

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ**  
**ИНСТИТУТ**  
*имени*  
*П.Н.Лебедева*



**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

А.И.ГОЛОВАШКИН

**7**

**ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВТСП СИСТЕМ**

МОСКВА 2005

# Тепловые характеристики ВТСП систем<sup>1</sup>

А.И.Головашкин

Содержание	Стр.
Участники работы на разных этапах	3
Какие ВТСП системы изучались в последние годы	4
Цели исследования	4
Что обнаружено	5
Иллюстрации наблюдавшихся эффектов	6
1. Аномалия теплового расширения при низких температурах	6
2. Влияние магнитного поля	7
3. Аномалия скоростей звука при низких температурах и влияние на нее магнитного поля	9
4. Зависимость аномалии теплового расширения от уровня легирования	11
5. Проявление псевдощели в тепловых характеристиках	12
MgB <sub>2</sub> – уникальный ВТСП материал с двумя сверхпроводящими щелями	15
1. Температурная зависимость теплоемкости MgB <sub>2</sub>	16
2. Температурная зависимость теплопроводности MgB <sub>2</sub>	18
3. Температурная зависимость теплового расширения MgB <sub>2</sub>	21
4. Влияние магнитного поля на аномалию теплового расширения MgB <sub>2</sub>	22
5. Заключение и выводы по результатам исследования MgB <sub>2</sub>	23
Заключение: что дальше?	24
Литература	27

## Аннотация

Сделан краткий обзор работ лаборатории сверхпроводимости ОФТТ ФИАН, в которых в течение последних нескольких лет изучались тепловые свойства ВТСП систем. В этих работах обнаружены аномальное (отрицательное) тепловое расширение при низких температурах в ВТСП системах, аномально сильное влияние относительно небольших магнитных полей на коэффициент теплового расширения в области этих аномалий, наличие второй температурной области с аномальным поведением тепловых характеристик в ВТСП соединении MgB<sub>2</sub>, находящейся при температурах значительно ниже критической.

---

<sup>1</sup> Препринт подготовлен по докладу для семинара ОФТТ ФИАН 25-2-2005 г.

## **Участники работы на разных этапах.**

В работах, обзор которых сделан в настоящем докладе, участвовали на разных этапах:

Н.В.Аншукова – ФИАН,  
А.П.Русаков – МИСИС,  
Л.И.Иванова – МИСИС,  
Д.А.Шулятев – МИСИС,  
И.Б.Крынецкий – МГУ,  
Б.М.Булычев – МГУ,  
А.А.Минаков – ИОФАН.

Часть образцов соединения  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ , исследованных в указанных работах, любезно предоставлен Г.А.Калюжной. Рентгеновские исследования выполнены В.П.Мартовицким, исследование состава и электронно-микроскопические исследования ряда образцов – С.Г.Черноок.

## **Какие ВТСП системы изучались в последние годы.**

ВТСП системы – это системы, в которых имеются ВТСП соединения.

В течение последних нескольких лет в лаборатории сверхпроводимости совместно с МИСИС, МГУ и ИОФАНом изучались следующие ВТСП системы:

- 1.  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (LSCO).**
- 2.  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$  (BKBO) и  $\text{BaPb}_x\text{Bi}_{1-x}\text{O}_3$  (BPBO).**
- 3.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  (Bi-2201).**
- 4.  $\text{MgB}_2$ .**

В настоящее время изучаются системы:

- 1.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$  (Bi-2201+La).**
- 2.  $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  (SLRO).**

Последняя система – рутенат – не является ВТСП системой, однако представляет значительный интерес как слоистый аналог ВТСП систем.

## **Цели исследования.**

Исследование устойчивости ВТСП систем.

Исследование связи аномалий свойств ВТСП систем с природой сверхструктурного упорядочения, с механизмом их сверхпроводимости.

## Что обнаружено.

1. Аномальное (отрицательное) тепловое расширение при низких температурах.
2. Сильное влияние умеренных магнитных полей (2-4Тл) на коэффициент теплового расширения в области аномалии.
3. Наличие анизотропии теплового расширения в монокристаллах при низких температурах (аномалия для расширения в плоскости “ab” и отсутствие аномалии вдоль оси “с”; монокристаллы  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ).
4. Зависимость аномалии теплового расширения при низких температурах от уровня легирования (в «хорошем» металле аномалия отсутствует;  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ ).
5. Возможное проявление псевдощели в тепловых характеристиках (в тепловом расширении; монокристаллы Bi-2201).
6. Наличие аномалий теплоемкости, теплопроводности, теплового расширения, обусловленных второй сверхпроводящей щелью в  $\text{MgB}_2$ .

## Иллюстрации наблюдавшихся эффектов.

### 1. Аномалия теплового расширения при низких температурах.

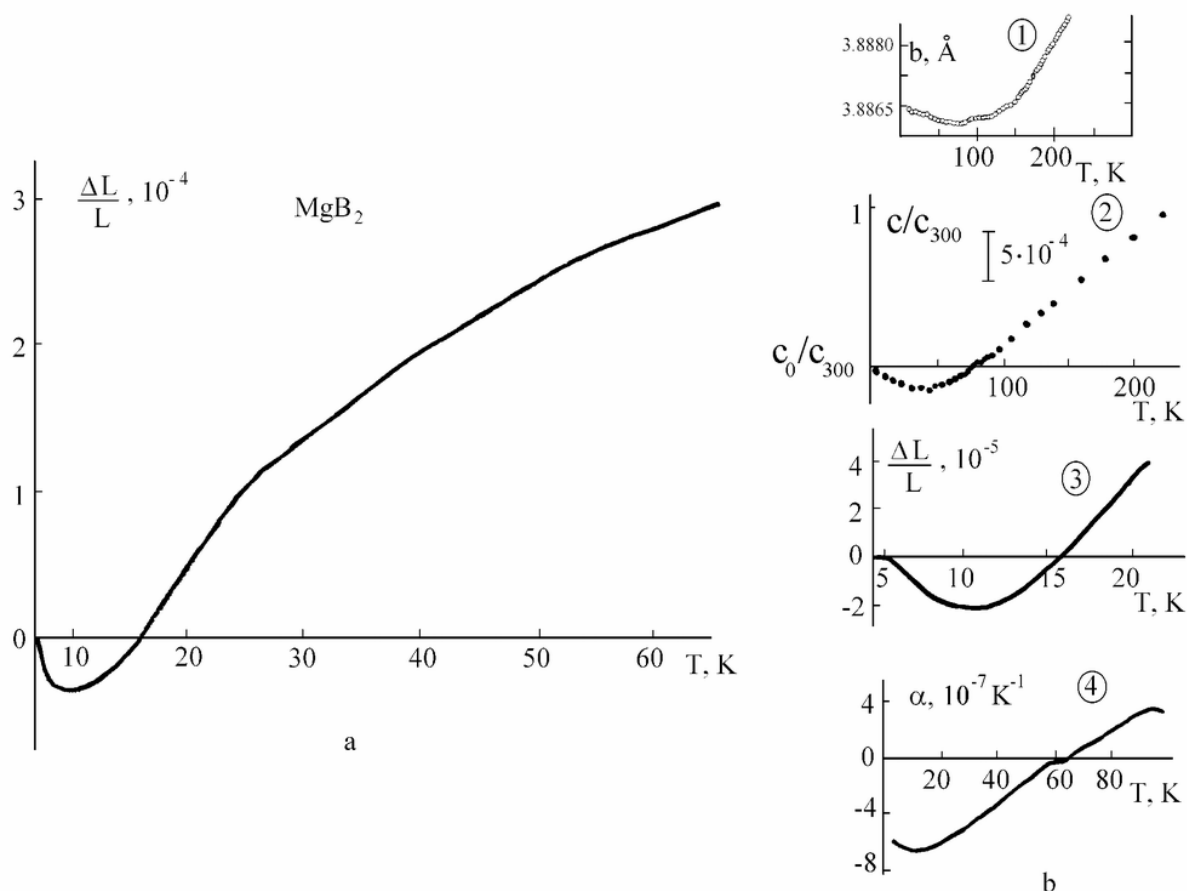


Рис.1. Температурная зависимость теплового расширения  $\Delta L/L$  для  $\text{MgB}_2$  (a) и сравнение ее с результатами для других ВТСП (b):

1.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  – Н. You et al. Phys. Rev. **B43**, 3660 (1991).
2.  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  – Z.J. Yang et al. J. Supercond. **8**, 223 (1995).
3.  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  ( $x=0.1$ , “ab”-плоскость) – наши данные.
4.  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$  ( $x=0.13$ ,  $\alpha$ -коэффициент теплового расширения) – наши данные.

