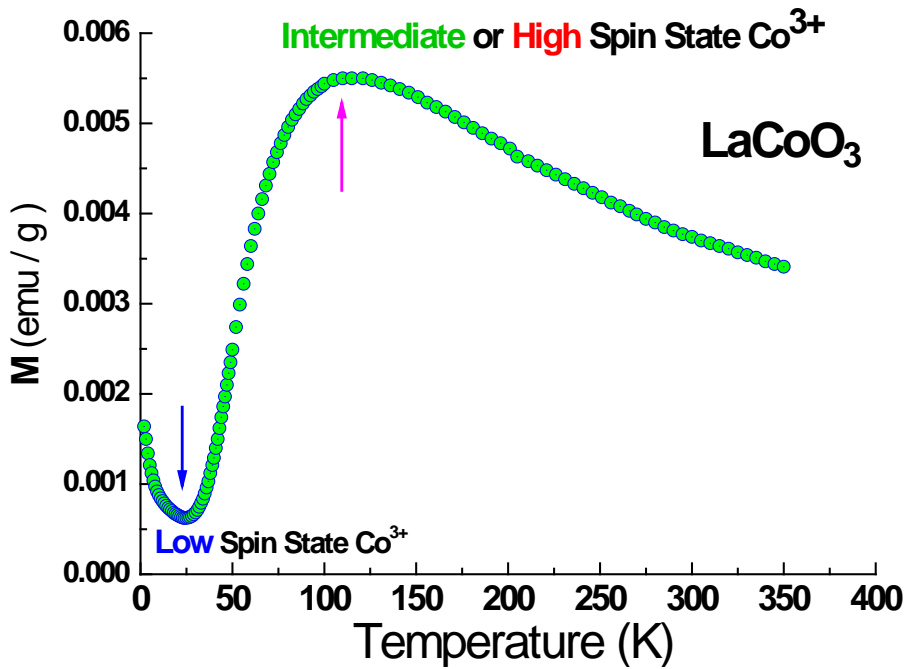
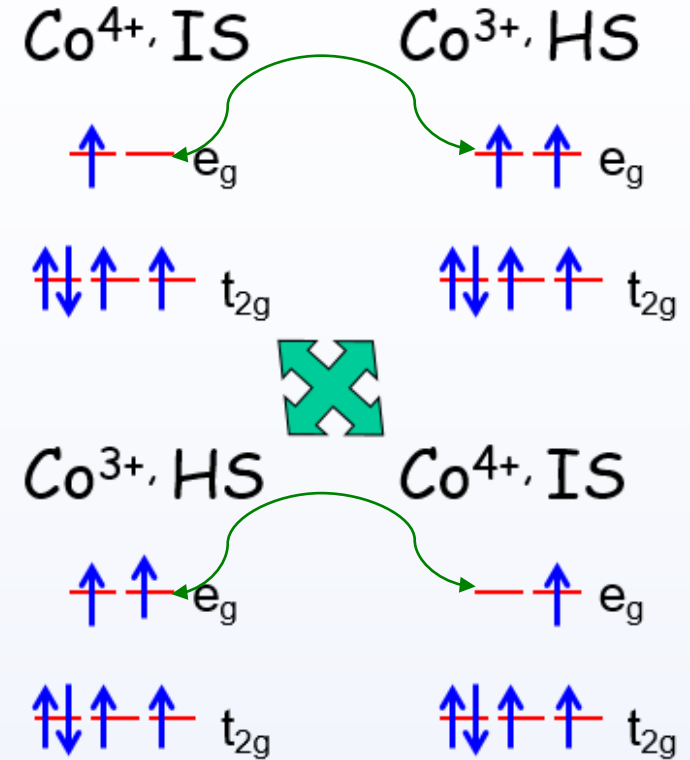
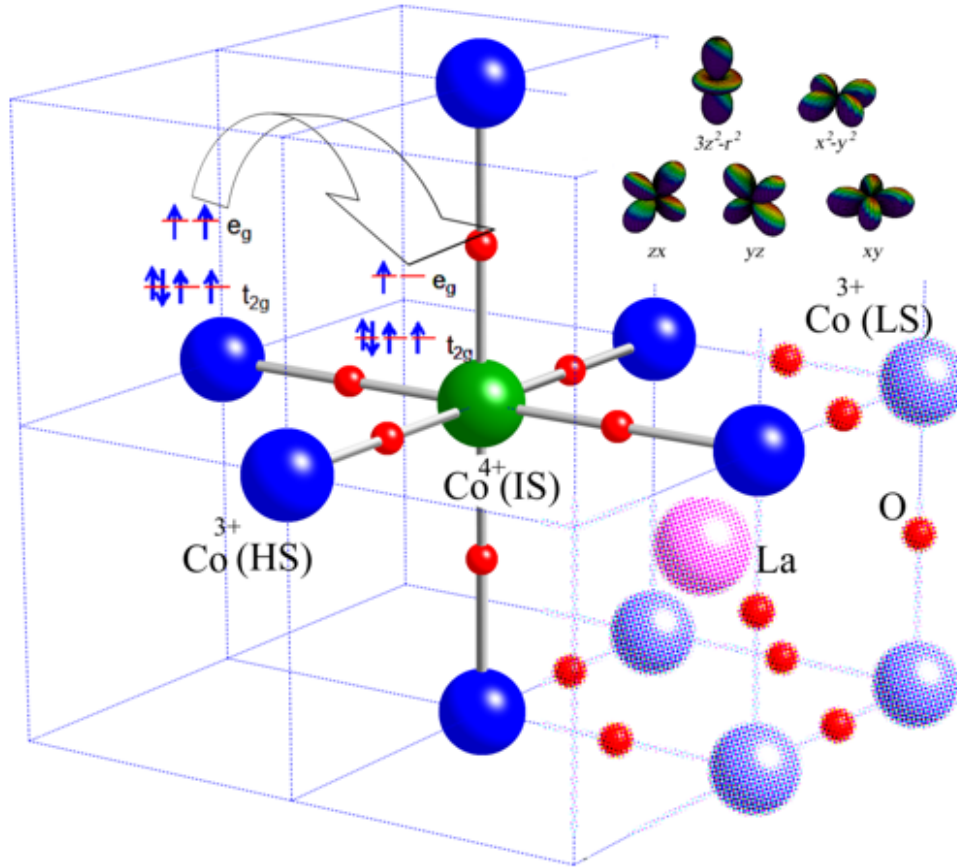


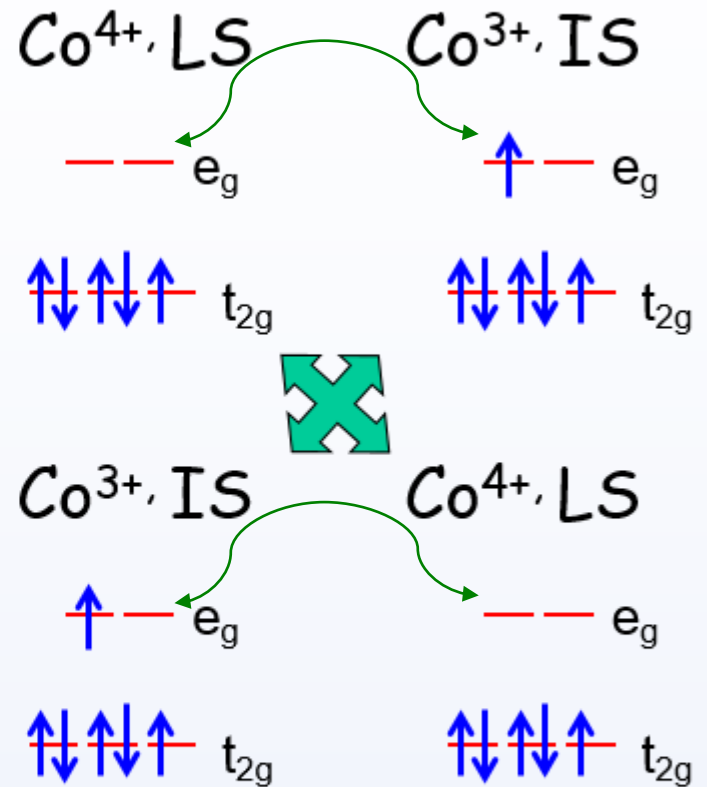
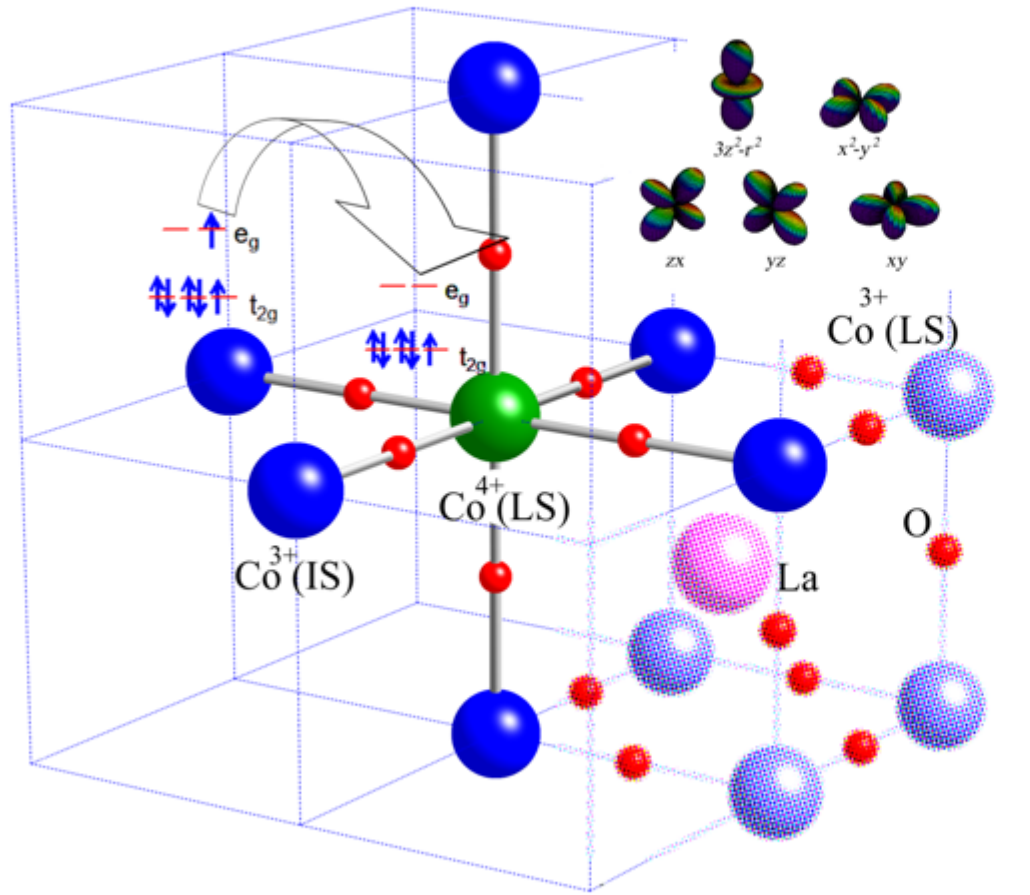
FIG. 1. (Color online) Scanning SQUID microscopy images of a LaCoO_3 single crystal taken at (a) 5, (b) 48, and (c) 81 K.

Magnetic polaron in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$



The first possible hopping image between IS Co^{4+} and HS Co^{3+}

Magnetic polaron in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$



The second possible hopping image between LS Co^{4+} and IS Co^{3+}

Магнитная восприимчивость

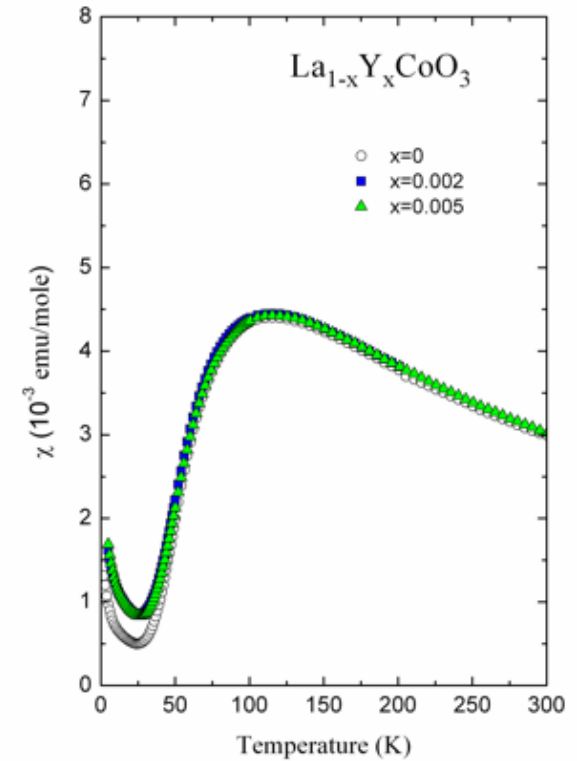
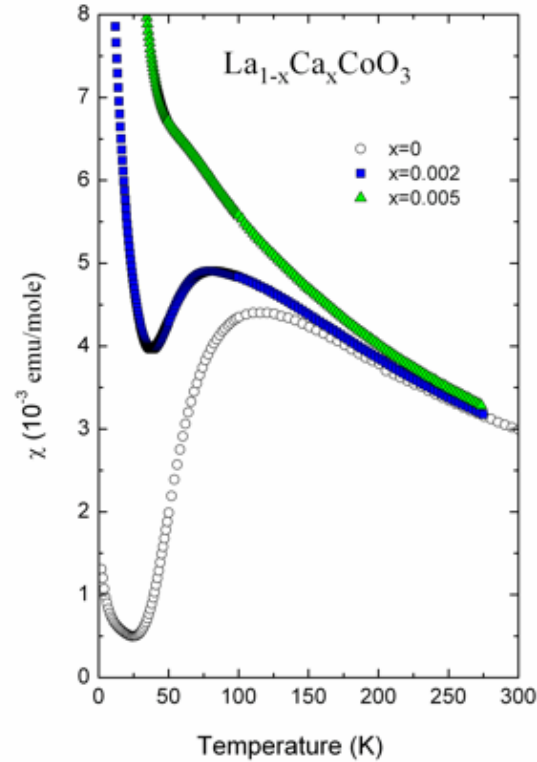
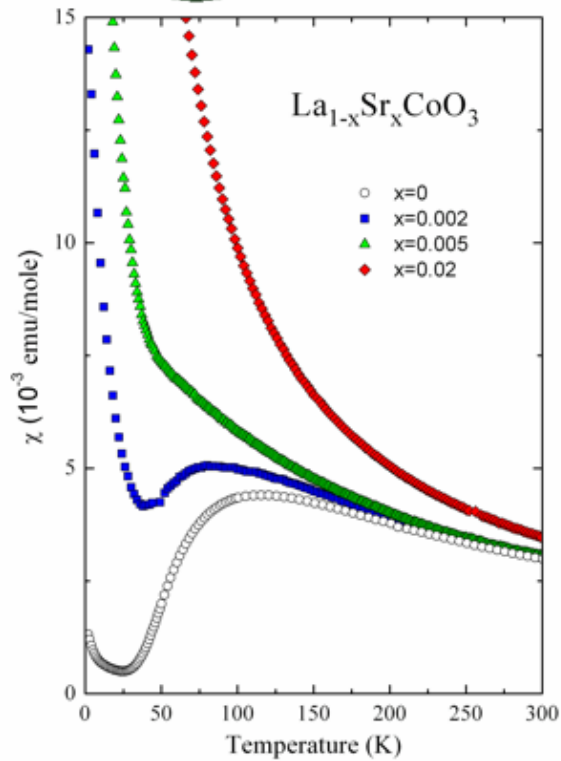
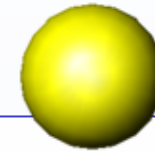
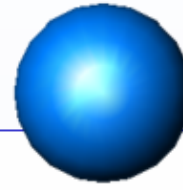
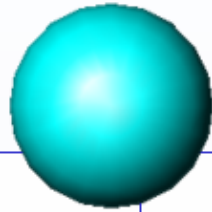
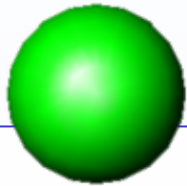
A comparison of radii for La^{3+} , Y^{3+} , Sr^{2+} , Ca^{2+}

La^{3+} 1.36Å

Sr^{2+} 1.44Å

Ca^{2+} 1.34Å

Y^{3+} 1.08Å



Фотозмиссионная электронная микроскопия

PHYSICAL REVIEW B 93, 155137 (2016)