## 2. Влияние магнитного поля.

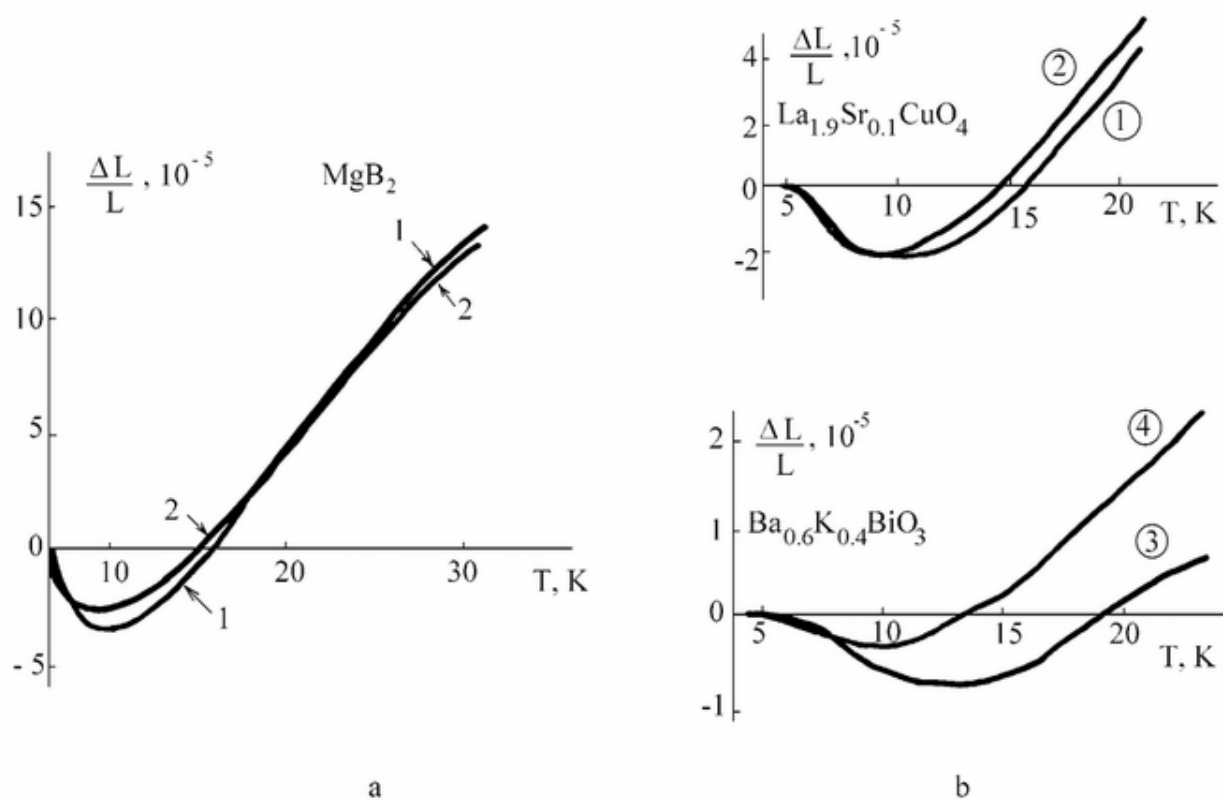


Рис.2. Влияние магнитного поля  $H$  на температурную зависимость теплового расширения (наши данные):

a.  $\text{MgB}_2$  (кривая 1 –  $H=0$ ; кривая 2 –  $H=3.6\text{Тл}$ );

b.  $\text{La}_{1.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CuO}_4$  (кривая 1 –  $H=0$ ; кривая 2 –  $H\approx 4\text{Тл}$ );

$\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{BiO}_3$  (кривая 3 –  $H=0$ ; кривая 4 –  $H=4\text{Тл}$ ).

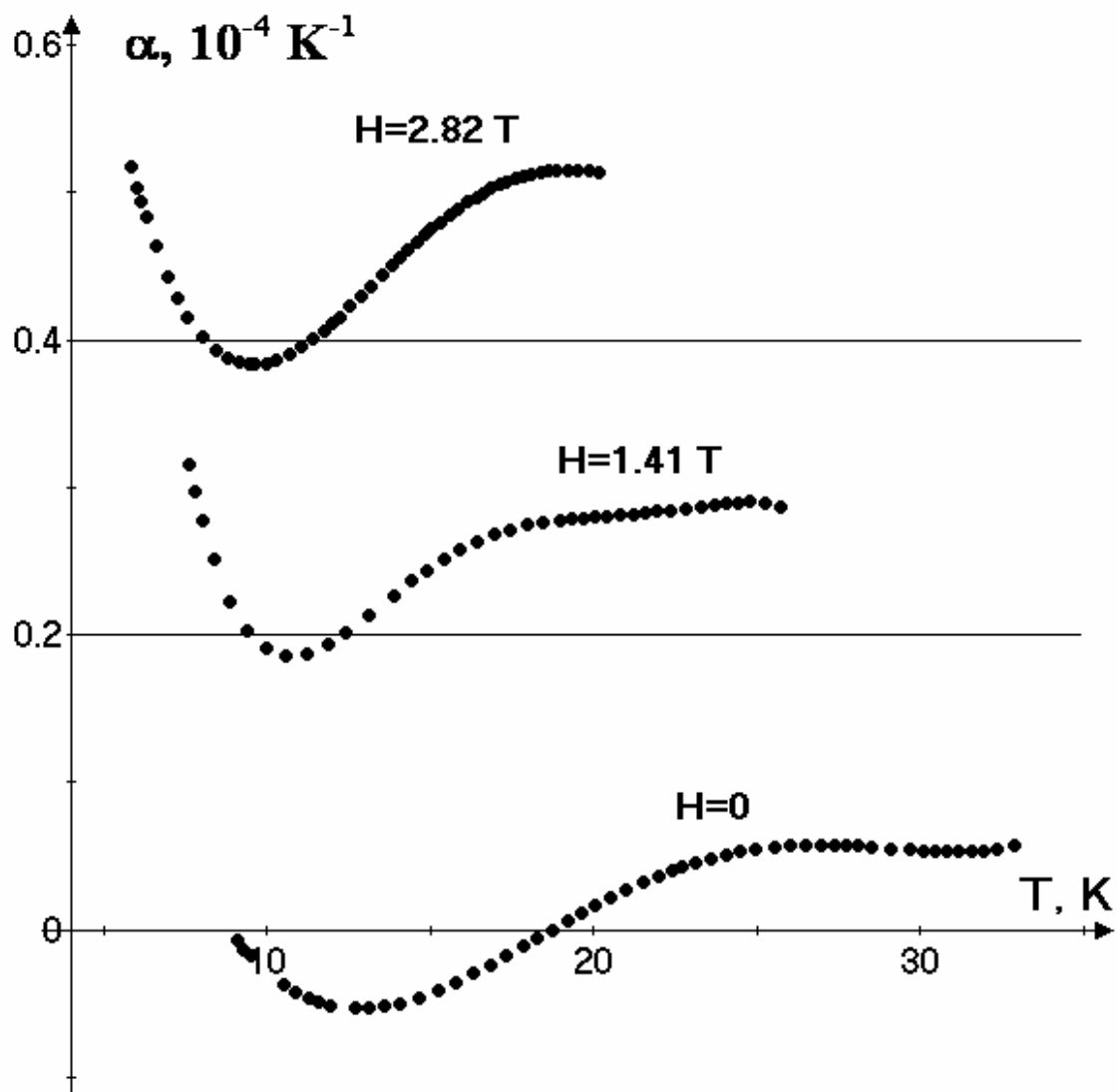


Рис.3. Влияние магнитного поля на коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha=(1/L)dL/dT$  монокристалла  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  при низких температурах в области аномалии  $\alpha < 0$ . Кривые для  $H \neq 0$  сдвинуты по оси ординат на  $0.2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  и  $0.4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .



3. Аномалия скоростей звука при низких температурах  
и влияние на нее магнитного поля.

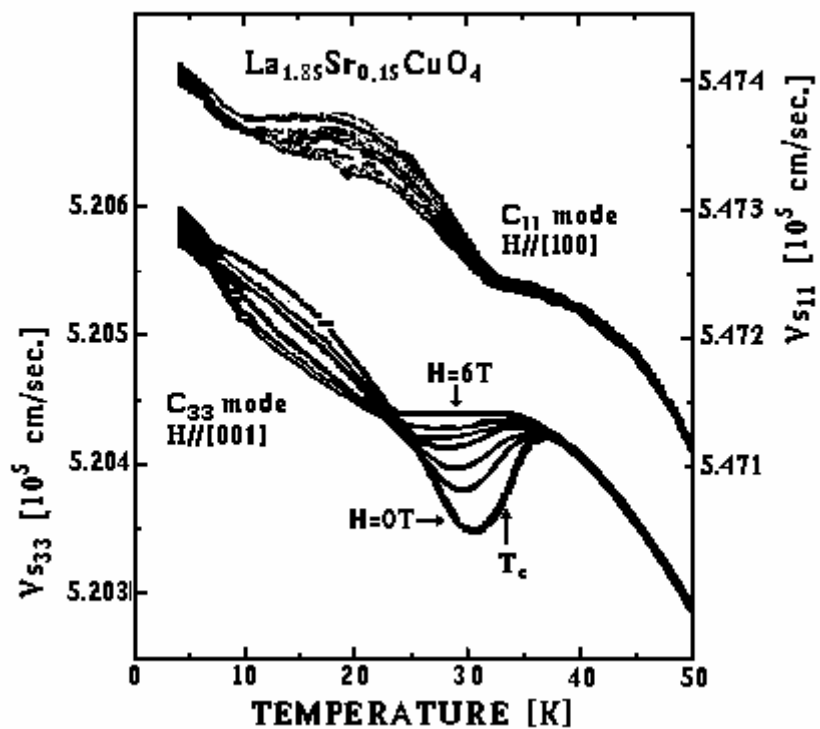


Рис.4. Аномалии упругих свойств (скоростей звука) монокристалла  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  и влияние на них магнитных полей.

T.Hanaguri et al. Physica B **194-196**, 1579 (1994).