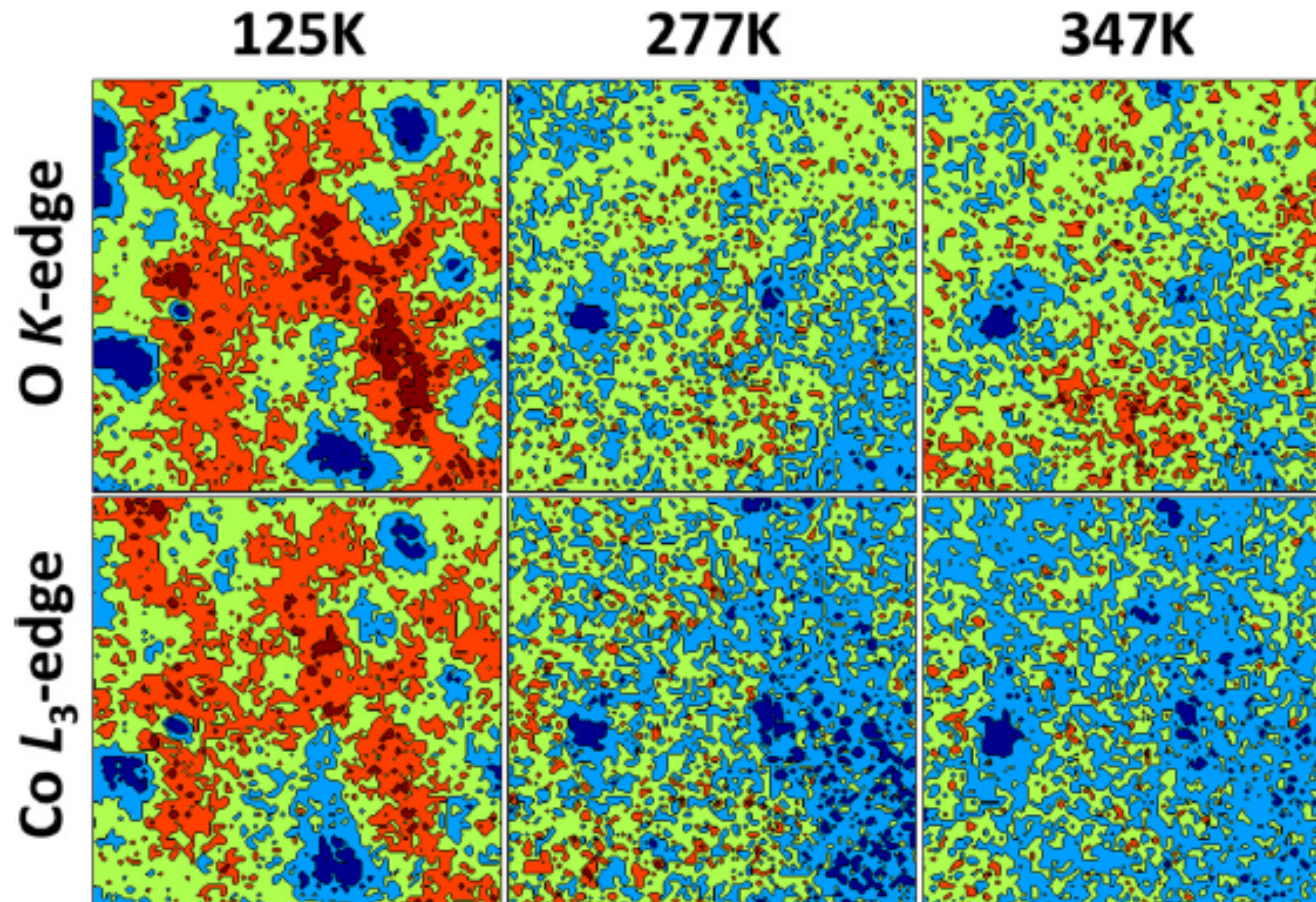
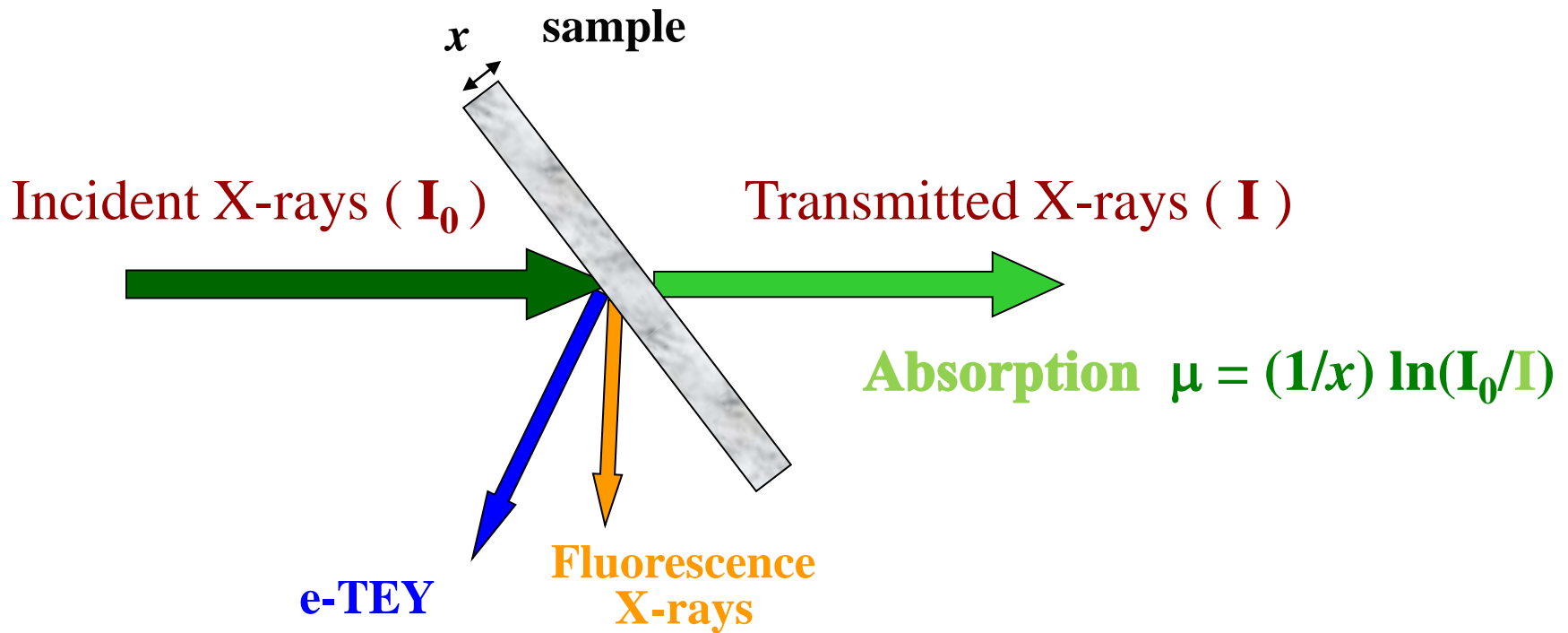
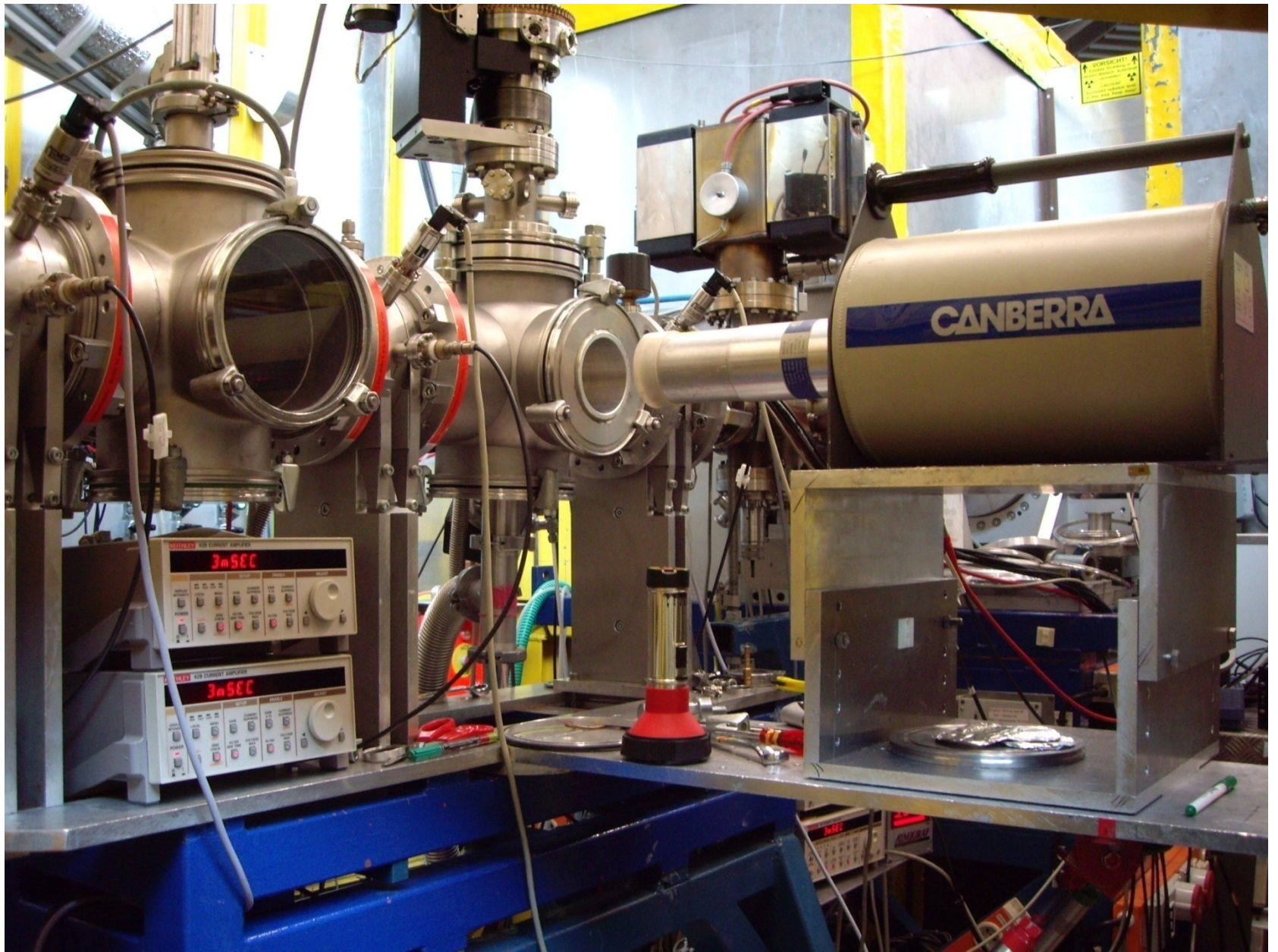


FIG. 4. Temperature evolution of resonant PEEM images ($2 \times 2 \mu\text{m}^2$ fragments) at the O K edge, ~ 529 eV (top row) and Co L_3 edge, ~ 779 eV (bottom row) from the second series of measurements.

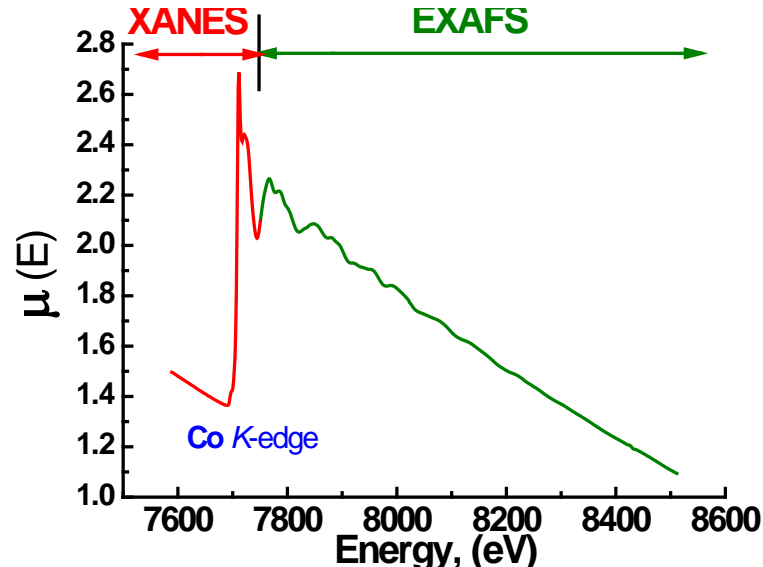
Рентгеновская спектроскопия поглощения



E4 beamline (HASYLAB, DESY)



Структура рентгеновского спектра поглощения (или XAFS) на K-крае Co



Околопороговая структура РСП (или XANES)

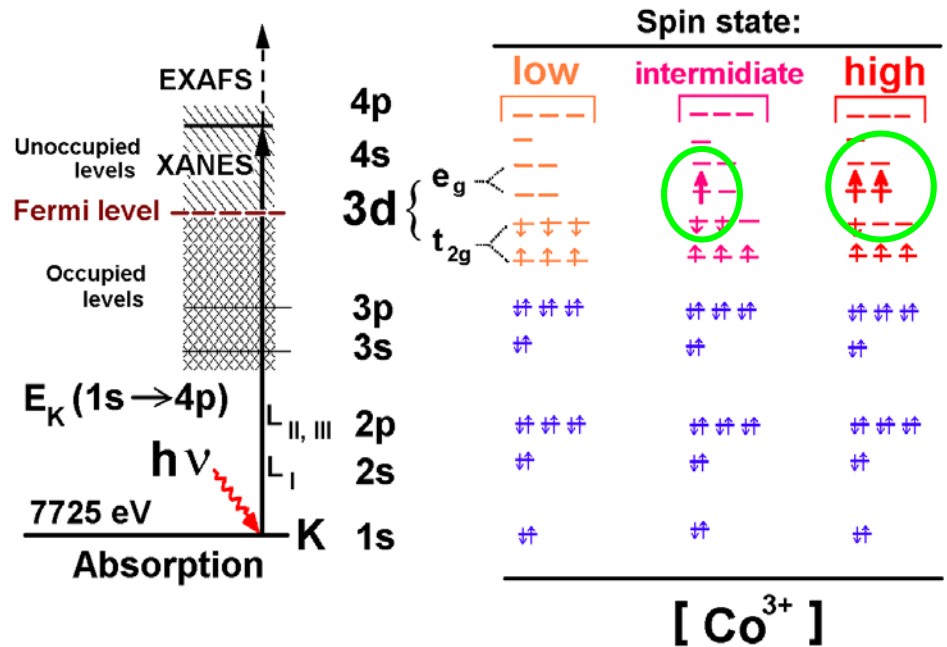
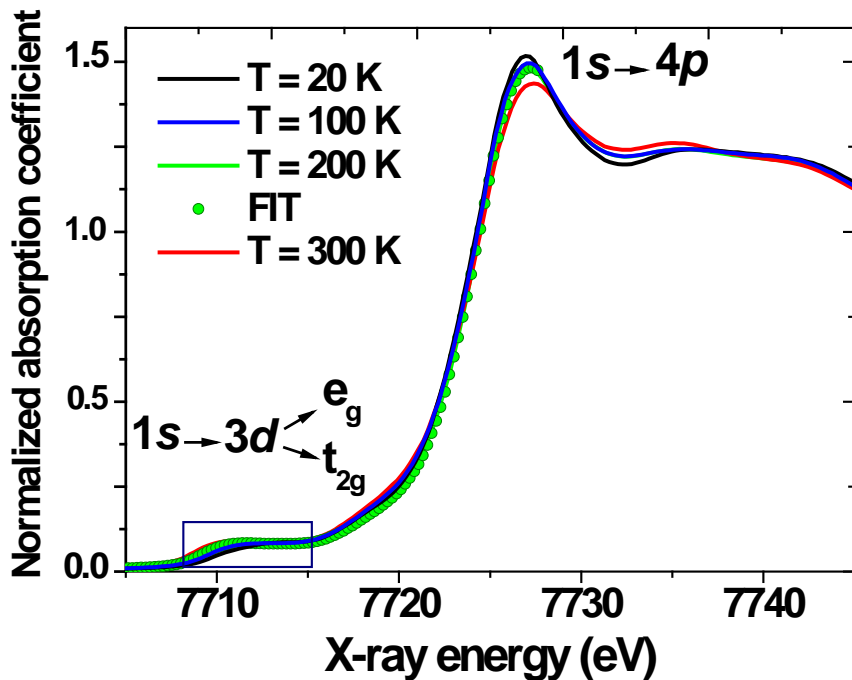
- локальная электронная структура
- валентность и плотность электронных состояний атома поглотителя
- информация о незаполненных состояниях вблизи уровня Ферми

Протяжённая тонкая структура РСП (или EXAFS)

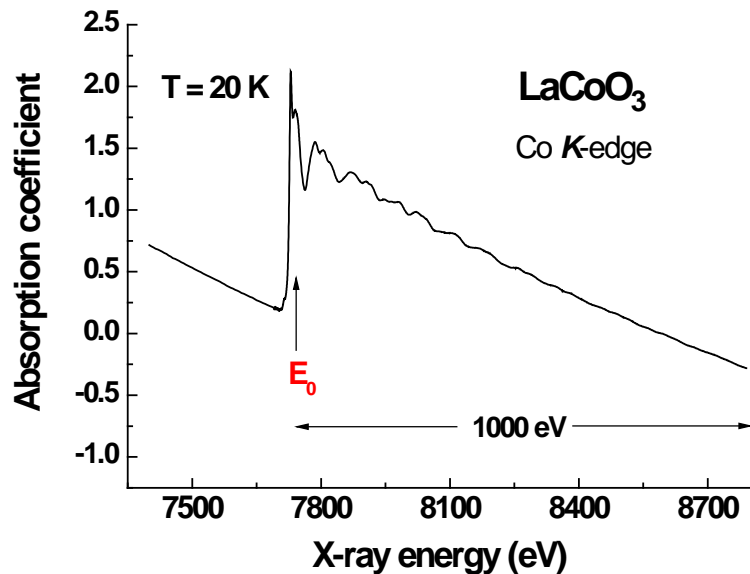
- локальная атомная структура
- длины связей между атомом поглотителем и его ближайшими соседями, фактор Дебая-Валлера
- тип атомов ближайших соседей и их координационное число

Структура рентгеновского спектра поглощения на K-крае кобальта в LaCoO_3

Процессы рентгеновского поглощения и возможные спиновые переходы в LaCoO_3



Экспериментальные рентгеновские спектры поглощения

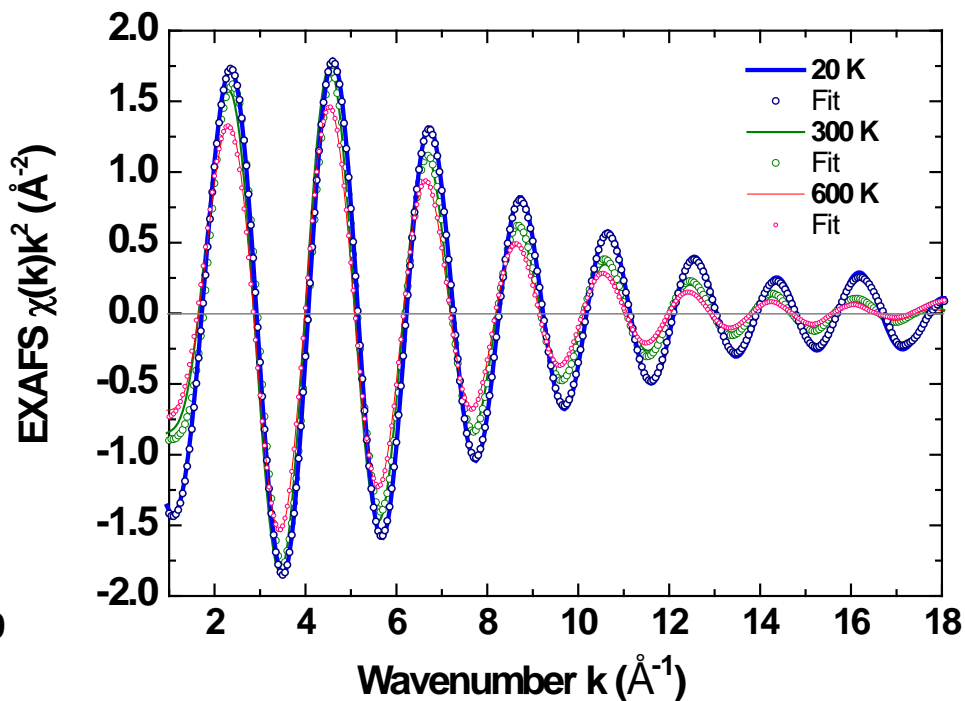
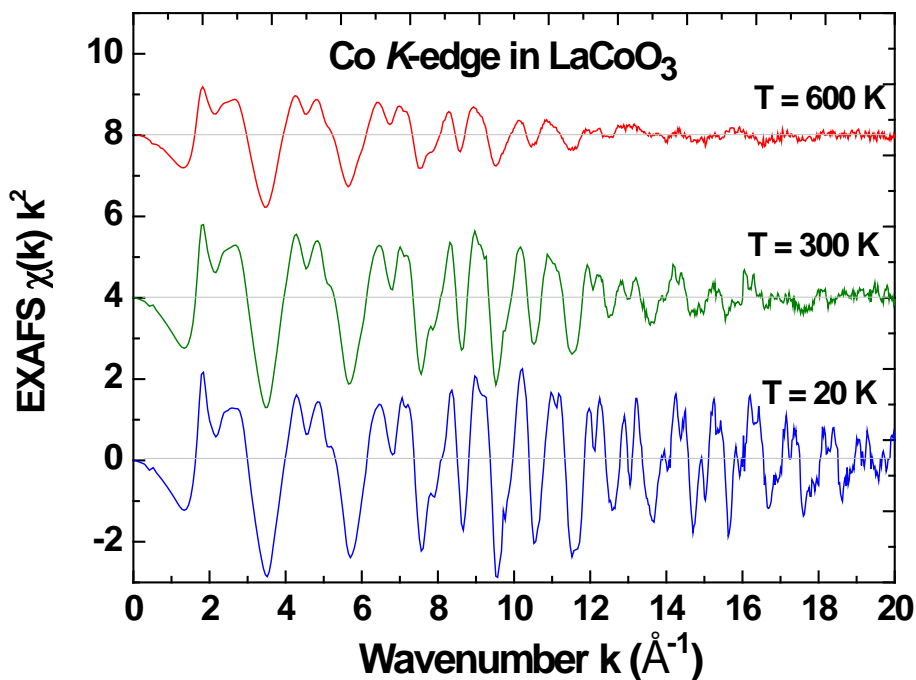


НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"

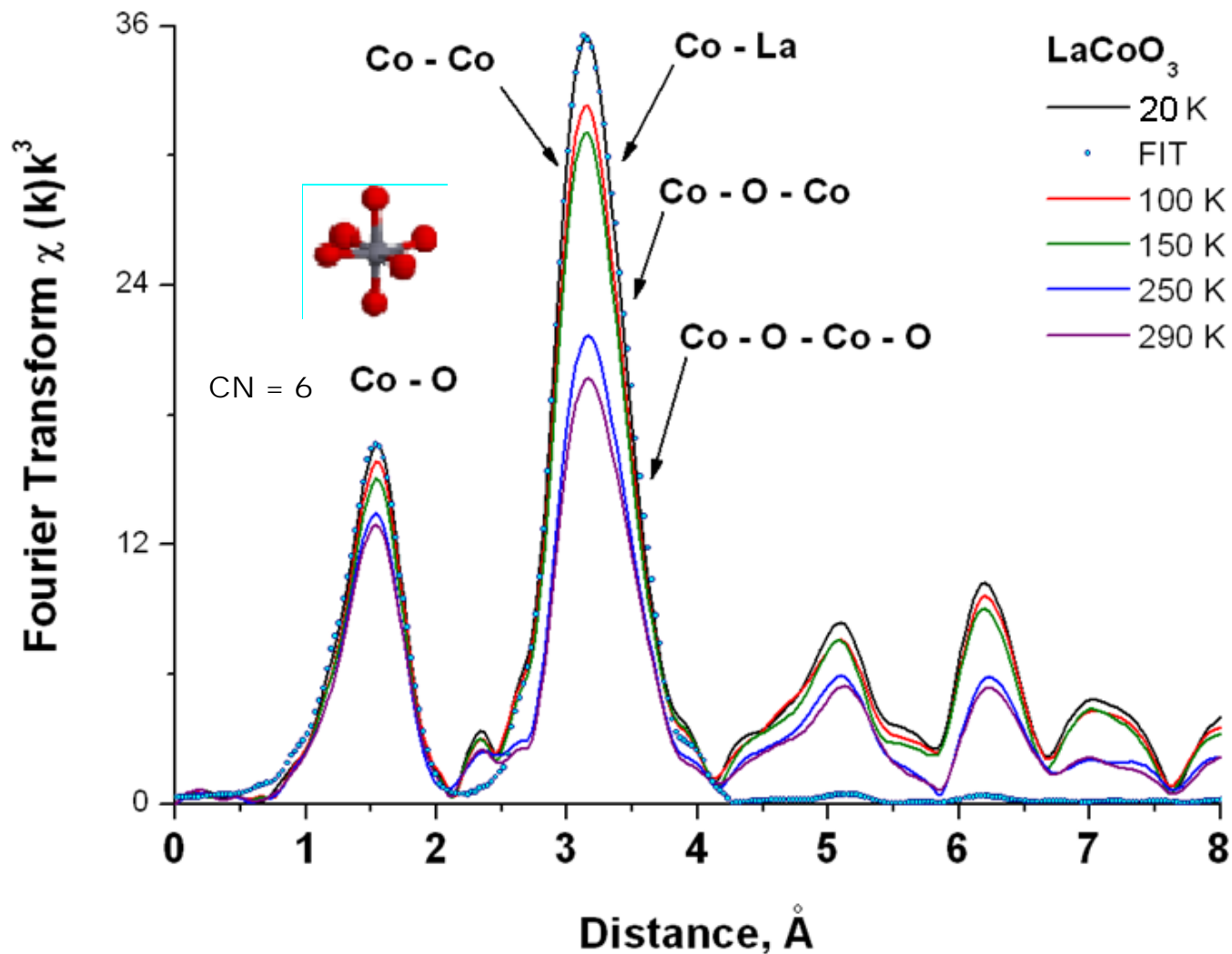


$$k = [(2me/\hbar^2)(E - E_0)]^{1/2}$$

$$\Delta r \sim \frac{\pi}{2k_{\text{max}}}$$

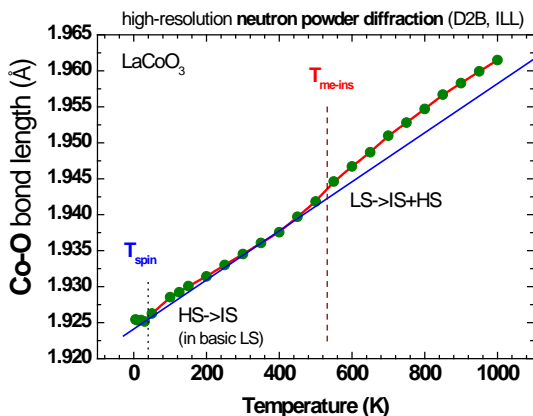
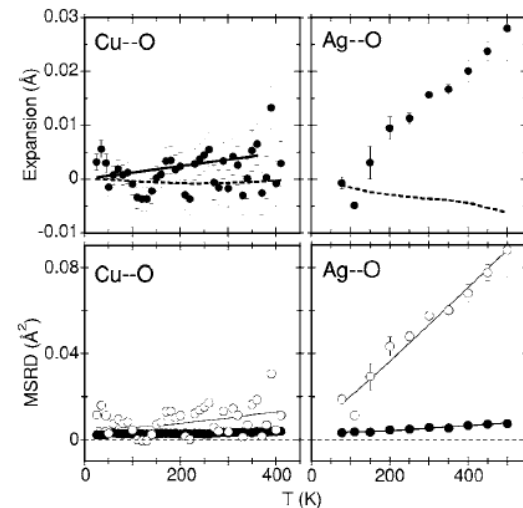
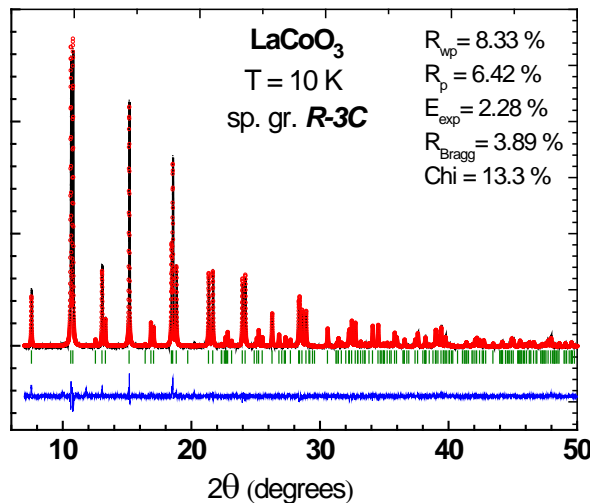
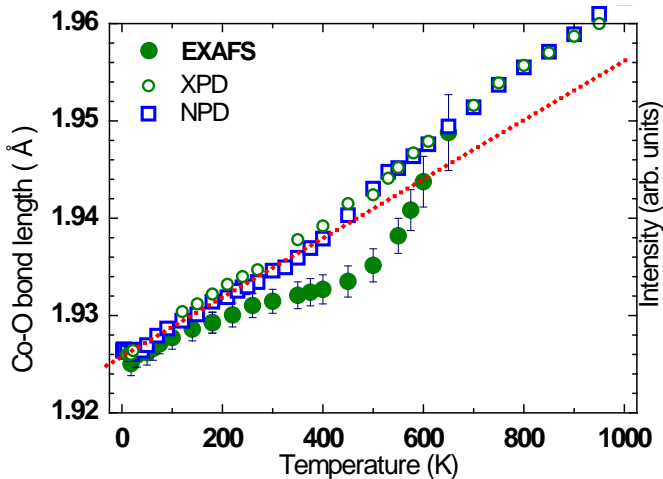


Фурье преобразование экспериментальной EXAFS $\chi(k)k^2$ на К-крае кобальта в интервале температур от 20 до 290 К



Совместный анализ дифракционных и EXAFS данных: Co-O расстояние (Å)

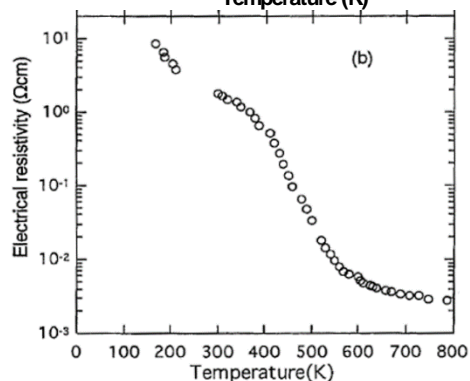
PHYSICAL REVIEW B 73, 214305 (2006)



Наблюдаемые и **ВЫЧИСЛЕННЫЕ** дифрактограммы показаны соответственно сплошными линиями и точками
Вертикальные палочки – положение расчётных рефлексов в рамках пр. гр. R-3c
Кривая внизу показывает разницу между вычисленными и экспериментальными дифрактограммами

$$R(\text{Co}^{3+})_{\text{LS}} = 0.545 \text{ \AA} \quad R(\text{Co}^{3+})_{\text{IS}} = 0.56 \text{ \AA} \quad R(\text{Co}^{3+})_{\text{HS}} = 0.61 \text{ \AA}$$

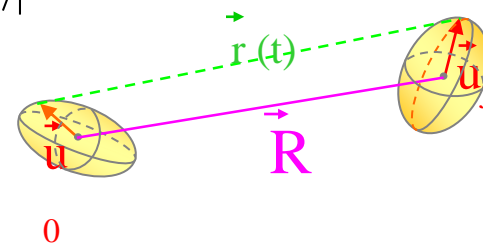
FIG. 8. First shell of M atoms (M=Cu,Ag) in Cu₂O (left) and Ag₂O (right). Top panels: Thermal expansion measured by EXAFS (dots) and diffraction (dashed lines); the continuous line for Cu₂O is a linear best fit to EXAFS data. Bottom panels: parallel MSRD $\langle \Delta u_{\parallel}^2 \rangle$ (closed circles) and perpendicular MSRD $\langle \Delta u_{\perp}^2 / 2 \rangle$ (open circles).



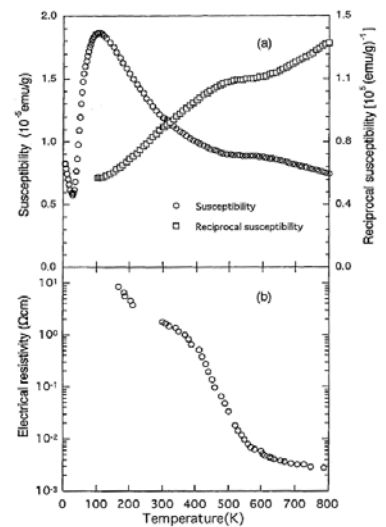
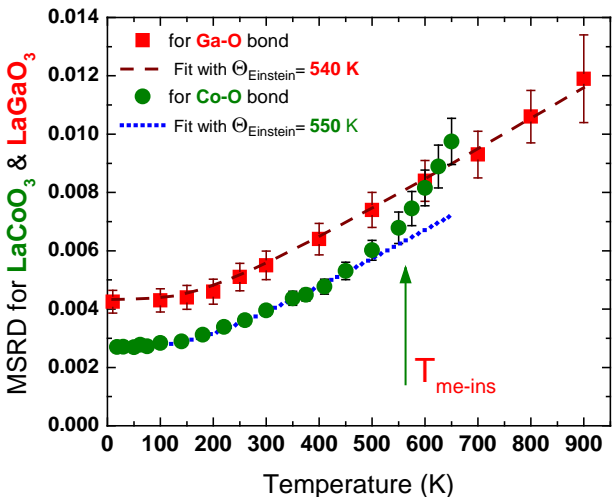
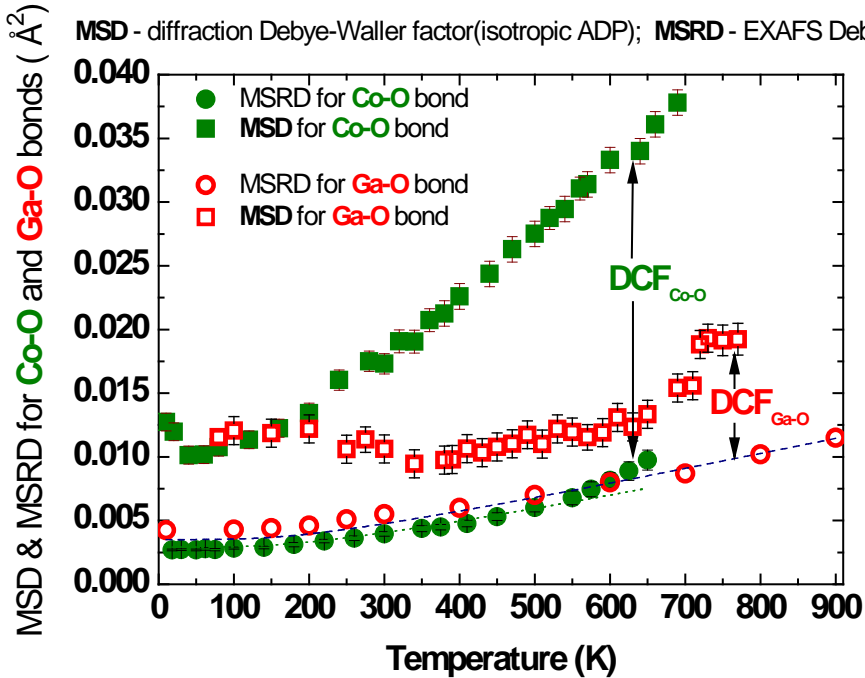
EXAFS
 $\langle r \rangle = \langle |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| \rangle$

Diffraction
 $R_c = \langle |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| \rangle$

$$\langle r \rangle = R_c + \frac{\langle \Delta u_{\perp}^2 \rangle}{2R_c}$$



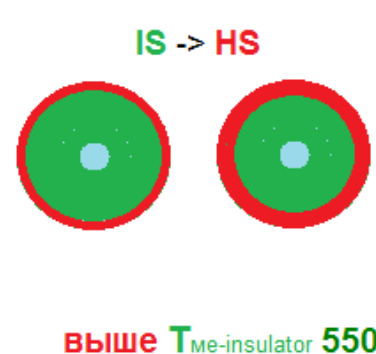
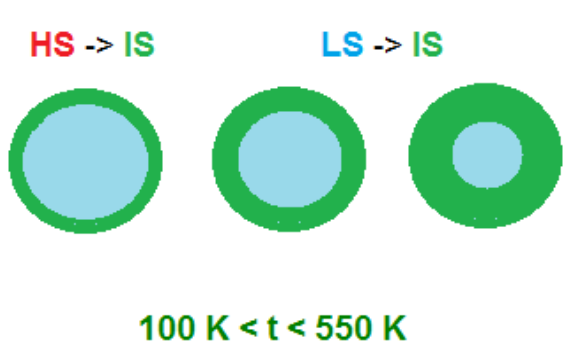
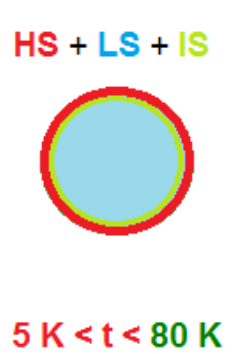
Совместный анализ дифракционных и EXAFS данных: изотропные тепловые параметры смещения (ADP или MSD) с EXAFS Дебай-Валлер фактором (MSRD) для Co/Ga-O связи



DCF (displacement correlation function) – есть корреляционная функция, анализ температурного поведения которой позволяет понять насколько велико корреляционное движение кобальта и ближайших к нему атомов кислорода и, как следствие, оценить жёсткость химической ковалентной связи между кобальтом и ближайшими атомами кислорода.