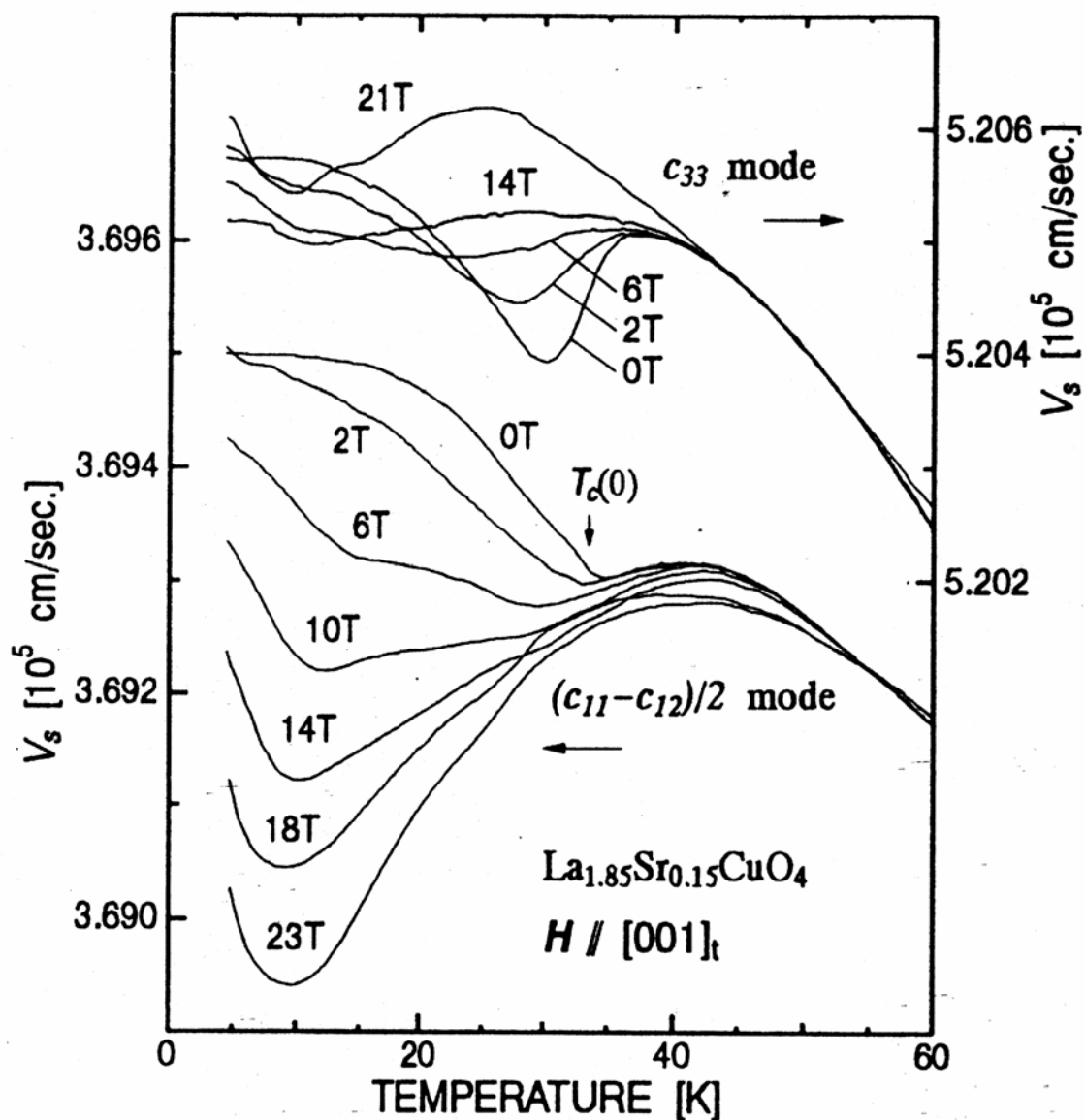


Рис.5. Аномалии упругих свойств (скоростей звука) монокристалла  $\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.15}\text{CuO}_4$  и влияние на них сильных магнитных полей до 23Тл.  
 Т.Нангури et al. Physica B 194-196, 1579 (1994).

Магнитное поле сначала «давит» аномалию, а затем усиливает ее.

4. Зависимость аномалии теплового расширения от уровня легирования.

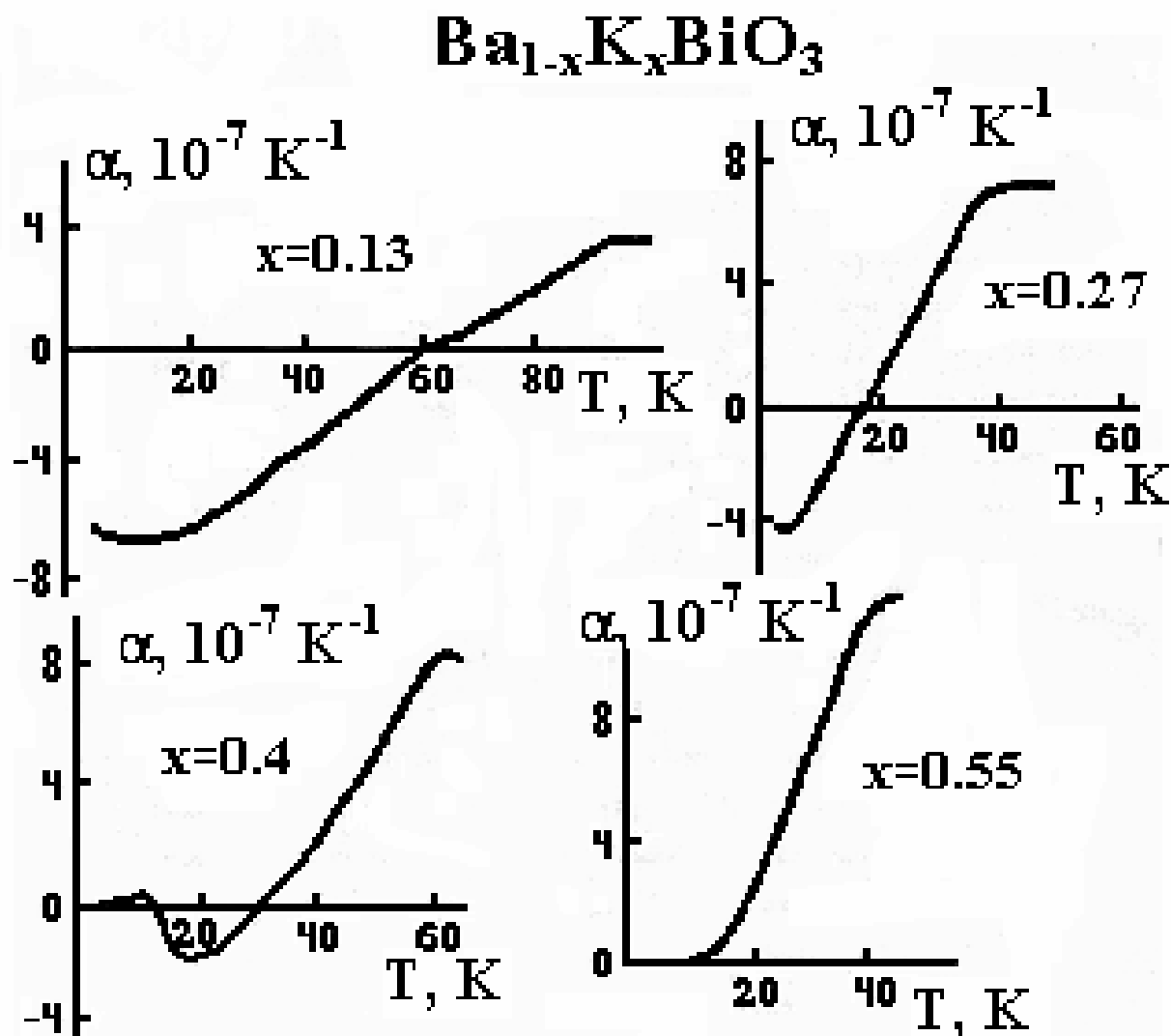


Рис.6. Тепловое расширение  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{BiO}_3$ .  
 $x=0.13$  – диэлектрик;  
 $x=0.27$  – полупроводник;  
 $x=0.4$  – оптимальное легирование (ВТСП);  
 $x=0.55$  – «хороший» металл.

5. Проявление псевдощели в тепловых характеристиках.

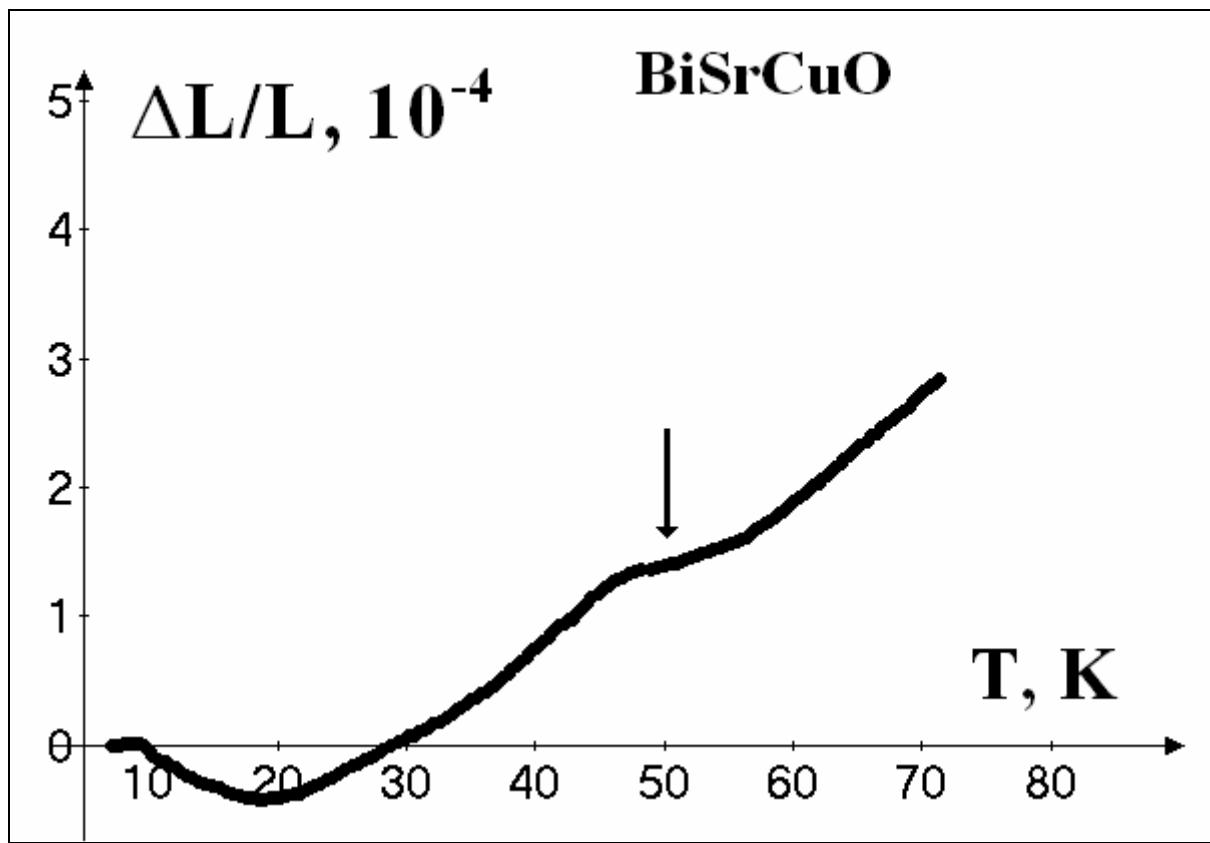


Рис.7. Тепловое расширение монокристалла  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  при низких температурах.  
Стрелкой показана аномалия, связываемая с проявлением псевдощели.

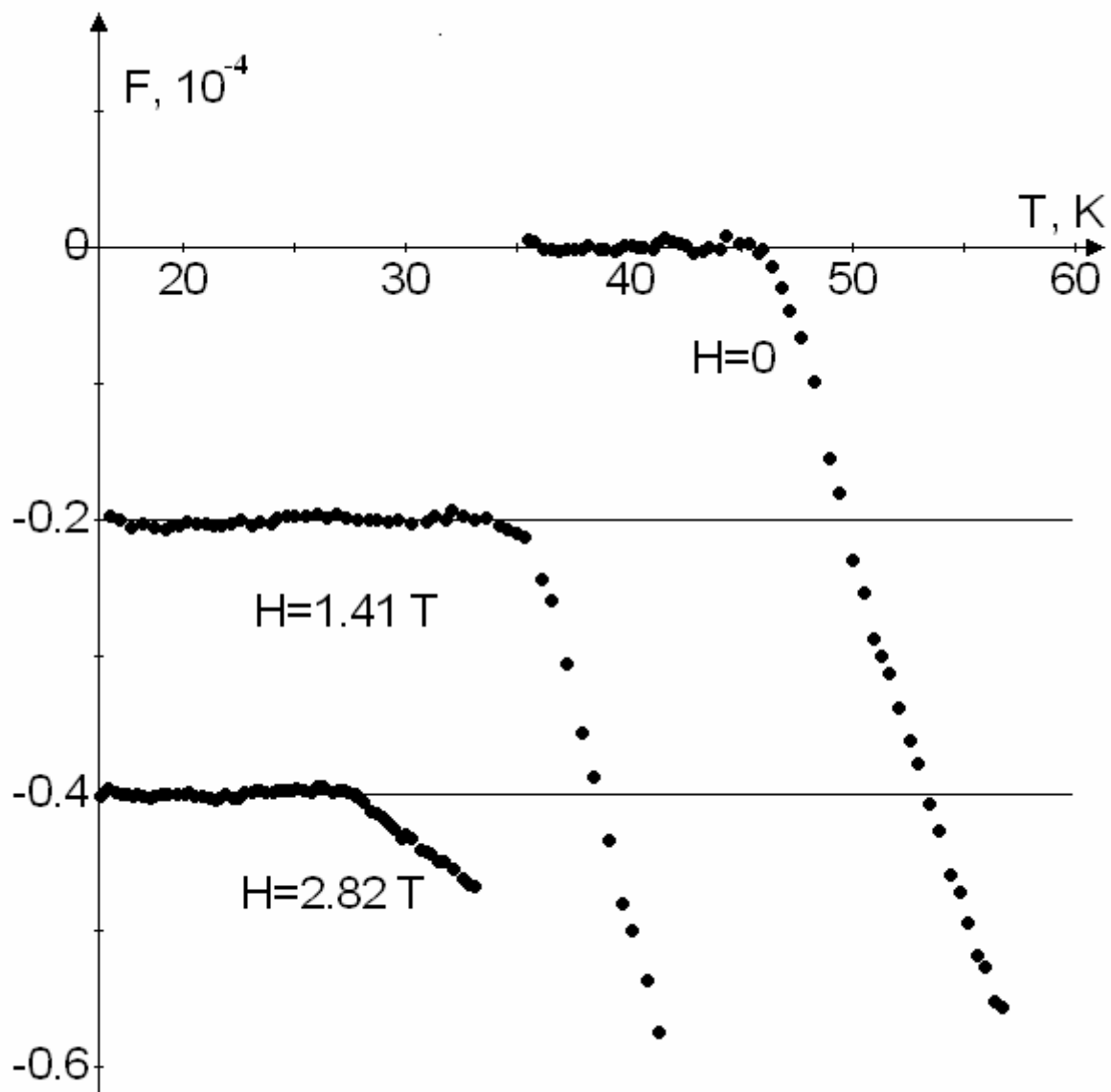


Рис.8. Смещение положения аномалии теплового расширения монокристалла  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ , связываемой с появлением псевдощели, в магнитном поле.

Результаты (величина  $F$ ) представлены в следующей форме: из экспериментальных данных вычиталась линейная зависимость, экстраполированная из области низких температур. Для удобства сравнения, данные для  $\Delta L/L$ , соответствующие разным магнитным полям, сдвинуты по оси ординат на величины, кратные  $0.2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

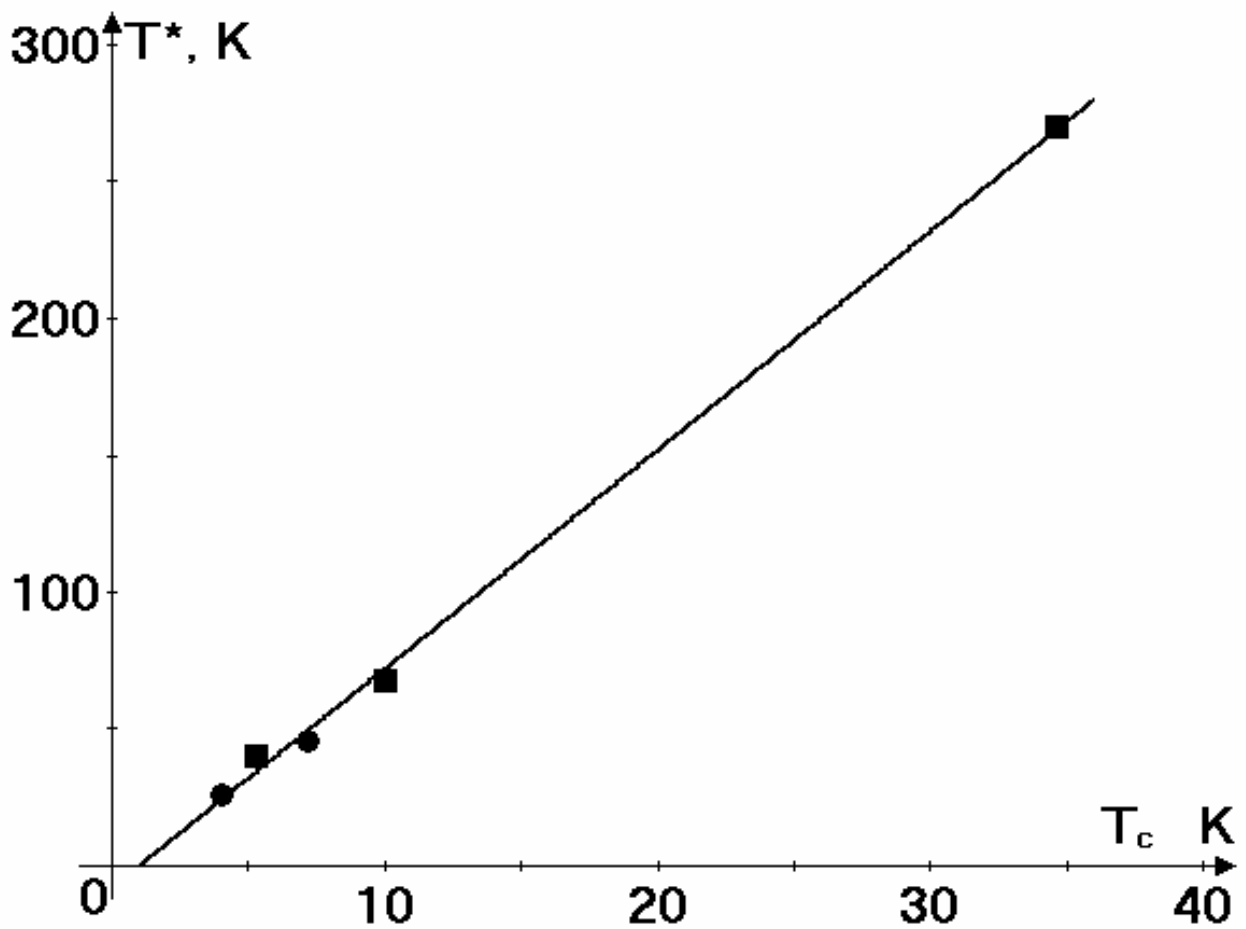


Рис.9. Зависимость температуры возникновения псевдощели  $T^*$  от  $T_c$ .

Кружками показаны полученные нами температурные положения соответствующих аномалий, квадратами – данные о  $T^*$  из работ:

Kugler M., Fischer Ø., Renner C., et al. Phys. Rev. Lett. **86**, 4911 (2001).

Yurgens A., Winkler D., Claeson T., et al. Cond-mat. 0212562 (2002).

Hou X.H., Zhu W.J., Li J.Q., et al. Phys. Rev. B, **50**, 496 (1994).

## **MgB<sub>2</sub> – уникальный ВТСП материал с двумя сверхпроводящими щелями.**

Измерялось (на одинаково приготовленных образцах MgB<sub>2</sub>):

1. Температурная зависимость теплоемкости  $C(T)$ .
2. Температурная зависимость теплопроводности  $K(T)$ .
3. Температурная зависимость теплового расширения при низких температурах и влияние на него магнитного поля.