Порошинки ~0.5 мкм

HS_(поверхность) + LS_(основная фаза) + IS_(между HS и LS)

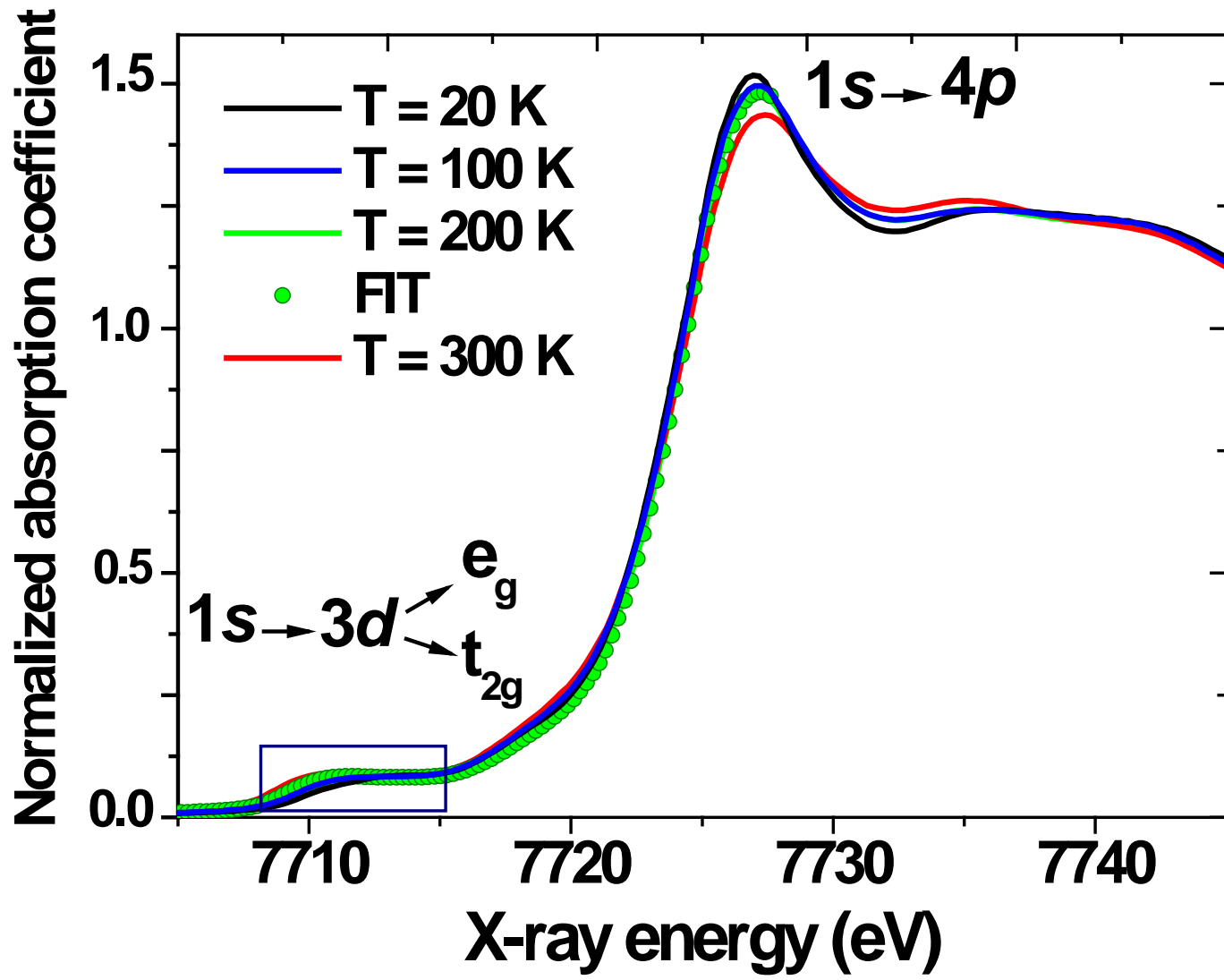


$$R(\text{Co}^{3+})_{\text{LS}} = 0.545 \text{ \AA}$$

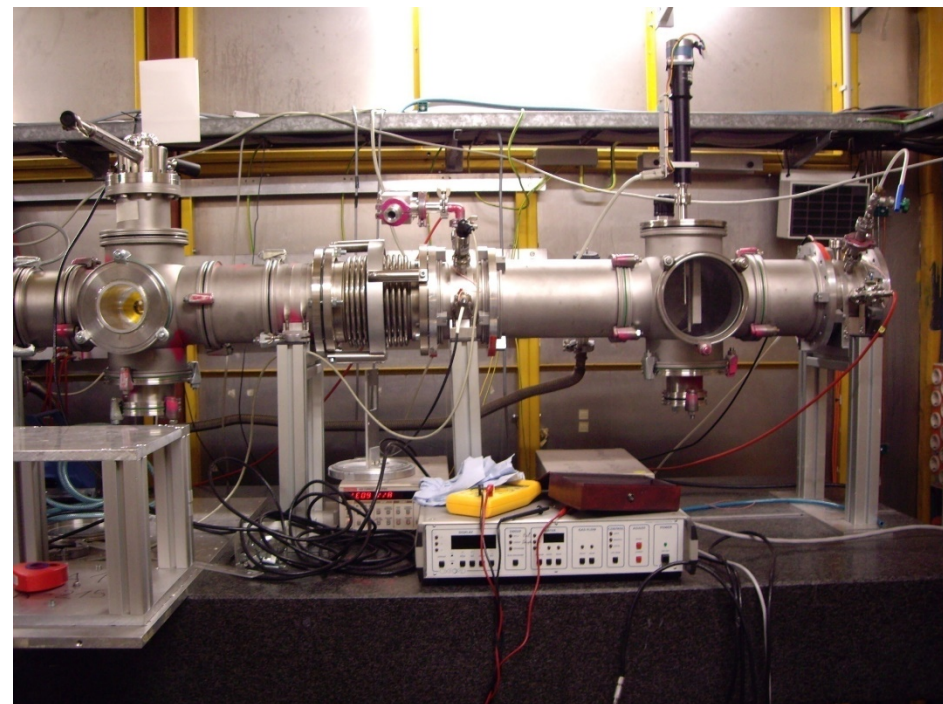
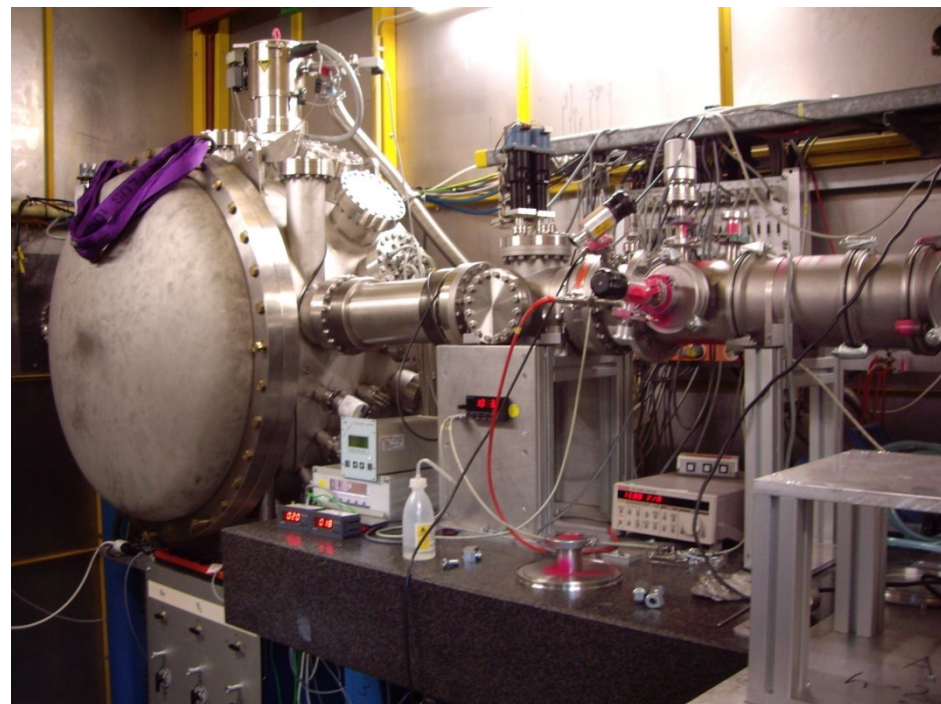
$$R(\text{Co}^{3+})_{\text{IS}} = 0.56 \text{ \AA}$$

$$R(\text{Co}^{3+})_{\text{HS}} = 0.61 \text{ \AA}$$

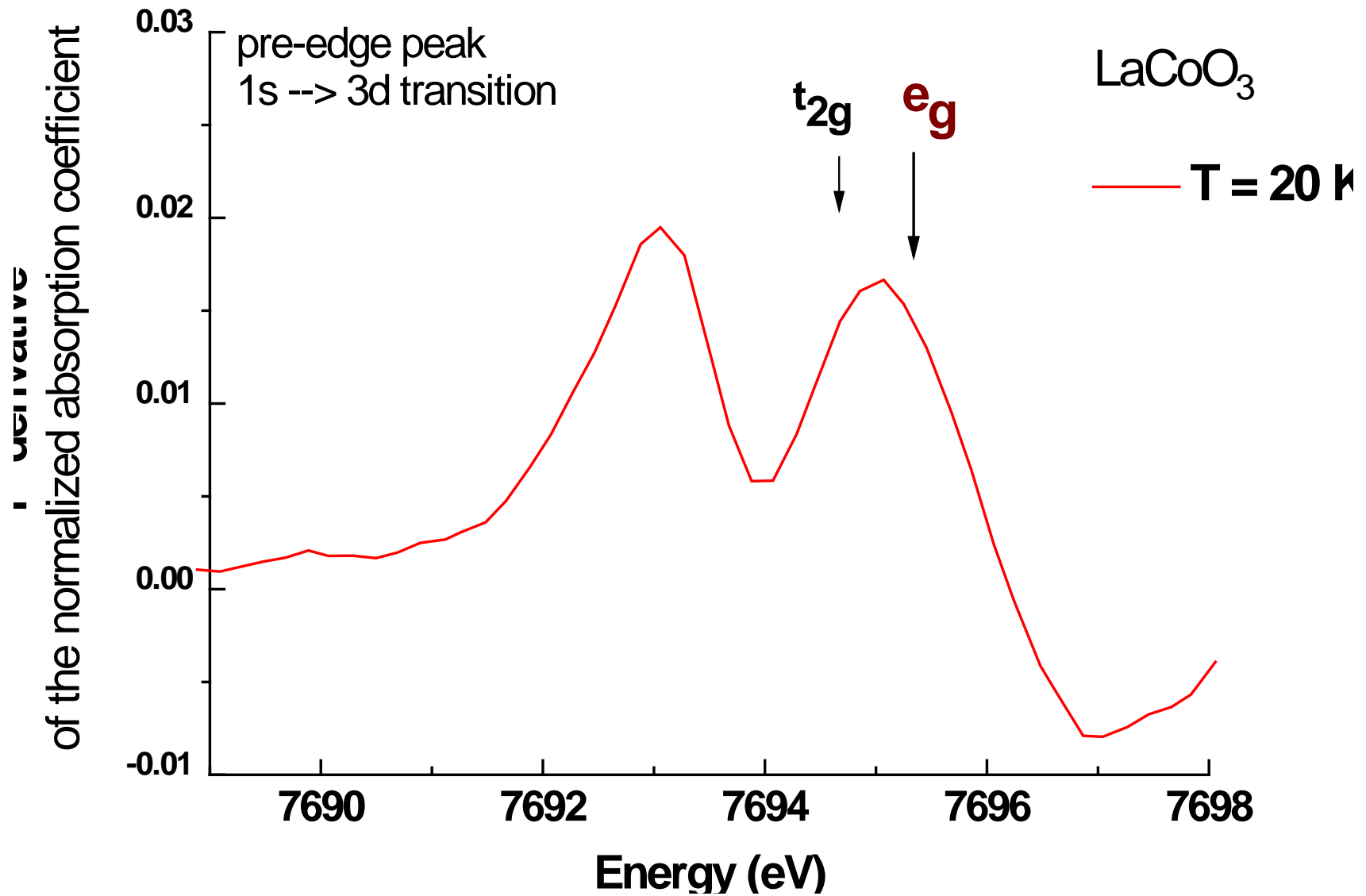
Околопороговая структура рентгеновского спектра поглощения (XANES) на K -крае кобальта в LaCoO_3



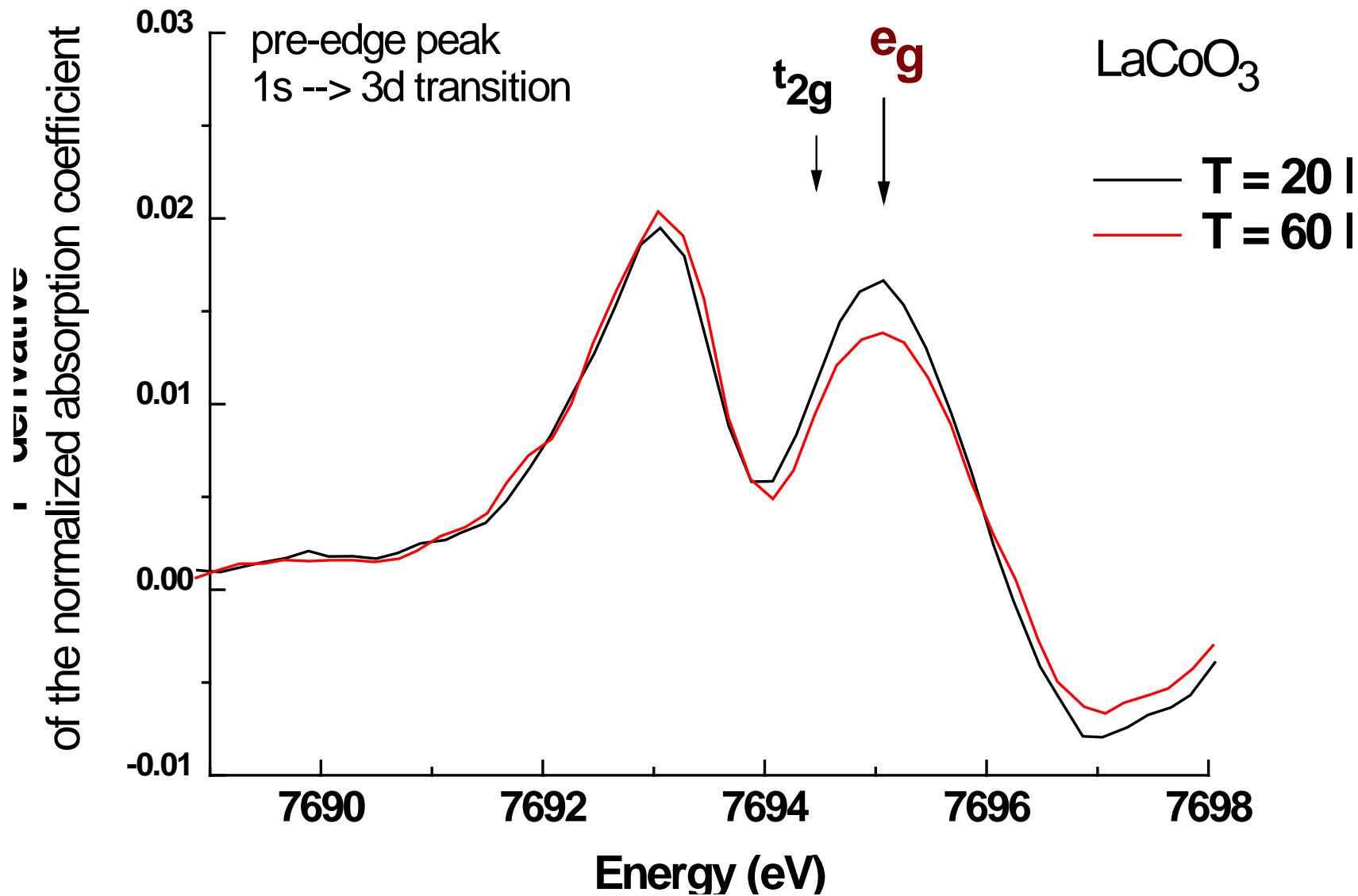
A1 beamline (HASYLAB, DESY)



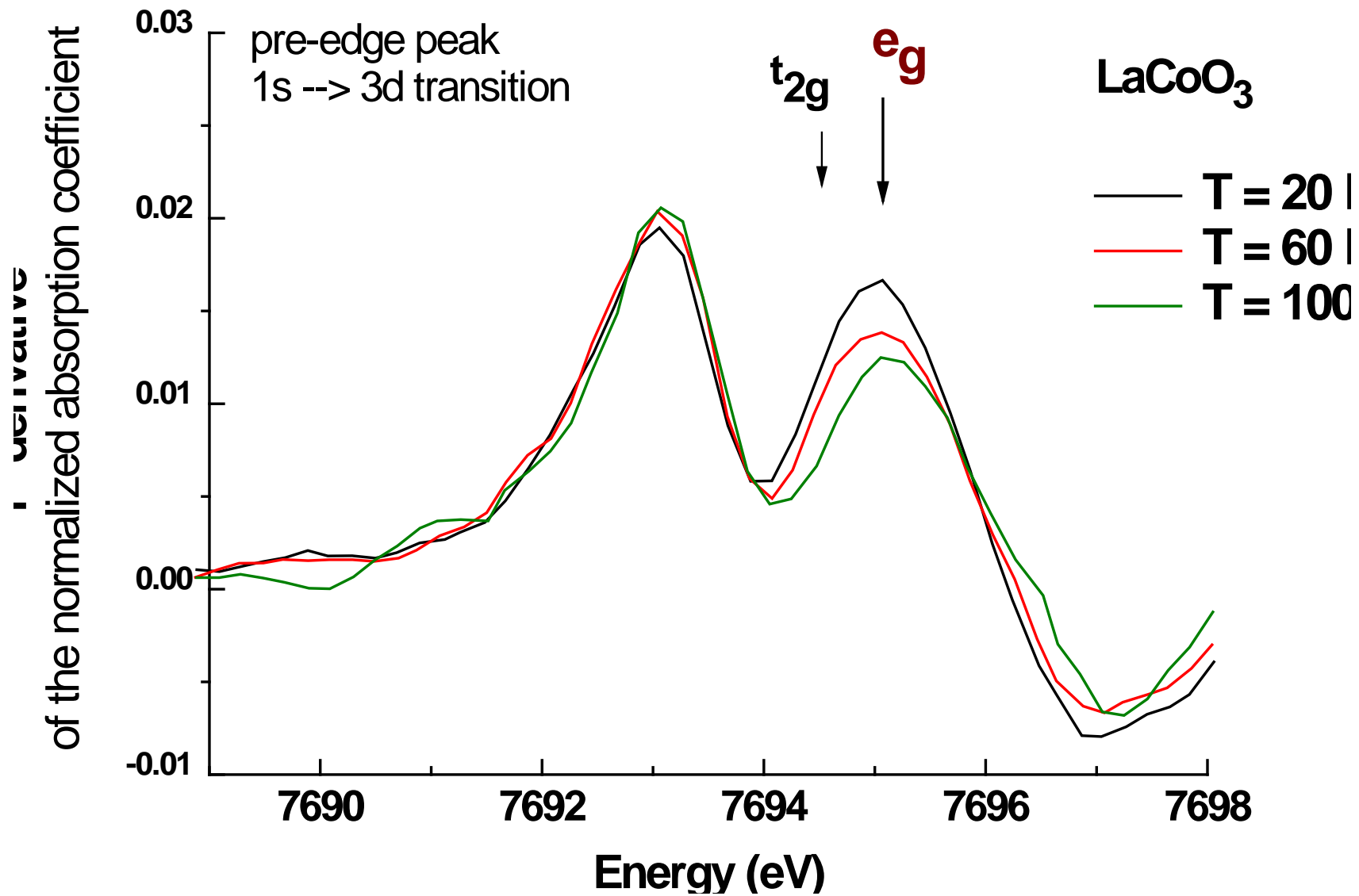
XANES Analysis: Normalized and Curve fitting