Обнаружено:

1. Два скачка теплоемкости:
  - при  $T \approx T_c \approx 40\text{K}$ ;
  - при  $T = 10\text{-}12\text{K}$ .
2. Две области аномалии  $K(T)$ : при  $T_c$  и при  $T = 10\text{-}15\text{ K}$ .
3. Аномальное поведение теплового расширения при низких температурах  $\alpha(T)$ .
4. Сильное влияние магнитного поля на аномалию  $\alpha(T)$ .

1. Температурная зависимость теплоемкости  $C(T)$ .

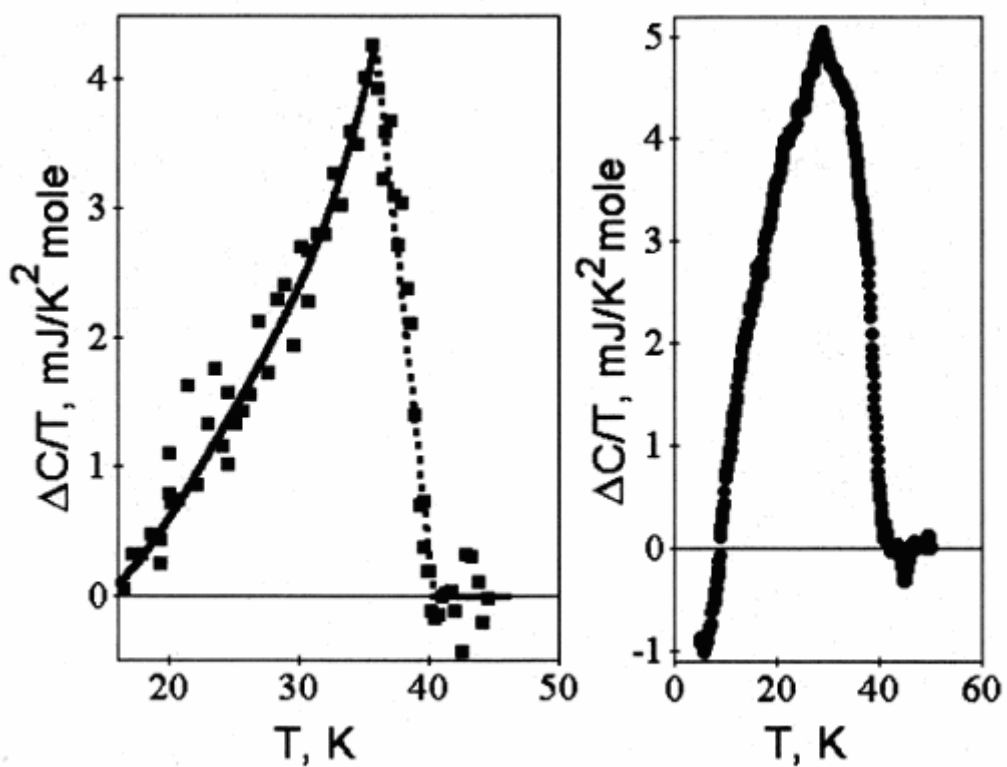


Рис.10. Скачки теплоемкости вблизи  $T_c$  для двух образцов  $\text{MgB}_2$  с несколько отличающимися плотностями.



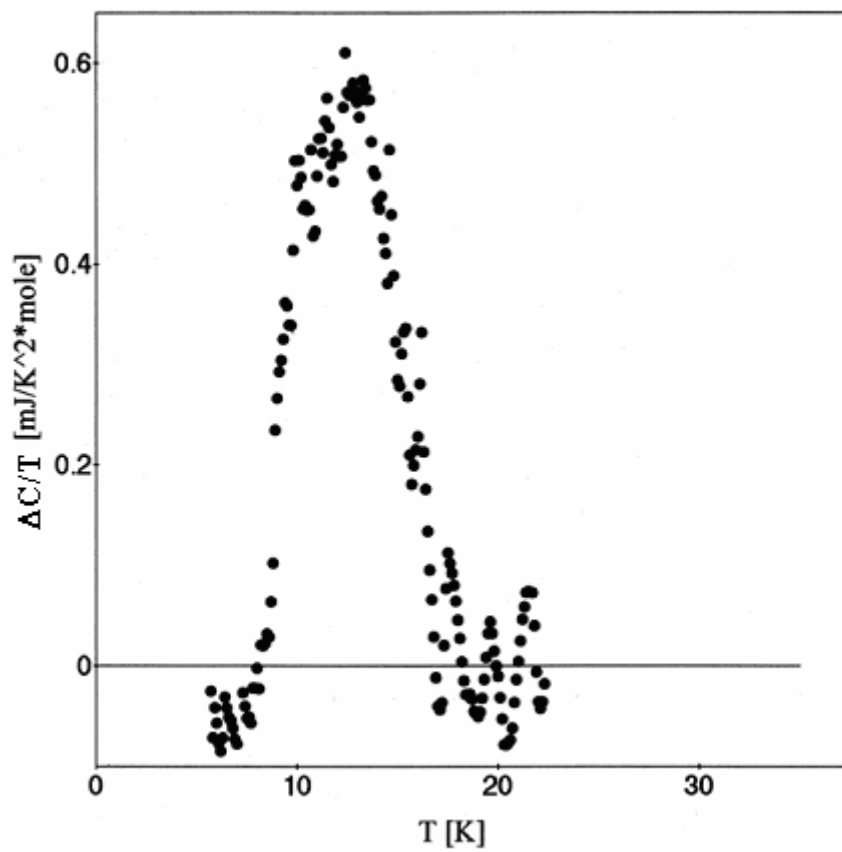


Рис.11. Скачок теплоемкости для образца MgB<sub>2</sub> при низких температурах.

2. Температурная зависимость теплопроводности  $\kappa(T)$   $\text{MgB}_2$ .

**$\text{MgB}_2$**

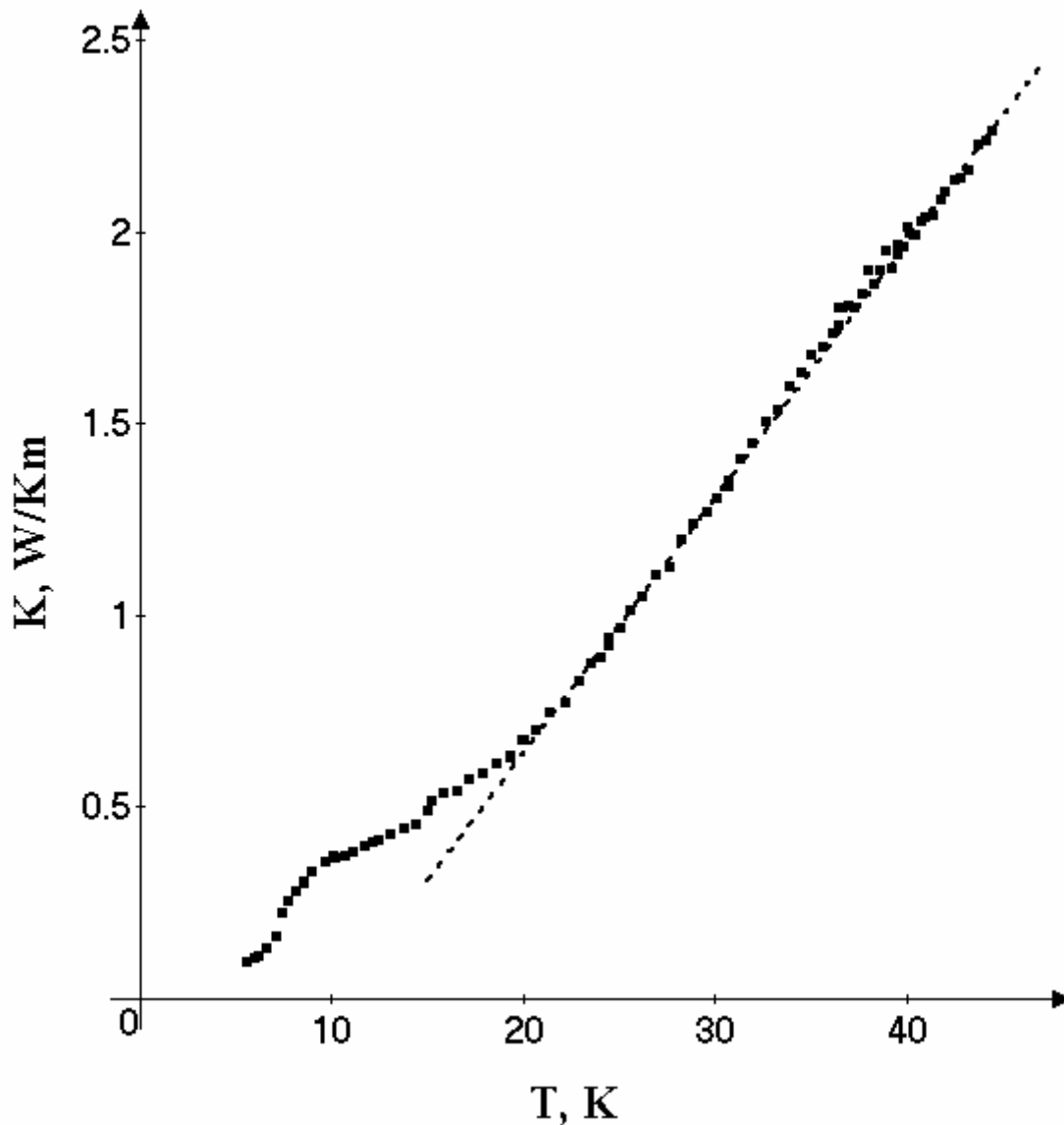


Рис.12. Температурная зависимость теплопроводности  $\text{MgB}_2$  в интервале 5 – 45 К. Пунктирная линия проведена для удобства восприятия особенности в области температур, соответствующих сверхпроводящему переходу при  $T_c$ .