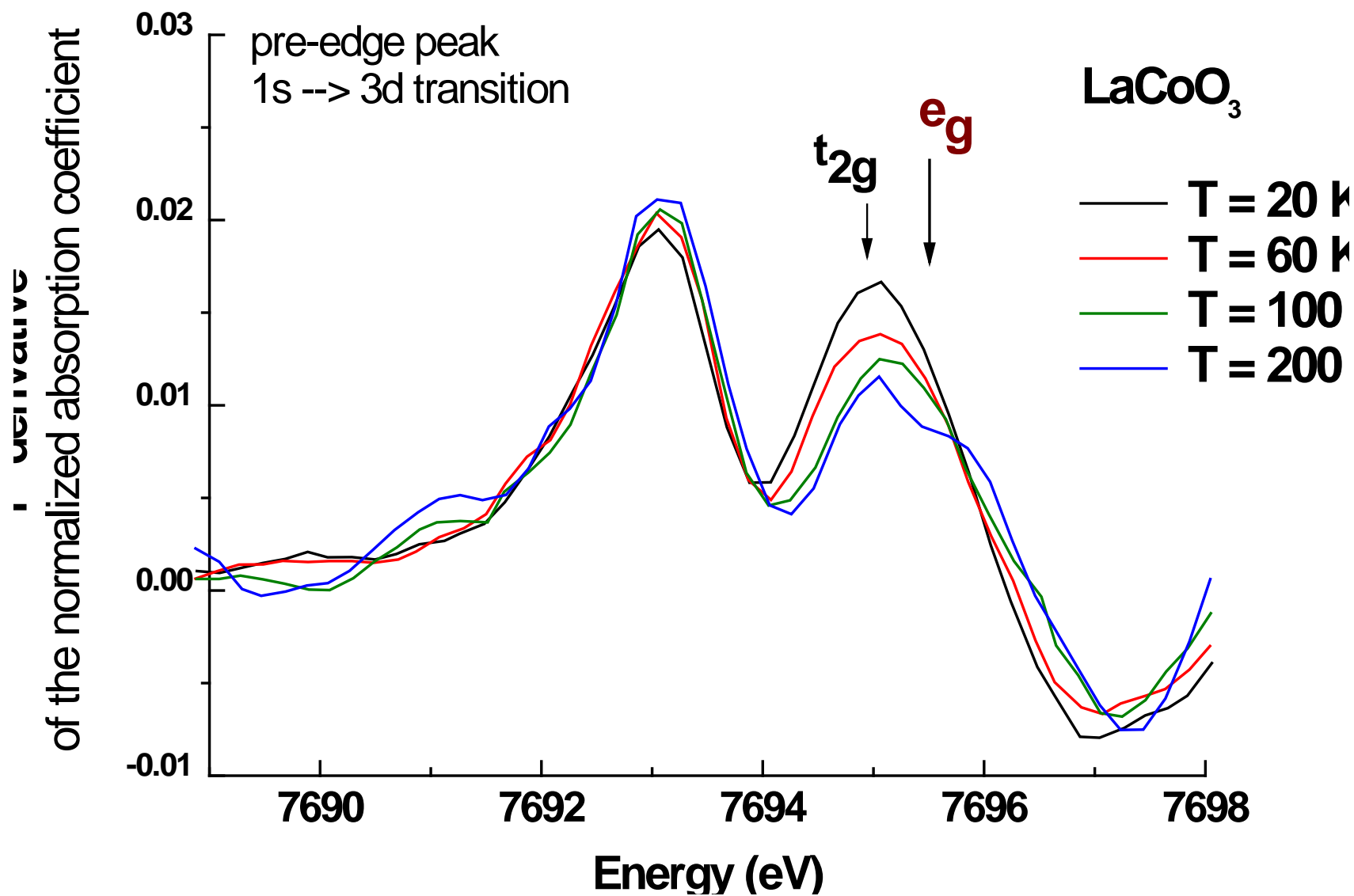
XANES Analysis: Normalized and Curve fitting

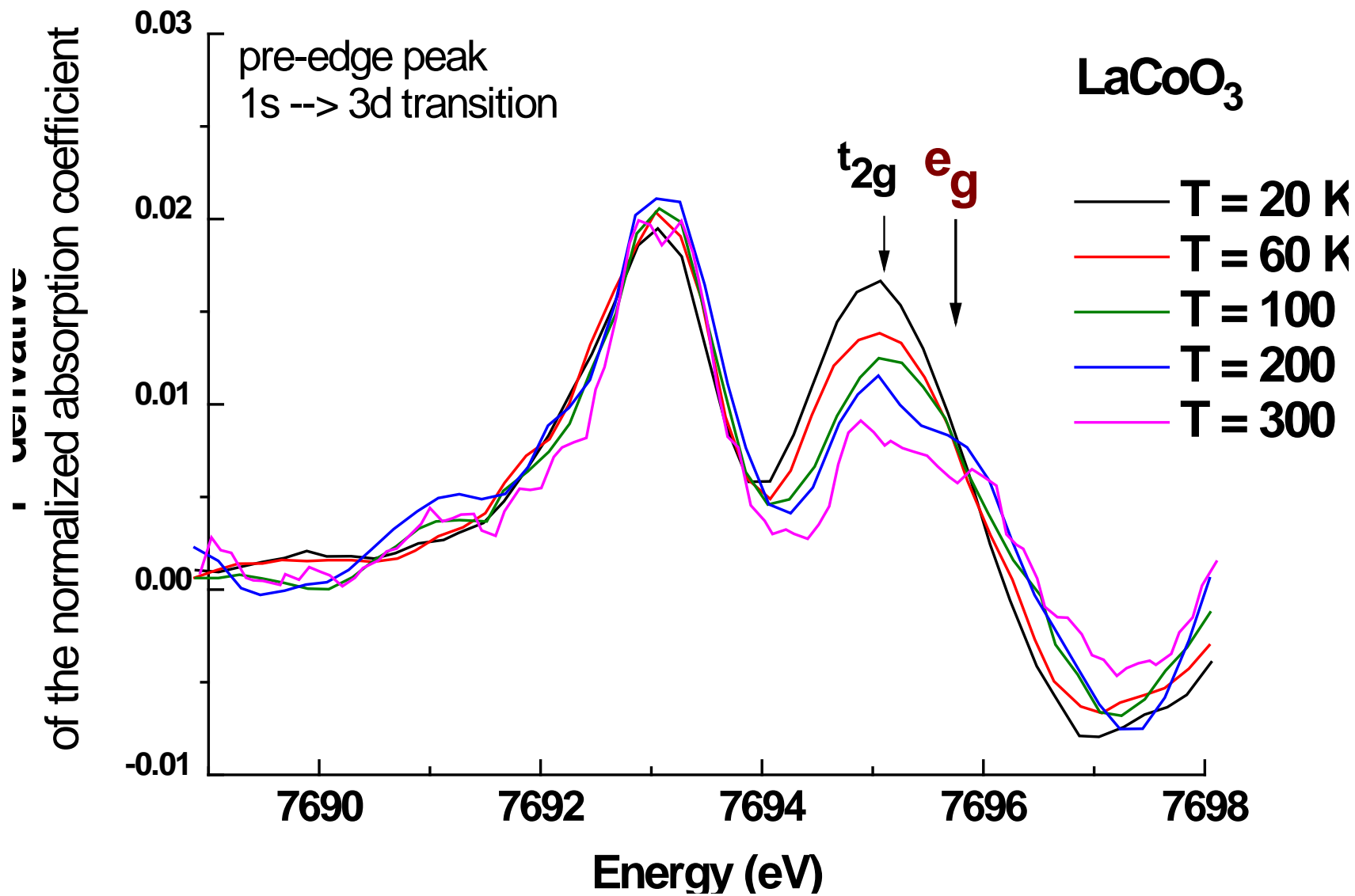


XANES Analysis: Normalized and Curve fitting

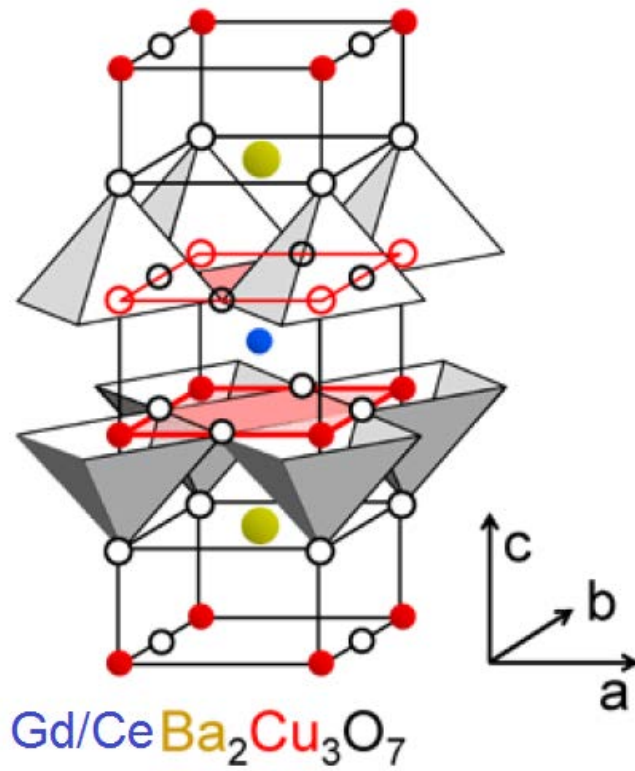
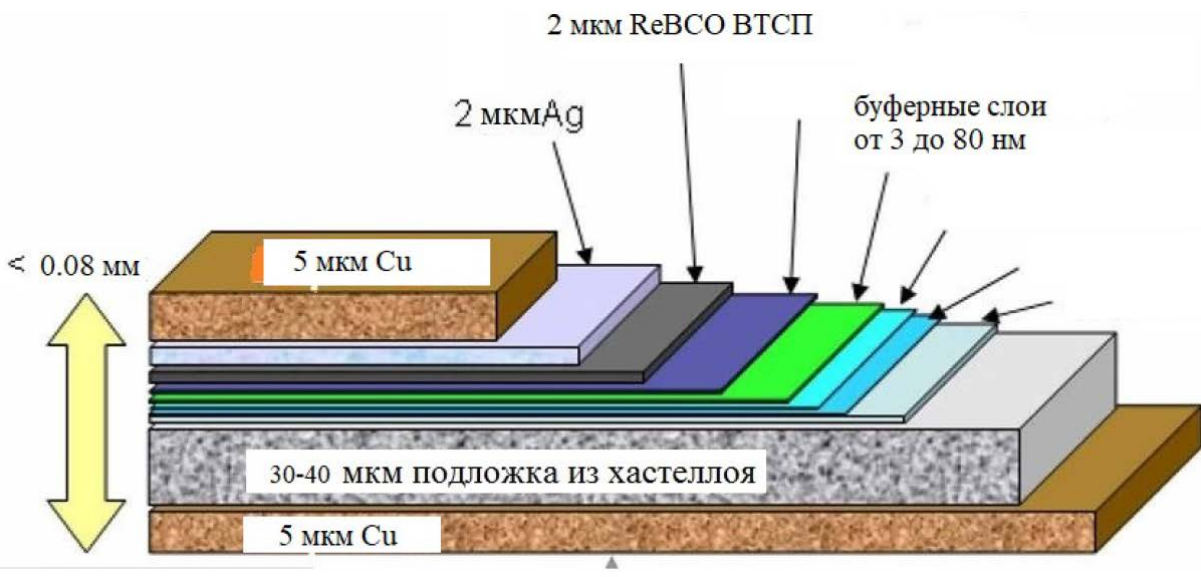


XANES Analysis: Normalized and Curve fitting





Кристаллическая структура ВТСП лент

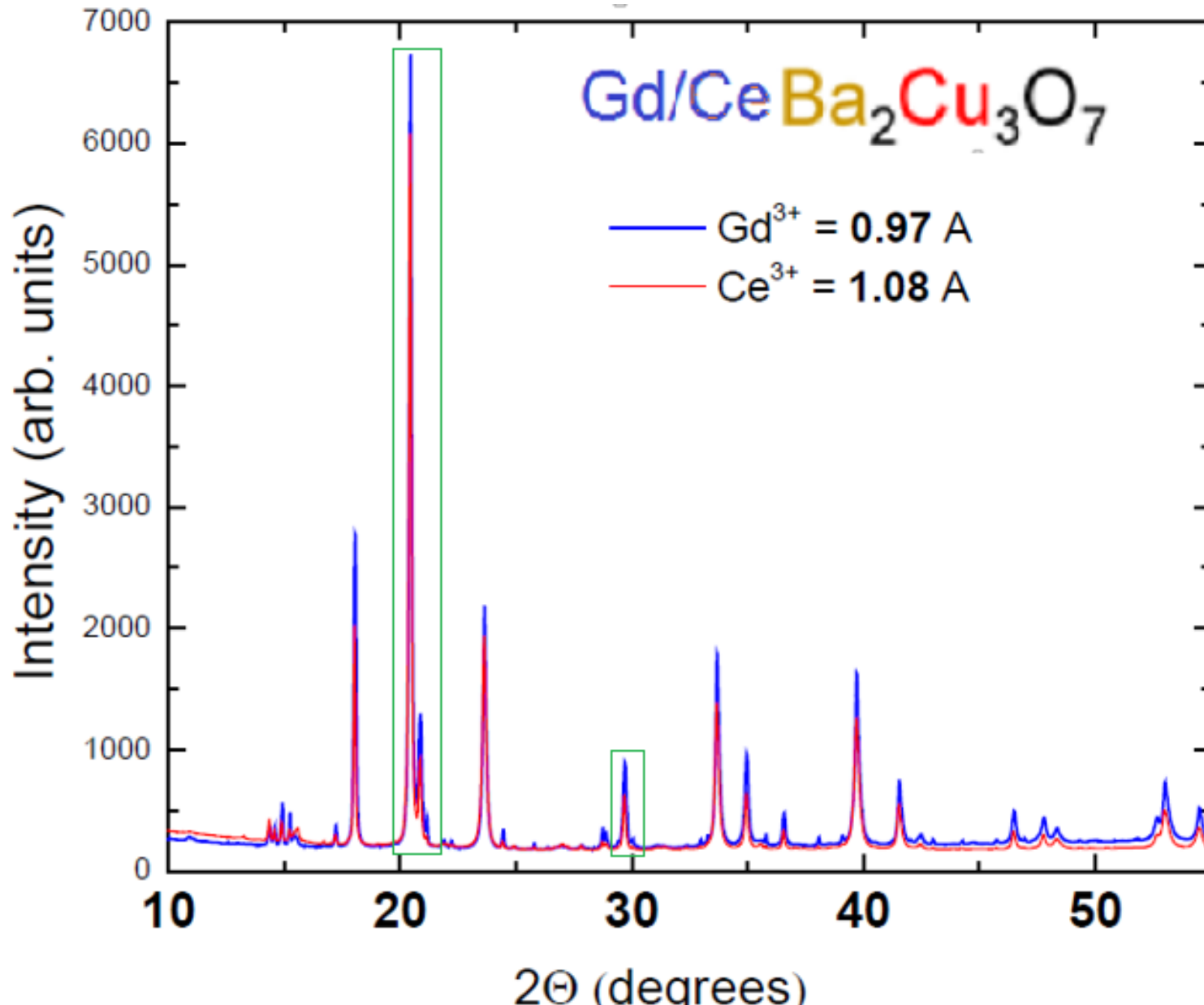


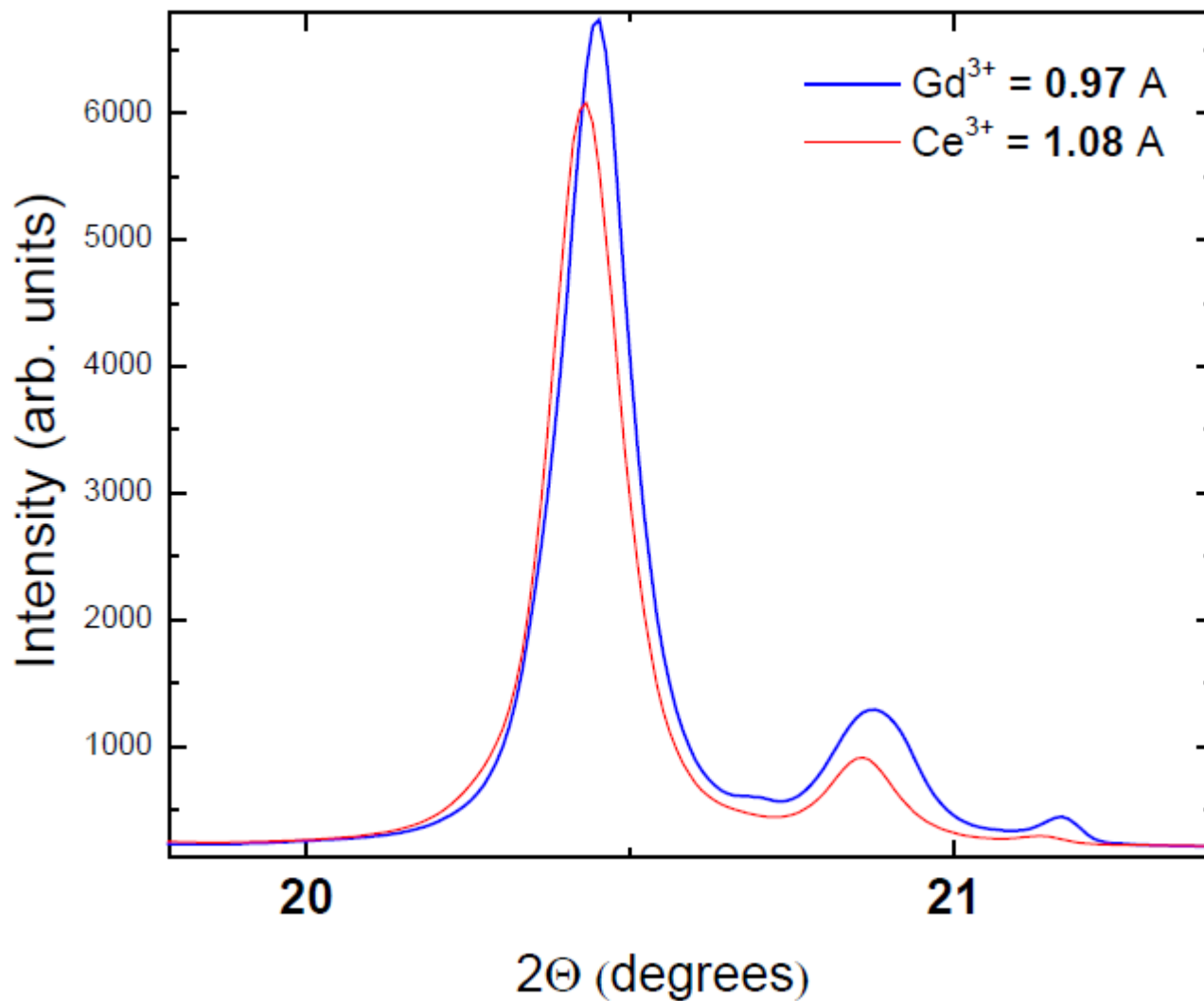
Орторомбическая sp.gr. Rm (47)

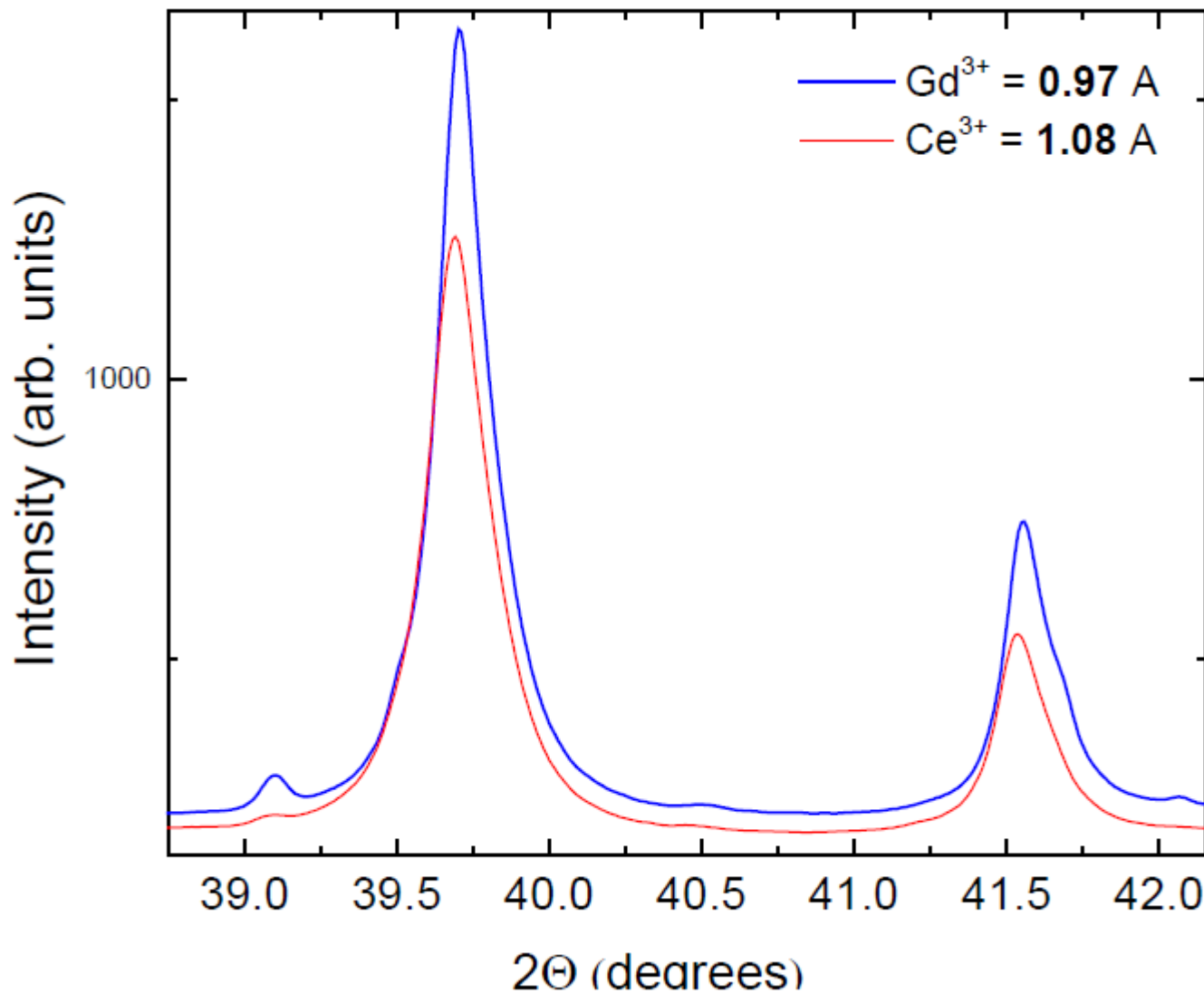
Кристаллическая структура ВТСТ лент



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"



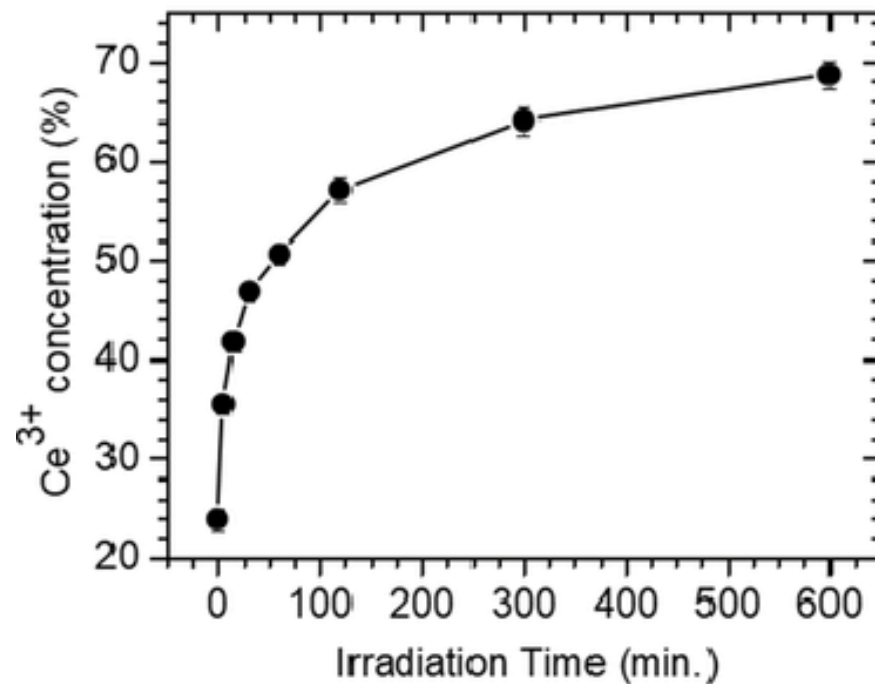
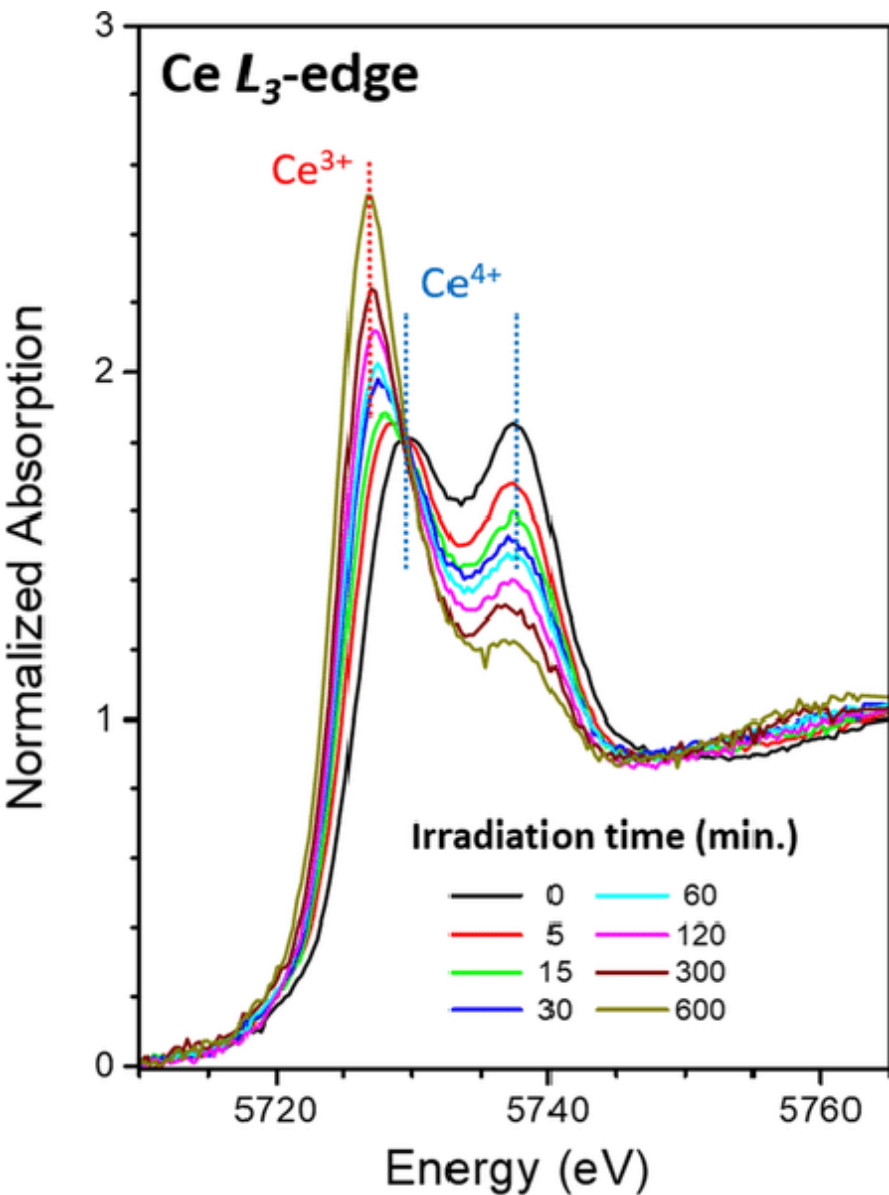




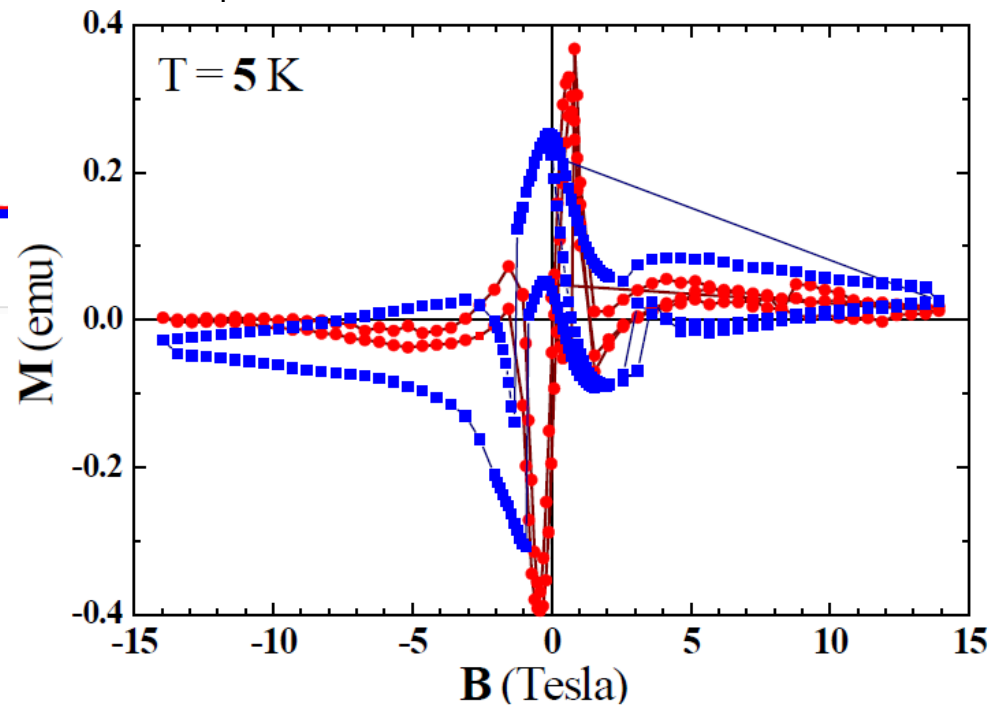
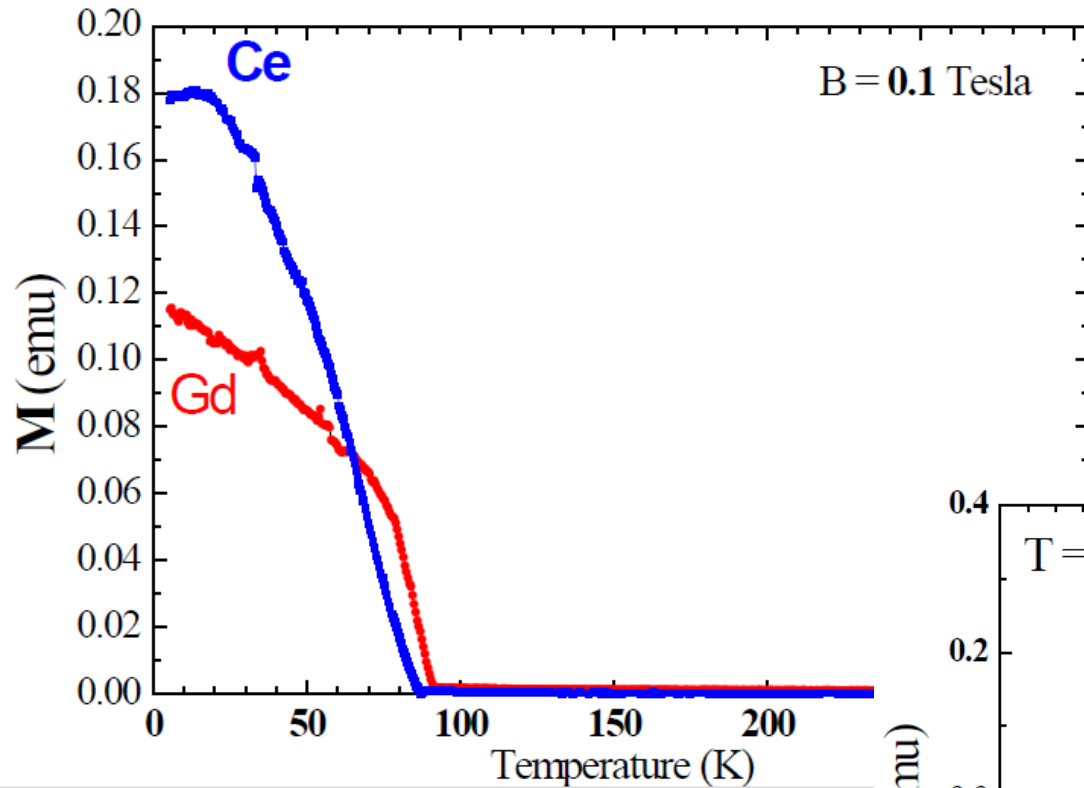
XANES Analysis