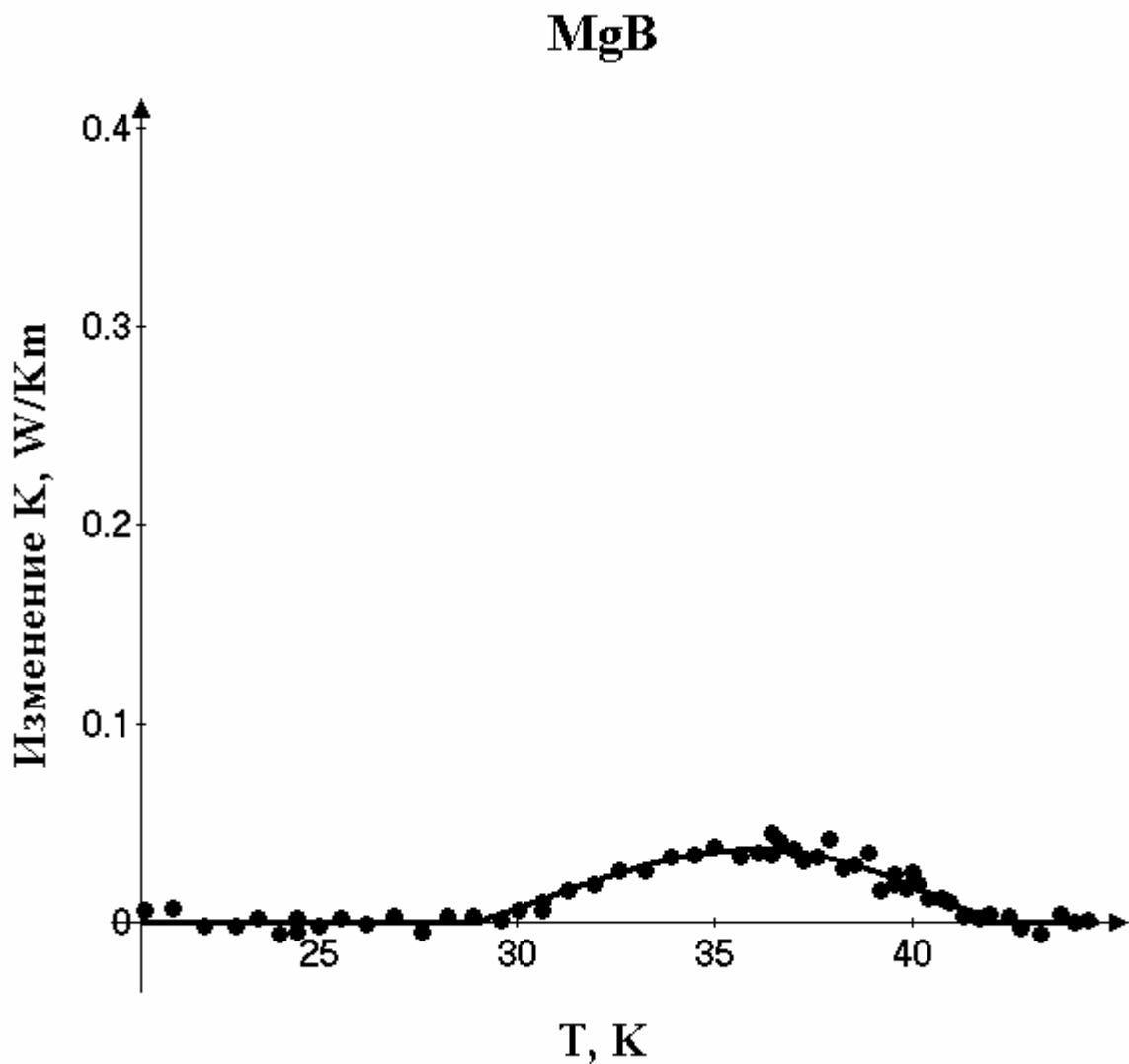


Рис.13. Особенность на температурной зависимости теплопроводности MgB<sub>2</sub> в области температур, соответствующих сверхпроводящему переходу при  $T_c$ . Получена вычитанием линейной части из экспериментальных данных.

## MgB<sub>2</sub>

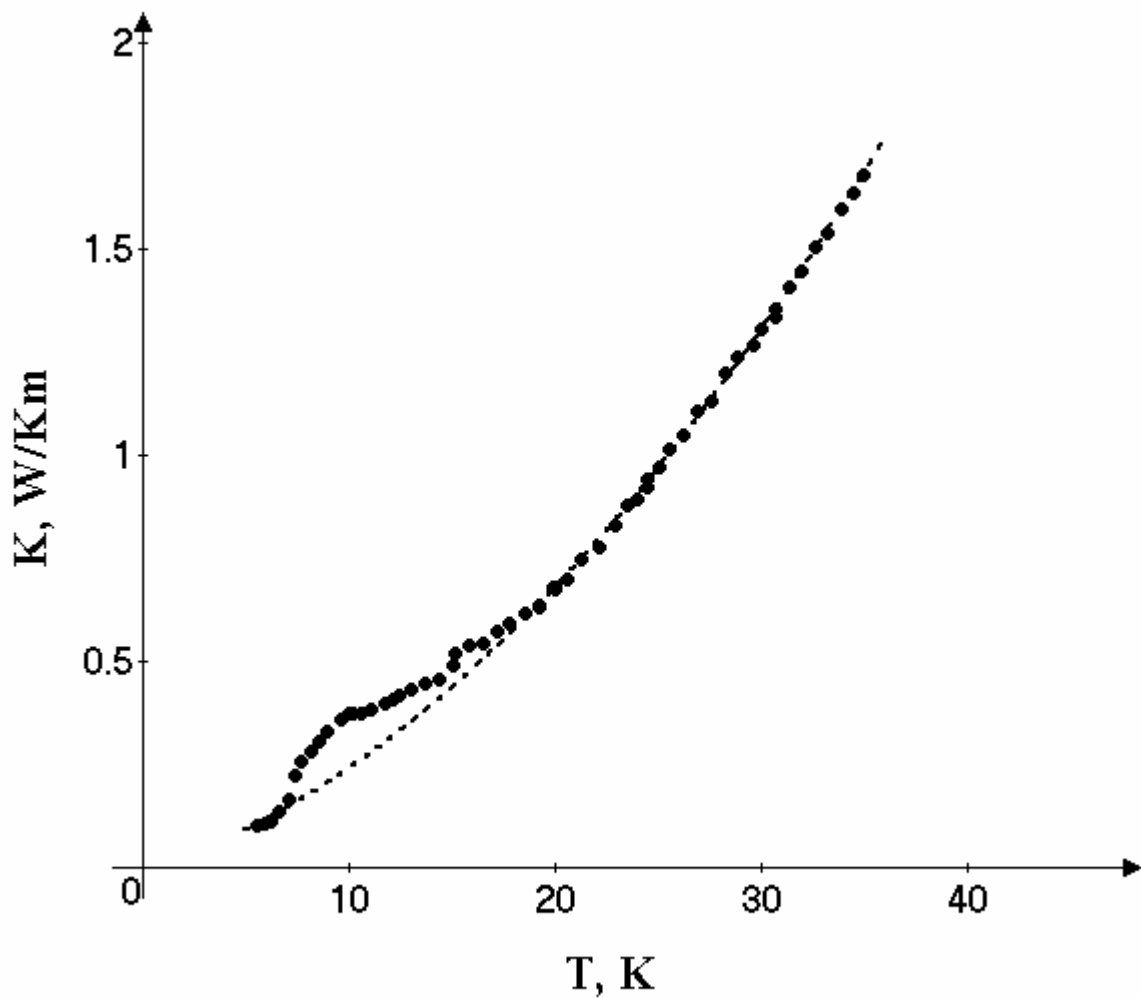


Рис.14. Особенность на температурной зависимости теплопроводности  $\text{MgB}_2$  в области температур 10-15К. Пунктирная кривая проведена для удобства наблюдения.

3. Температурная зависимость теплового расширения при низких температурах  $\text{MgB}_2$ .

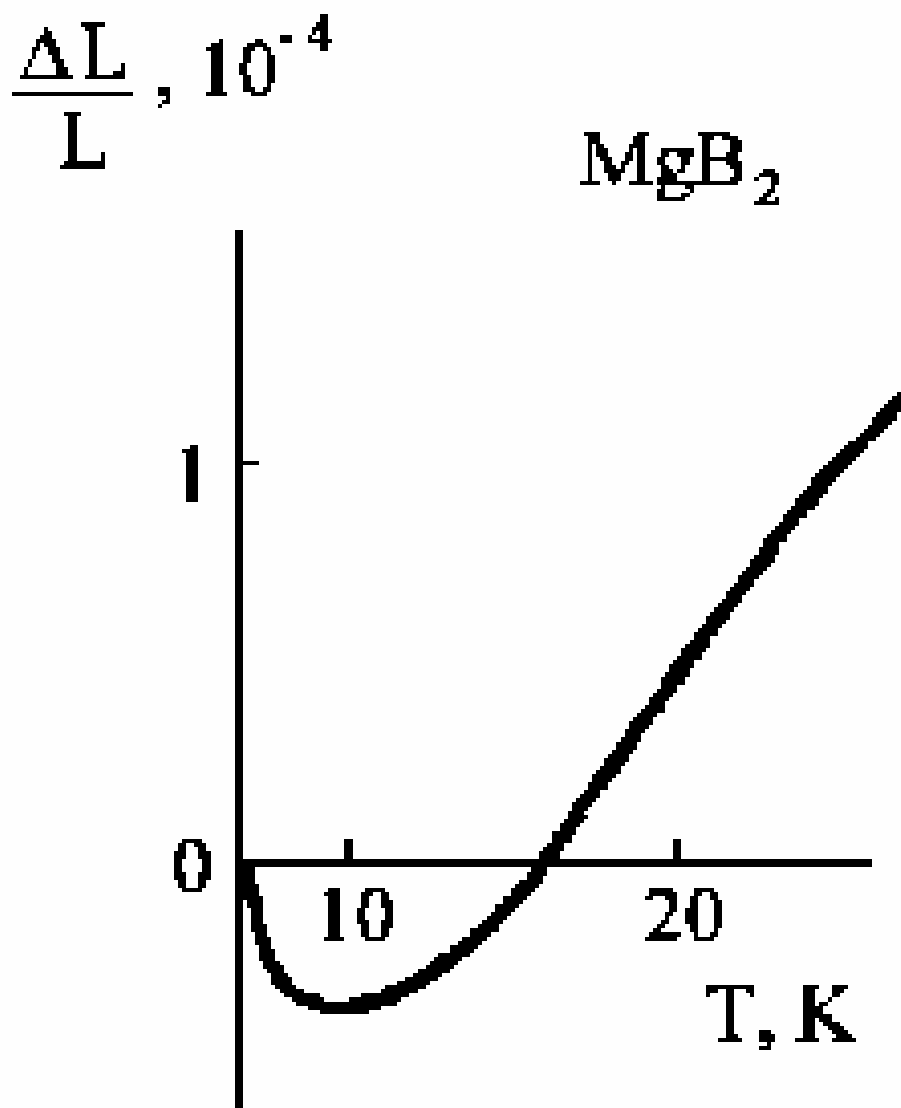


Рис.15. Температурная зависимость теплового расширения  $\text{MgB}_2$  в области аномалии.