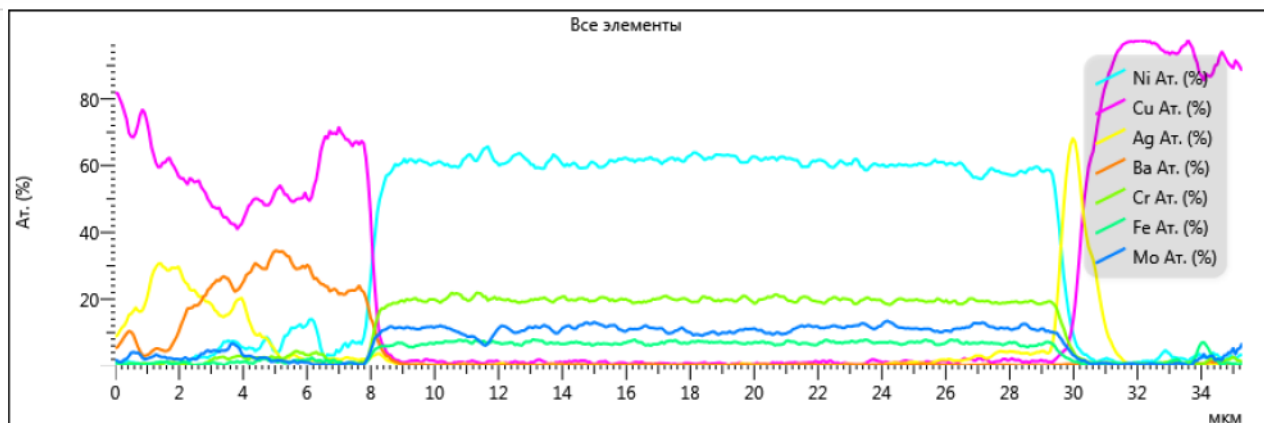
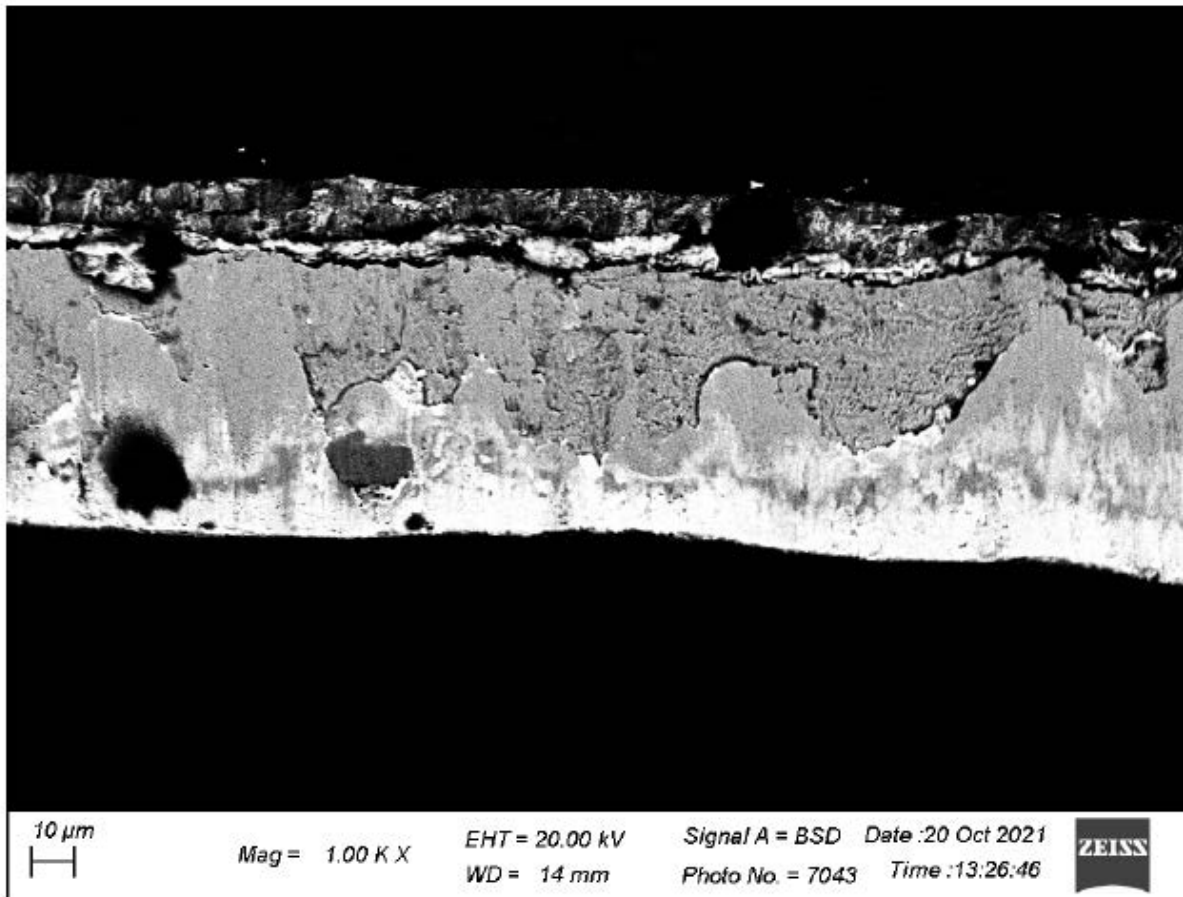
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
"КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ"



Кривые намагниченности и петли $\text{Ce}/\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$



Оптическая микроскопия

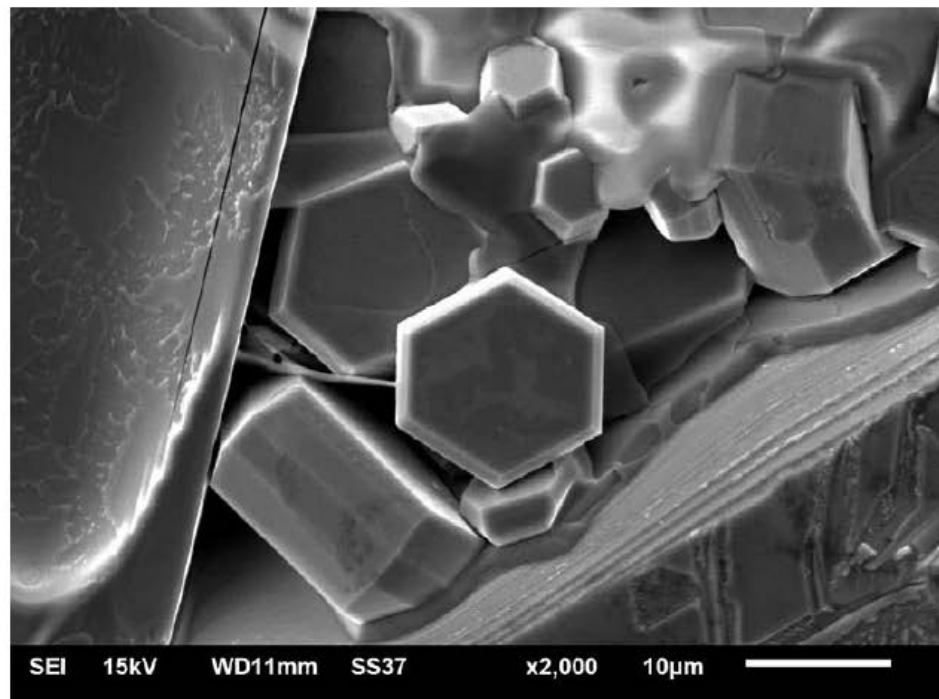
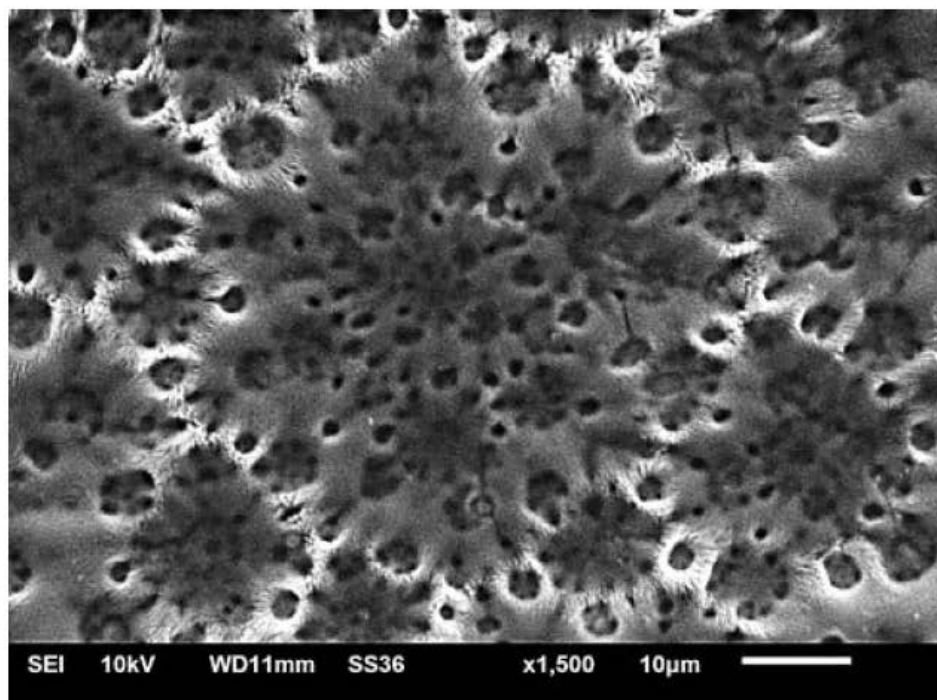


ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

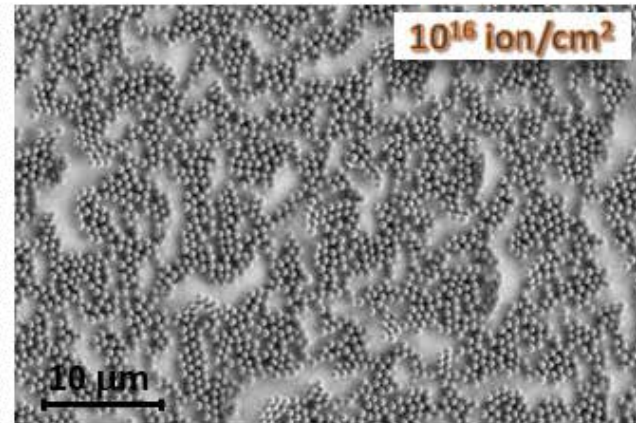
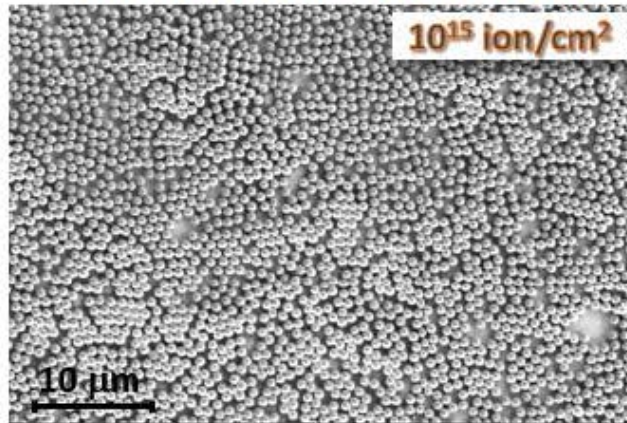
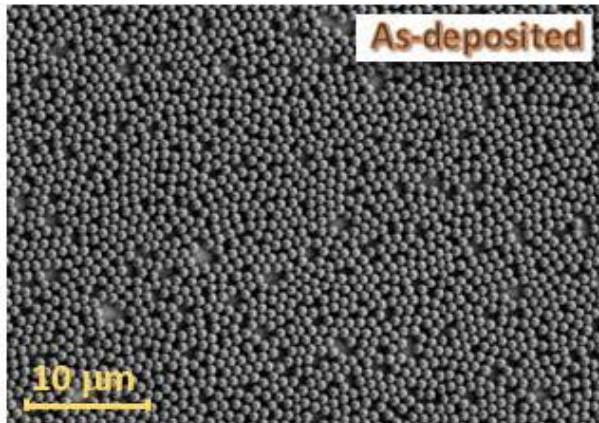


Программно-аппаратный комплекс для микроанализа и морфологического анализа поверхности (растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6610 LV)

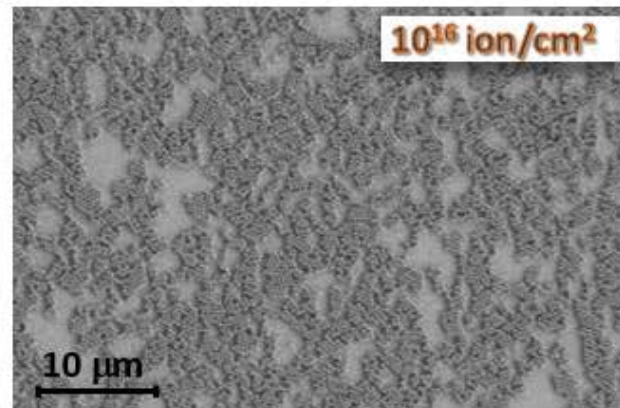
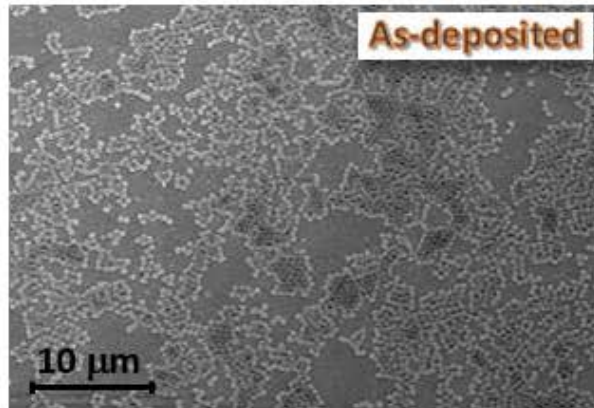
ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ



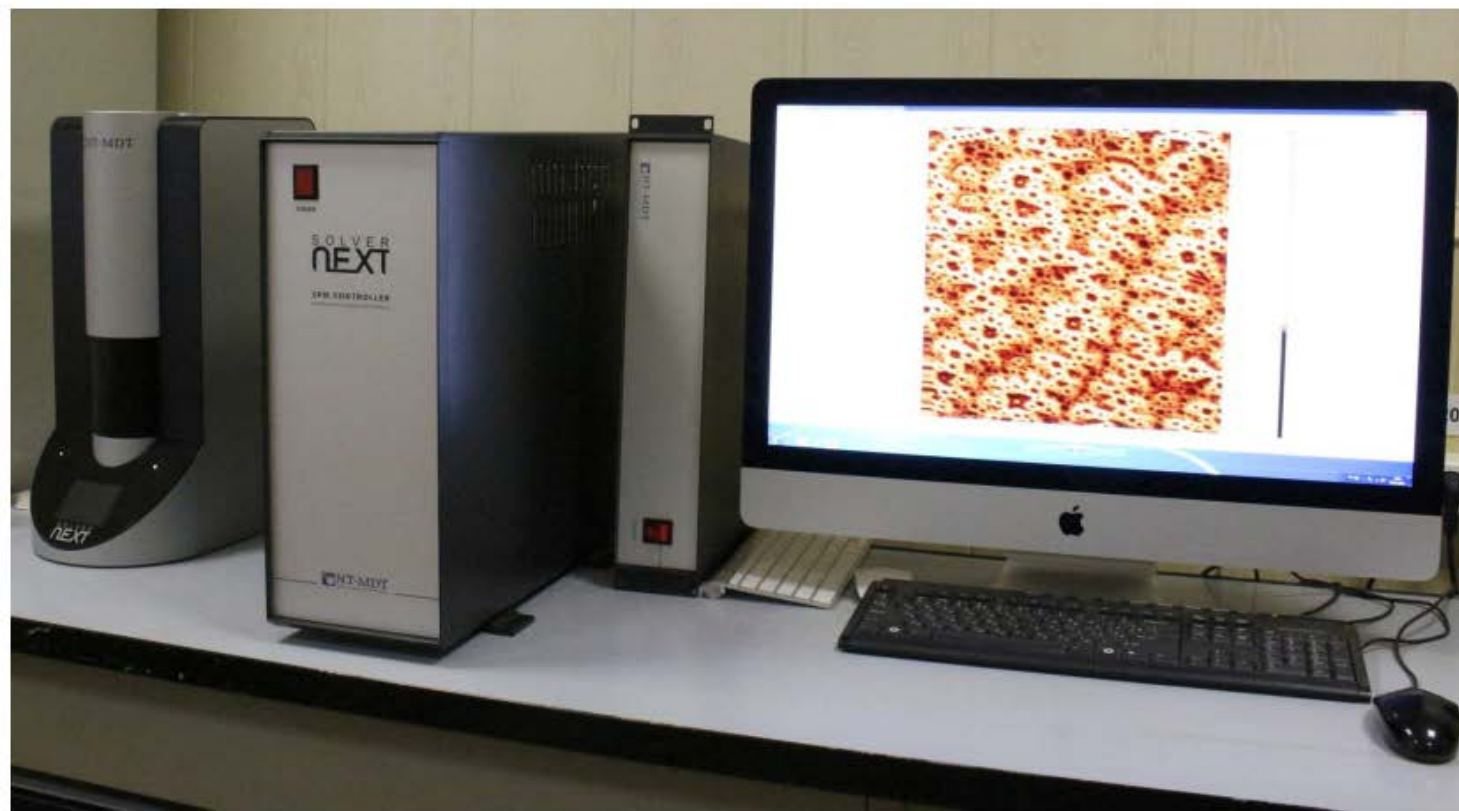
1000 nm diameter mask



500 nm diameter mask



АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ



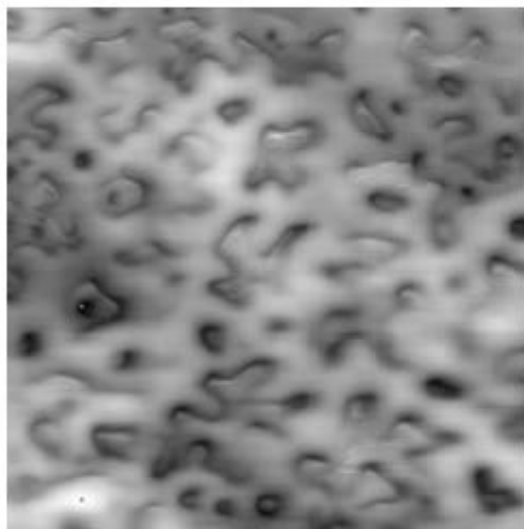
Атомно-силовые микроскопы Solver NEX T



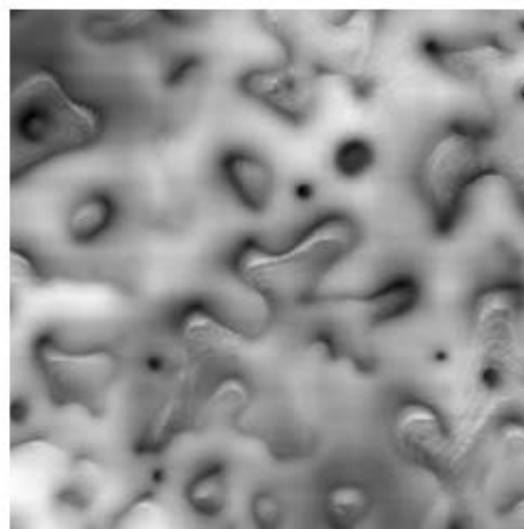
Solver P47

МАГНИТО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

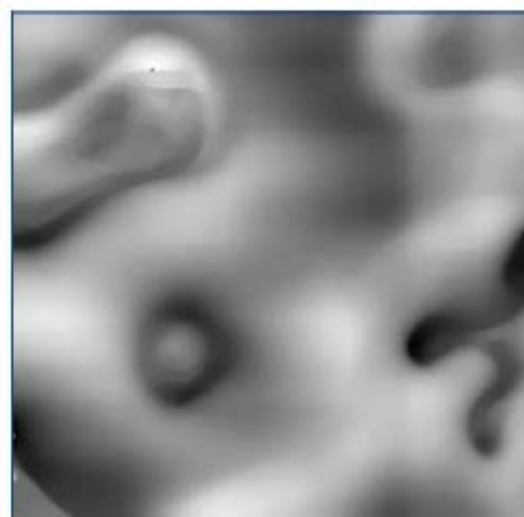
50x50 μm



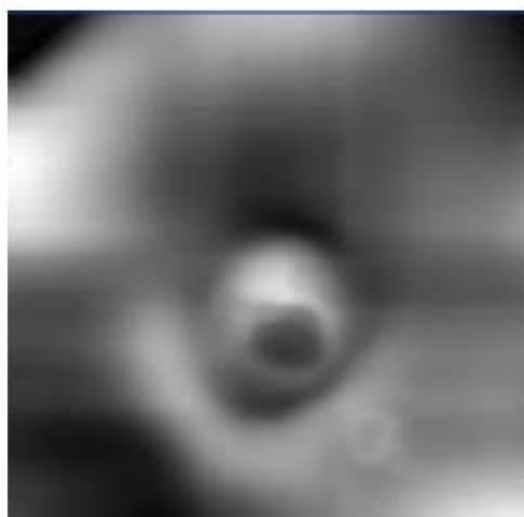
25x25 μm

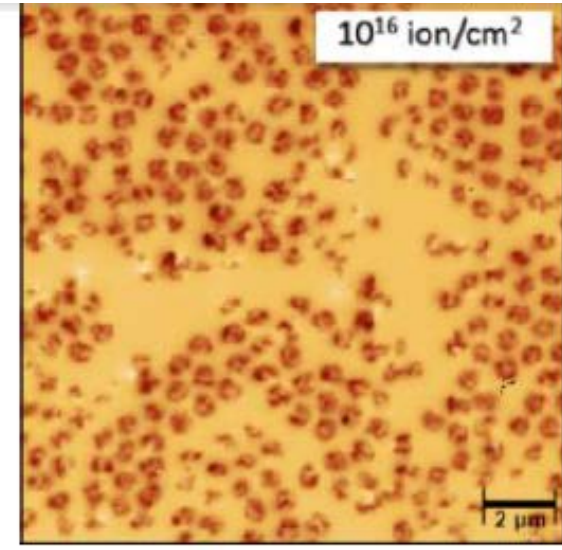
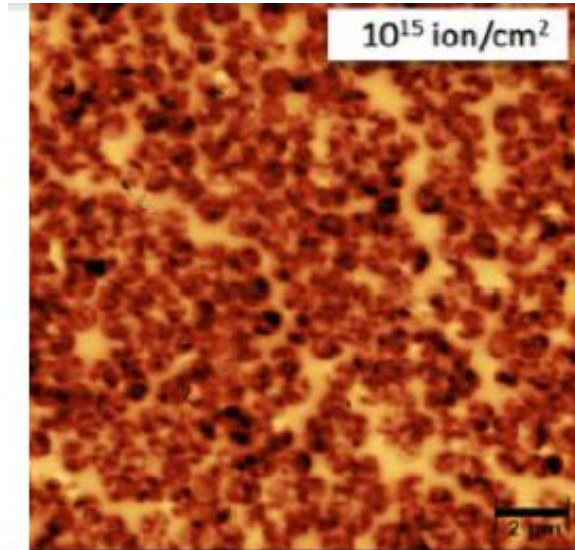
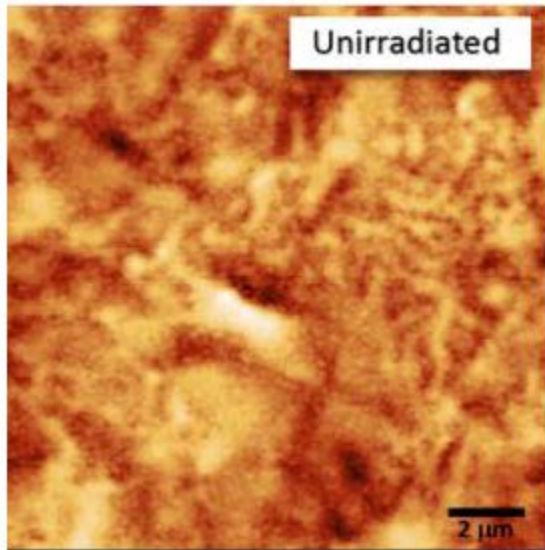


10x10 μm

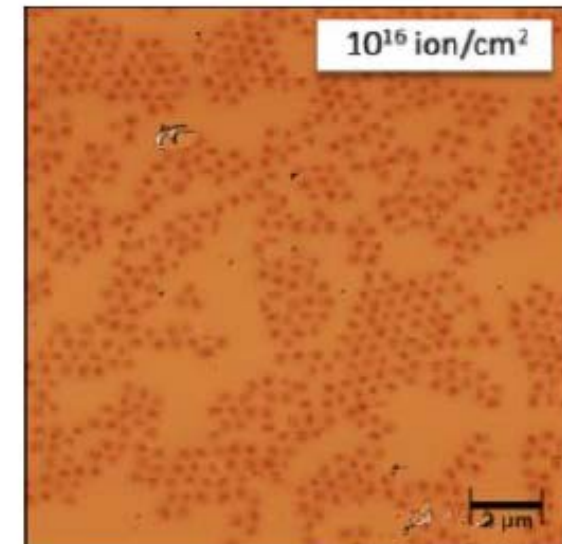
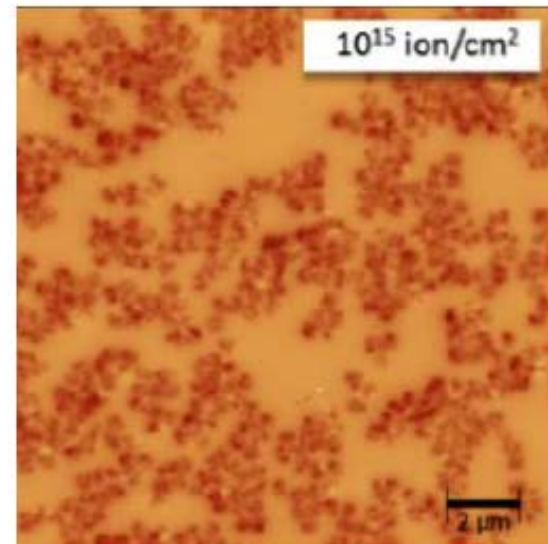


5x5 μm





500 nm silica mask



Основные выводы исследования:

- Впервые проведено комплексное исследование ближнего и дальнего порядка кристаллической и электронной структуры в области спинового перехода и перехода металл-изолятор на базовом кобальтитном соединении LaCoO_3 . Методами исследования были EXAFS-спектроскопия, XMCD на K - и $L_{2,3}$ -краях кобальта, порошковая рентгеновская и монокристаллическая нейтронная дифракция высокого разрешения, а также взаимодополняющие им измерения намагниченности.
- На основе EXAFS и рентген-дифракционных данных установлены закономерности температурного поведения Co-O расстояния и факторов Дебая-Валлера для кобальта, кислорода и Co-O связи. Обнаруженный эффект уменьшения EXAFS Co-O расстояния по сравнению с дифракционным и рост корреляционной функции (DCF) с температурой указывает на постепенный переход из **высоко**-спинового в сильно-гибридизованное **промежуточно**-спиновое состояние ($\Delta_o \geq P$). В XANES спектре смещение e_g и t_{2g} уровней в высокоэнергетическую область также подтверждает этот вывод. Дополнительным подтверждением вышеупомянутого вывода является наличие перегибов изотропного теплового параметра кобальта ниже 50 К и 550 К, а также напряженных состояний, полученных из порошковой рентгеновской дифракции высокого разрешения. Подобное разупорядочение могло возникнуть только из-за присутствия смеси **низко**- или **промежуточно**- и **высоко**-спиновых вкладов, характеризующихся существенно-разными, ионными радиусами кобальта по сравнению с **низко**- и **промежуточным** Нелинейный характер полевых зависимостей от 5 К до 25 К также указывает на присутствие высоко-спиновых состояний в диамагнитной низко-спиновой матрице.
- Ненулевой орбитальный магнитный момент Co^{3+} при 3-25 К и незначительный его рост на K -крае кобальта и $L_{2,3}$ -краях кобальта в районе спинового перехода в рамках ионной модели соответствует смеси высоко- и промежуточно-спиновых состояний кобальта.
- Сравнивая наши и ранее опубликованные литературные данные с использованием различных экспериментальных методов можно предположить, что поверхностный высоко-спиновый слой ионов Co^{3+} является первым этапом спинового перехода, и равновесная концентрация высоко-спиновых состояний намного ниже, чем промежуточно-спиновых. Предполагается, что спиновый переход на первой стадии ведет к смеси **высоко**- и **низко**-спиновых состояний, которая затем трансформируется в сильно-гибридизованное **промежуточно**-спиновое состояние, а выше температуры перехода металл-изолятор ~ 550 К в смесь **промежуточно**- и **высоко**-спиновые состояния.

Совместные публикации за последние 4 года:

1. I.O. Troyanchuk, M.V. Bushinsky, A.V. Nikitin, L.S. Lobanovsky, A.M. Balagurov, V. Sikolenko, V. Efimov, and D.V. Sheptyakov. Very large magnetoresistance and spin state transition in Ba doped cobaltites. // J. Appl. Phys., **113**, № 5, 053909-053916 (2013).
2. V. Sikolenko, V.V. Efimov, D. Töbrens, C. Ritter, M.V. Bushinsky, I.O. Troyanchuk. Pressure effects on oxygen-deficit Ba-substituted cobaltites. // Pow. Diffrac., **28**, pp.S126-S132 (2013).
3. D.V. Karpinsky, I.O. Troyanchuk, V. Sikolenko, V. Efimov, A.L. Kholkin. Electromechanical and magnetic properties of BiFeO₃ – LaFeO₃ – CaTiO₃ ceramics near the rhombohedral-orthorhombic phase boundary. // J. Appl. Phys., **113**, №18, 187218-187223 (2013).
4. V.A. Khomchenko, I.O. Troyanchuk, D M Töbrens, V. Sikolenko, J.A. Paixão. Composition- and temperature-driven structural transitions in Bi_{1-x}Ca_xFeO₃ multiferroics: a neutron diffraction study // J. Phys.: Condens. Matter, **25**, №13, 135902 (2013).
5. D.V. Karpinsky, I.O. Troyanchuk, L.S. Lobanovsky, A.N. Chobot, C. Ritter, V. Efimov, V. Sikolenko, A.L. Kholkin. Magnetic and structural phase transitions in La_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-δ} (0<δ≤0.3) cobaltites. // J. Phys.: Cond. Matter., **25**, 316004 (2013).
6. V.A. Khomchenko, I.O. Troyanchuk, V. Sikolenko, J.A. Paixão Weak ferromagnetic polar phase in the BiFe_{1-x}Ti_xO₃ multiferroics // J. Mater. Sci., **48**, №.10, 3852-3856 (2013).
7. D.V. Karpinsky, I.O. Troyanchuk, M. Tovar, V. Sikolenko, V. Efimov, A.L. Kholkin. Evolution of crystal structure and ferroic properties of La-doped BiFeO₃ ceramics near the rhombohedral-orthorhombic phase boundary. // J. Alloys Compd. **555**, 101-107 (2013).
8. I.O. Troyanchuk, M. Bushinsky, V. Sikolenko, V. Efimov, C. Ritter, T. Hansen, D. Töbrens. Pressure induced antiferromagnet-ferromagnet transition in La_{0.5}Ba_{0.5}CoO_{2.8} cobaltite. // Eur. Phys. J. B86, 435 (2013).
9. В.В. Сиколенко, В.В. Ефимов, S. Schorr, C. Ritter, И.О. Троянчук. Нейтронографические исследования структуры замещенных сложных оксидов кобальта. // ФТТ. Том 56, вып. 1, с. 82-85 (2014).
10. Д.В. Карпинский, И.О. Троянчук, О.С. Мантыцкая, Г.М. Чобот, В.В. Сиколенко, В. Ефимов, М. Товар. Магнитные и пьезоэлектрические свойства системы Bi_{1-x}La_xFe O₃ вблизи перехода из полярной в антиполярную фазу. // ФТТ. Т. 56, вып. 4, с. 673-678 (2014).
11. Д.В. Карпинский, И.О. Троянчук, В.В. Сиколенко, В. Ефимов, Е. Ефимова, М.В. Силибин, Г.М. Чобот, Е. Willinger. Температурная эволюция кристаллической структуры твердых растворов Bi_{1-x}Pr_xFeO₃. // ФТТ. Т. 56, вып. 11, с. 2191-2196 (2014).
12. И.О. Троянчук, А.Н. Чобот, О.С. Мантыцкая, Н.В. Терешко, Г.М. Чобот, Е.А. Ефимова, С.Н. Пастушок. Магнитные взаимодействия между ионами марганца и кобальта в оксидах со структурой перовскита. // Доклады НАН Беларуси. Т. 58, №3, с. 32-36 (2014).
13. О Troyanchuk, D Karpinsky, V Efimov, V Sikolenko, O Prokhnenko Ferromagnetic interactions in Mn³⁺ based perovskites. // J. Phys.: Condens. Matter. Vol. 26, №39, 396002 (2014).
14. D. Karpinsky, I.O. Troyanchuk, V. Sikolenko, V. Efimov, E. Efimova, A. Salak, A. Kholkin. Phase coexistence in Bi_{1-x}Pr_xFeO₃ ceramics. // J. Mat. Science. Vol. 49, Is. 20, pp. 6937-6943 (2014).
15. D. Karpinsky, I.O. Troyanchuk, M. Tovar, V. Sikolenko, V. Efimov, E. Efimova, V. Ye.Shur, and A. Kholkin. Temperature and Composition-Induced Structural Transitions in Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO₃ Ceramics. // J. Am. Ceram. Soc. Vol. 79, №8, 2631 (2014).
16. И.О. Троянчук, М.В. Бушинский, Н.В. Терешко, В.М. Добрянский, В. Сиколенко, D.M. Töbrens. Магнитные свойства манганитов, легированных ионами галлия, железа и хрома. // ЖЭТФ. Том 147, вып.5, с. 970-975 (2015).
17. I.O. Troyanchuk, M.V. Bushinsky, V. Sikolenko, V. Efimov, N.V. Volkov, D.M. Töbrens, C. Ritter, B. Raveau. Ferromagnetism in single-valent manganites. // J. of All. and Comp. Vol. 619, pp. 719-725 (2015).
18. И.О. Троянчук, Н. Волков, В. Сиколенко, В. Ефимов, К. Риттер. Роль сверхобменных взаимодействий в ферромагнетизме манганитов. // ЖЭТФ. Том 147, вып. 1, с. 112-118 (2015).
19. И.О. Троянчук, М.В. Бушинский, Д.В. Карпинский, В.В. Сиколенко, М. Frontzek, В.В. Ефимов. Магнитное упорядочение в Ln_{0.7}Sr_{0.3}Mn_{0.85}Sb_{0.15}O₃ (Ln=La,Nb,Sm,Eu). // ФТТ. Том 57, №6, с. 1112-1116 (2015).
20. V. Sikolenko, I. Troyanchuk, M. Bushinsky, V.Efimov, L. Keller, D. Sheptyakov, J.S. White, S. Schorr. High pressure induced spin state crossover in Sr₂CaYCo₄O_{10.5}. // J. Phys.: Condens. Matter. Vol. 27, 4. p.046005 (2015).
21. I.O. Troyanchuk, M.V. Bushinsky, V. Efimov, C. Ritter and V. Sikolenko. Ferromagnetic ordering in La_{0.7}Sr_{0.3}Mn³⁺_{0.85}Nb⁵⁺_{0.15}O₃ MANGANITE. // Powder Diffraction. 30 (S1), S 97-100 (2015).
22. D. V. Karpinsky, I. O. Troyanchuk, N.V. Pushkarev, A. Dziaugys, V. Sikolenko, V. Efimov, A. L. Kholkin. Evolution of electromechanical properties of Bi_{1-x}Pr_xFeO₃ solid solutions across the rhombohedral-orthorhombic phase boundary: role of covalency. // J. of Alloys and Com. 638, pp.429-434 (2015).
23. А.В. Руткаускас, Д.П. Козленко, И.О. Троянчук, С.Е. Кичанов, Е.В. Лукин, Б.Н. Савенко. Подавление антиферромагнитного состояния в кобальтите La_{0.82}Ba_{0.18}CoO₃ при высоком давлении. // Письма в ЖЭТФ. Том 101, вып. 12, с. 919-924 (2015)
24. I.O. Troyanchuk, M.V. Bushinsky, D.V. Karpinsky, N.V. Tereshko, V.M. Dobryansky, D.M. Töbrens, V. Sikolenko, V. Efimov. Magnetic interactions in La_{0.7}Sr_{0.3}Mn_{1-x}Me_xO₃ (Me = Ga, Fe, Cr) manganites. // J. of Magn. and Magn. Materials. Vol. 394, pp. 212-216 (2015).
25. Д.В. Карпинский, И.Щ. Троянчук, М.В. Силибин, С.А. Гаврилов, М.В. Бушинский, В. Сиколенко, В. Сиренко, Д. Теббенс. Кристаллическая структура и магнитные взаимодействия в твердых растворах La_{1-2x}Sr_{2x}Mn_{1-x}Sb_xO₃ (x≤0.2). // Физика низких температур. Том 41, №12, с. 1289-1295 (2015).
26. D.V. Karpinsky, I.O. Troyanchuk, M.V. Silibin, S.A. Gavrilov, M.V. Bushinky, V. Sikolenko, M. Frontzek. Structure and magnetic interactions in (Sr, Sb)-doped lanthanum manganites. // Physica B: Condensed Matter. Vol. 489. P.45-50 (2016).
27. V. Efimov, A. Ignatov, I.O. Troyanchuk, V.V. Sikolenko, A. Rogalev, F. Wilhelm, E. Efimova, S.I. Tiutiunnikov, D. Karpinsky, V. Kriventsov, E. Yakimchuk, S. Molodtsov, P. Sainctavit and D. Prabhakaran. // Co K-edge magnetic circular dichroism across the spin state transition in LaCoO₃ single crystal. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 712. P. 012111 (2016).
28. V.V. Sikolenko, I.O. Troyanchuk, M.V. Bushinsky, D.V. Karpinsky, V. Efimov, C. Ritter, S. Schorr, M.V. Silibin, F.R. Schilling. High pressure effects on the magnetic and crystal structure of La_{0.75}Ba_{0.25}CoO₃. // Materials Chemistry and Physics. 1-4 (2016).
29. V.V. Sikolenko, I. O. Troyanchuk, V. Efimov, E. Efimova, D. Karpinsky, S. Pascarelli, Zaharko, A. Ignatov, D. Aquilanti, A.G. Selutin, A.N. Shmakov and D. Prabhakaran. EXAFS and X-ray diffraction study of LaCoO₃ across the spin-state transition. // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 712. P. 012118 (2016).

Благодарю за внимание!