4. Влияние магнитного поля на температурную зависимость теплового расширения  $\text{MgB}_2$  в области аномалии.

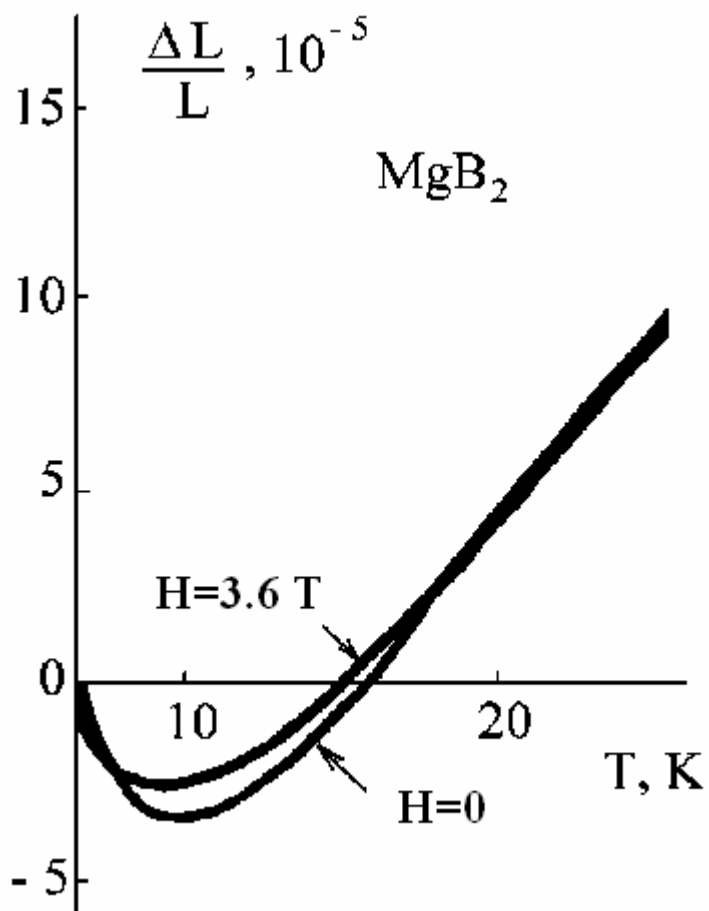


Рис.16. Влияние магнитного поля  $H$  на температурную зависимость теплового расширения  $\text{MgB}_2$  в области аномалии. Кривая 1 –  $H=0$ ; кривая 2 –  $H=3.6$  Т.

## 5. Заключение и выводы по результатам исследования $MgB_2$ .

1. Были оценены различные электронные параметры для  $MgB_2$ . Например, величина отношения скачка теплоемкости в области перехода в сверхпроводящее состояние  $\Delta C$  к коэффициенту при линейной части теплоемкости  $\gamma$  и  $T_c$ :  $\Delta C/\gamma T_c$ .

Найдено, что  $\Delta C/\gamma T_c=2.6-2.9$  (разные образцы). По БКШ (слабая связь)  $\Delta C/\gamma T_c=1.43$ .

Т.е. в  $MgB_2$ , несомненно, осуществляется сильная связь.

2. В  $MgB_2$  наблюдается совпадение трех аномалий при  $T=10-12K$ : теплоемкости  $C(T)$ , теплопроводности  $K(T)$  и теплового расширения. Хотелось бы сказать, что при  $T=10-12 K$  в  $MgB_2$  наблюдается фазовый переход, связанный с открытием второй сверхпроводящей щели. Но, как показывают туннельные исследования (Я.Г.Пономарев), вторая (малая) щель открывается также при  $T\approx 40 K$  и «тянется» до «своей» температуры  $T\approx 10-12 K$ . В этой области температур наблюдается резкое возрастание ее величины (и плотности электронных состояний). На это и реагируют  $C(T)$  и  $K(T)$ . Поэтому теоретики (Ю.В.Копаев, Е.Г.Максимов) не считают, что при  $T=10-12 K$  происходит фазовый переход. Иногда такое поведение называют «кроссовером».

3. Для объяснения аномалии теплового расширения в  $MgB_2$  наиболее привлекательной кажется идея Ю.В.Копаева: сумма двух щелей «держит» оптимальные параметры решетки, чтобы сохранить отрицательный вклад в энергию системы, связанный с наличием Бозе-конденсата. Хотя не исключено, что работают все три модели.

4. Наличие малой щели, т.е. второго Бозе-конденсата в  $MgB_2$ , должно понижать  $T_c$  и  $\Delta$  этого соединения («внутренний эффект близости»). Какова же была бы «истинная»  $T_c$   $MgB_2$  без второй группы электронов? И как убрать ее влияние?

## **Заключение: что же дальше?**

Итак, уже для целого ряда ВТСП систем обнаружено аномальное (отрицательное) тепловое расширение  $\alpha(T)$  при низких температурах и аномально сильное влияние относительно небольших (1-4 Тл) магнитных полей на  $\alpha(T)$  в этой области температур. Однако, до сих пор не получено однозначного вывода о природе этих аномалий. Особенно интересен вопрос о природе сильного влияния магнитного поля на тепловое расширение, которое в стандартной модели теплового расширения должно быть пренебрежимо малым.

В настоящее время имеются, по крайней мере, 3 модели или идеи, объясняющие это явление:

1. **Феноменологическое объяснение** («стандартная модель»). Наличие отрицательного теплового расширения связывается с ростом плотности электронных состояний на уровне Ферми и  $T_c$  с давлением. Последнее действительно наблюдается во многих ВТСП системах. В свою очередь, эти эффекты могут быть связаны с ростом эффективной массы носителей заряда при увеличении давления, что возможно в зонной модели сильной связи с резонансным туннелированием.

2. **Влияние волн зарядовой плотности (ВЗП)** на устойчивость кристаллической решетки ВТСП систем. В оксидных ВТСП возникает сверхструктурное упорядочение (ВЗП) в подрешетке кислорода. Без учета дополнительного кулоновского взаимодействия ВЗП с ионной решеткой кристаллическая структура ВТСП систем неустойчива, т.е. частота поперечных акустических фононов  $\omega_{TA}$  на границе зоны Бриллюэна стремится к нулю. Взаимодействие между ВЗП и решеткой приводит к тому, что частота  $\omega_{TA}$  на границе зоны Бриллюэна становится положительной ( $\omega_{TA} > 0$ ). С ростом  $T$  или  $H$  амплитуда ВЗП падает из-за увеличения экранирования, система становится менее стабильной, и область аномалии смещается в сторону низких температур.

3. **Идея Ю.В.Копаева** (для ВТСП). При  $T=0$  параметры системы оптимальны для достижения высоких  $T_c$ . С ростом  $T$  система должна выйти из области оптимальных параметров (тепловое расширение). Наличие значительного отрицательного вклада в энергию системы из-за перехода в сверхпроводящее состояние заставляет систему «подстраиваться», чтобы сохранить этот вклад. При более высоких  $T$  это соответствует меньшим параметрам решетки. Магнитное поле уменьшает этот вклад, т.е. смещает область аномалии в сторону низких температур.

Для однозначного вывода необходимо исследовать другие ВТСП системы и слоистые соединения с другим типом катионной подрешетки. Примером последних являются рутенаты  $(Sr_{1-x}La_x)_3Ru_2O_7$ , которые являются несверхпроводящими аналогами слоистых ВТСП систем. Это двухслойные соединения, т. е. содержат блоки из двух плоскостей  $RuO_2$ . В этом отношении



они аналогичны «двухслойному» ВТСП соединению  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , которое имеет блоки из двух плоскостей  $\text{CuO}_2$ .

В настоящее время нами начато исследование монокристаллов системы  $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_6$ , с целью изучения влияния недолегирования и перелегирования на аномалию  $\alpha(T)$ , и монокристаллов рутената  $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ , т.е. соединения с другим типом катионной подрешетки. Получены первые результаты.

На Рис.17 показаны температурные зависимости теплового расширения  $\Delta L/L$  монокристалла  $(\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1})_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  в нулевом магнитном поле и поле 3.53 Т.

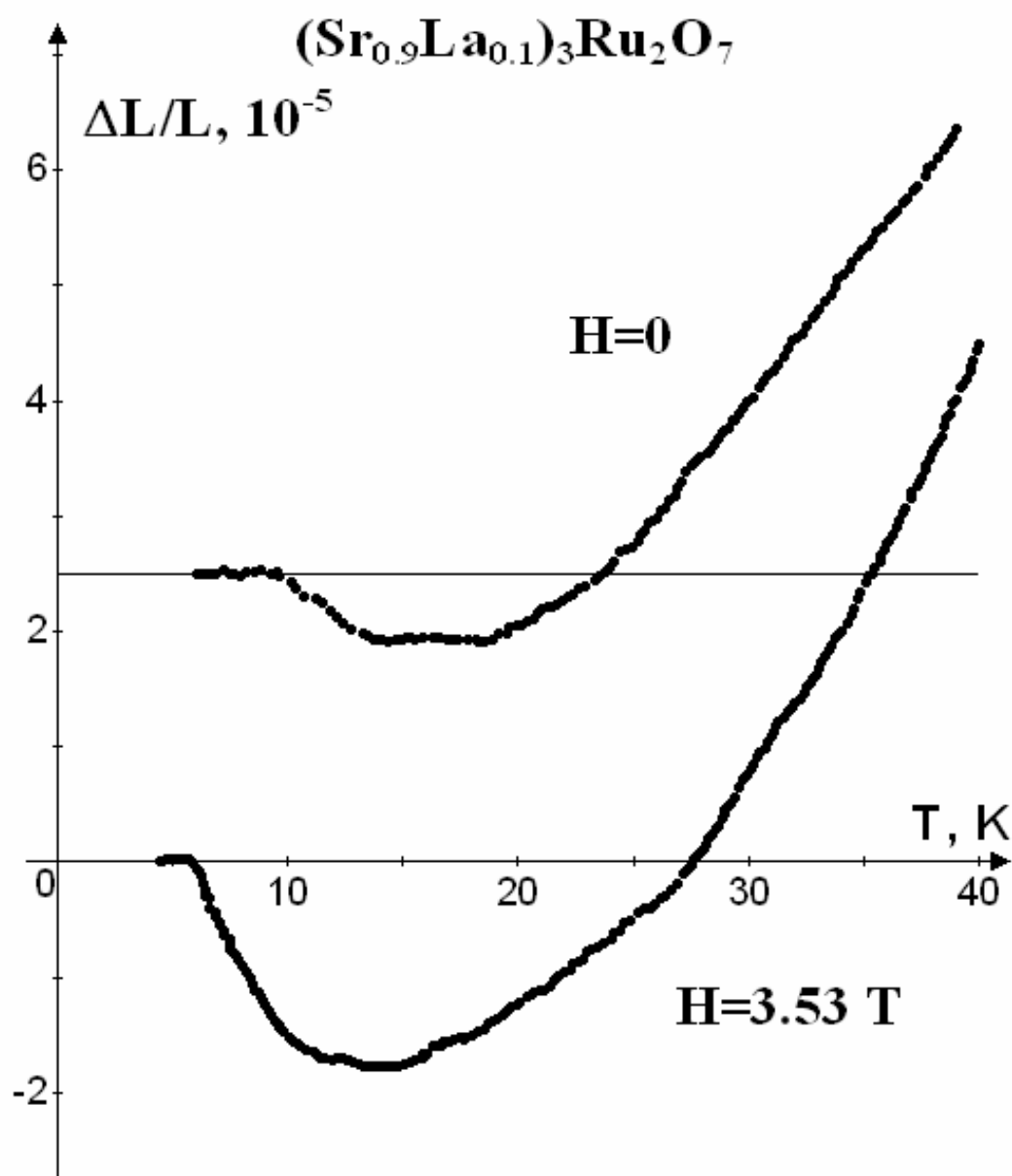


Рис.17. Температурные зависимости изменения длины  $\Delta L/L$  монокристалла  $(\text{Sr}_{0.9}\text{La}_{0.1})_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  при  $H=0$  и  $H=3.53 \text{ T}$ .

Интересно, что в рутенате магнитное поле не давит, а усиливает аномалию, хотя и смещает положение минимума коэффициента теплового расширения  $\alpha$  в сторону низких температур. Возможно, наблюдаемая разница в поведении исследуемого рутената и ВТСП систем связана с тем, что в рутенате при низких температурах существуют ферромагнитные флуктуации, тогда как в ВТСП системах наблюдается антиферромагнитное упорядочение. Есть над чем подумать.

## Литература.

Для данного препринта (и подготовленного доклада) использованы материалы следующих наших работ:

1. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков. Аномальное влияние магнитного поля на тепловое расширение  $Ba_{1-x}K_xBiO_3$ ,  $BaPb_xBi_{1-x}O_3$  и  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  при низких температурах. Письма в ЖЭТФ **71**, №9, 550-553 (2000).
2. A.I.Golovashkin. High-Temperature Superconductors. IV Escuela Nacional de Fisica de la Materia Condensada (IV ENFMC) y I Encuentro Internacional de Fisica Aplicada a la Industria del Petroleo (I-EIFAIP). Resumenes. Octubre 9-13, 2000, Bucaramanga, Colombia, p.19-20 (2000).
3. A.I.Golovashkin, N.V.Anshukova, L.I.Ivanova, I.B.Krinetskii, A.P.Rusakov. Magnetostriction and thermal expansion of  $BaPb_yBi_{1-y}O_3$  and  $Ba_{1-x}K_xBiO_3$  at low temperatures. Physica B **284-288**, 1485-1486 (2000).
4. A.I.Golovashkin, N.V.Anshukova, L.I.Ivanova, I.B.Krinetskii, A.P.Rusakov. Strong influence of magnetic field on the thermal expansion anomaly in  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  and  $Ba_{1-x}K_xBiO_3$  systems. Physica C **341-348** 1945-1946 (2000).
5. А.И.Головашкин, А.П.Русаков. Экспериментальные исследования особенностей тепловых и электронных характеристик  $Ba_{1-x}K_xBiO_3$  и других перовскито-подобных оксидных ВТСП систем. УФН **170**, №2, 192-195 (2000).
6. Н.В.Аншукова, Б.М.Булычев, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков. Влияние магнитного поля на аномалию теплового расширения  $MgB_2$  при низких температурах. Краткие сообщения по физике, Москва, ФИАН, №7, 16-23 (2001).
7. N.V.Anshukova, B.M.Bulichev, A.I.Golovashkin, L.I.Ivanova, I.B.Krinetskii, A.P.Rusakov. Thermal expansion anomaly of  $MgB_2$  at low temperatures and magnetic field influence. Physica C **377**, 190-195 (2002).
8. Н.В.Аншукова, Б.М.Булычев, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, А.А.Минаков, А.П.Русаков. Температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности  $MgB_2$  при низких температурах. Краткие сообщения по физике, Москва, ФИАН №4, 24-34 (2002).
9. Н.В.Аншукова, Б.М.Булычев, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.А.Минаков, А.П.Русаков. Аномальное поведение тепловых характеристик  $MgB_2$  при низких температурах. ЖЭТФ **124**, №1(7), 80-88 (2003).
10. Н.В.Аншукова, Б.М.Булычев, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков. Аномалии теплового расширения  $MgB_2$  при низких температурах. ФТТ **45**, №1, 8-11 (2003).
11. Н.В.Аншукова, Б.М.Булычев, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, А.А.Минаков, А.П.Русаков. Аномалии теплоемкости и теплопроводности  $MgB_2$  при низких температурах. ФТТ **45**, №7, 1153-1158 (2003).

12. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков, Д.А.Шулятев. Отрицательное тепловое расширение при низких температурах и его сильная зависимость от магнитного поля в  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$ . Краткие сообщения по физике, Москва, ФИАН №8, 32-40 (2003).
13. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, А.П.Русаков. Влияние сверхструктурного упорядочения на свойства оксидных ВТСП систем. ЖЭТФ **123**, №6, 1188-1199 (2003).
14. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков. Аномалия теплового расширения  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  при низких температурах. Научная сессия МИФИ-2004. Сборник научных трудов. М., 2004г. Т.4, сс.112-113.
15. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков, Д.А.Шулятев. Аномалия теплового расширения  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  при низких температурах. ФТТ **46**, №8, 1356-1359 (2004).
16. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, А.П.Русаков, Б.М.Булычев, И.Б.Крынецкий. Аномальные тепловые свойства  $\text{MgB}_2$ . Труды 1<sup>ой</sup> Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (ФПС'04), Москва-Звенигород, 18-22 октября 2004 года, с. 91-92.
17. А.И.Головашкин, Н.В.Аншукова, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.А.Минаков, А.П.Русаков. Проявление двух сверхпроводящих щелей в тепловых характеристиках  $\text{MgB}_2$ . Научная сессия МИФИ-2004. Сборник научных трудов. М., 2004г. Т.4, сс.114-115.
18. А.И.Головашкин, Н.В.Аншукова, Л.И.Иванова, А.П.Русаков, Д.А.Шулятев, И.Б.Крынецкий. Аномальное тепловое расширение монокристаллов  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  при низких температурах и влияние на него магнитного поля. Труды 1<sup>ой</sup> Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (ФПС'04), Москва-Звенигород, 18-22 октября 2004 года, с. 101-102.
19. А.И.Головашкин, А.М.Цховребов, А.П.Русаков, Г.В.Кулешова. Аномалии теплового расширения ВТСП: микроскопические следствия феноменологической модели. Труды 1<sup>ой</sup> Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости» (ФПС'04), Москва-Звенигород, 18-22 октября 2004 года, с. 199-200.
20. Yu.V.Kopaev, A.I.Golovashkin, N.V.Anshukova, L.I.Ivanova, I.B.Krinetskii, A.P.Rusakov. Thermal expansion anomaly in  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  at low temperatures. Доклад на Международной конференции New<sup>3</sup>SC-5 (Chungking, China, 11-16 June 2004).
21. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков, Д.А.Шулятев. Исследование теплового расширения монокристаллов  $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  при низких температурах. ФТТ (2005, в печати).

22. Н.В.Аншукова, А.И.Головашкин, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков, Д.А.Шулятев. Низкотемпературная аномалия теплового расширения монокристаллов  $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  и влияние на нее магнитного поля. Краткие сообщения по физике, ФИАН, Москва (2005, в печати).
23. А.И.Головашкин, Н.В.Аншукова, Л.И.Иванова, И.Б.Крынецкий, А.П.Русаков, Д.А.Шулятев. Низкотемпературное тепловое расширение монокристаллов  $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)_3\text{Ru}_2\text{O}_7$ . Научная сессия МИФИ-2005. Сборник трудов, т.4, 154-155 (2005).