

Конференция
«Современные сверхпроводящие
материалы, технологии и устройства»
17 декабря 2025, ОИВТ РАН, Москва

Температурные зависимости объёмного и межзёрненного критических токов в перспективном железосодержащем сверхпроводнике $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

**С.А. Кузьмичев^{1,2}, Т.Е. Кузьмичева², А.Д. Ломоносова^{2,3}, И.А. Никитченков^{1,2},
В.А. Власенко², А.С. Медведев², К.С. Перваков²**

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия

План доклада

1. Чем интересен $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Введение

2. Как напрямую и локально измерить энергетические параметры сверхпроводящих (СП) конденсатов?

Детали эксперимента

- спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)
- создание планарных механически регулируемых контактов на микротрещине
- применимость к поликристаллам слоистых соединений

3. Какова СП щелевая структура и $I_c(T)$ для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Экспериментальные данные

- многощелевая сверхпроводимость и температурные зависимости СП щелей
- температурные зависимости объёмного и межзёренного критического сверхтока

Результаты и выводы

План доклада

1. Чем интересен $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Введение

2. Как напрямую и локально измерить энергетические параметры сверхпроводящих (СП) конденсатов?

Детали эксперимента

- спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)
- создание планарных механически регулируемых контактов на микротрещине
- применимость к поликристаллам слоистых соединений

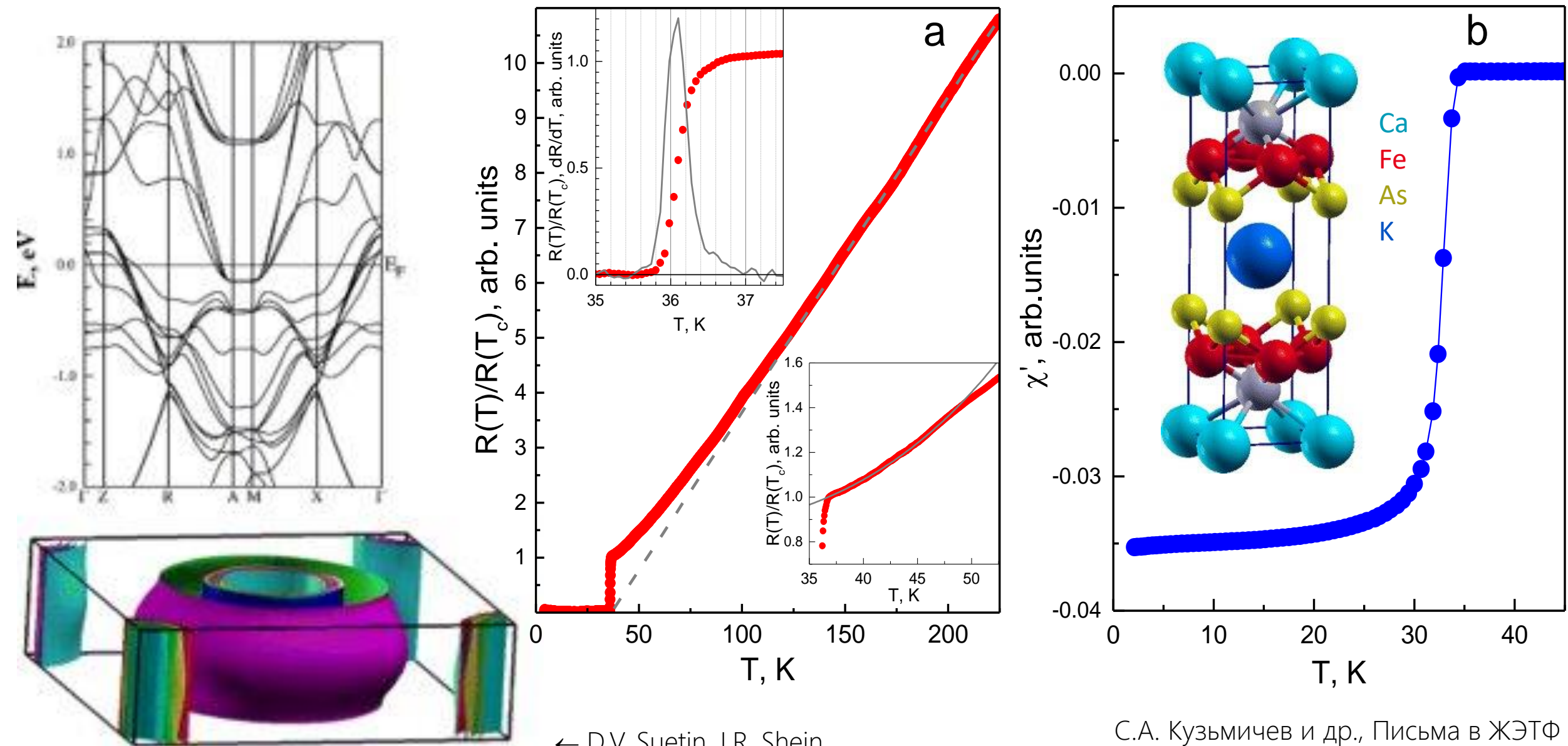
3. Какова СП щелевая структура и $I_c(T)$ для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Экспериментальные данные

- многощелевая сверхпроводимость и температурные зависимости СП щелей
- температурные зависимости объёмного и межзёренного критического сверхтока

Результаты и выводы

Семейство 1144 железосодержащих пниктидов – $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



← D.V. Suetin, I.R. Shein,
JSNM 31, 1683 (2018)

С.А. Кузьмичев и др., Письма в ЖЭТФ
119, 757 (2024)

План доклада

1. Чем интересен $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Введение

2. Как напрямую и локально измерить энергетические параметры сверхпроводящих (СП) конденсатов?

Детали эксперимента

- спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)
- создание планарных механически регулируемых контактов на микротрещине
- применимость к поликристаллам слоистых соединений

3. Какова СП щелевая структура и $I_c(T)$ для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

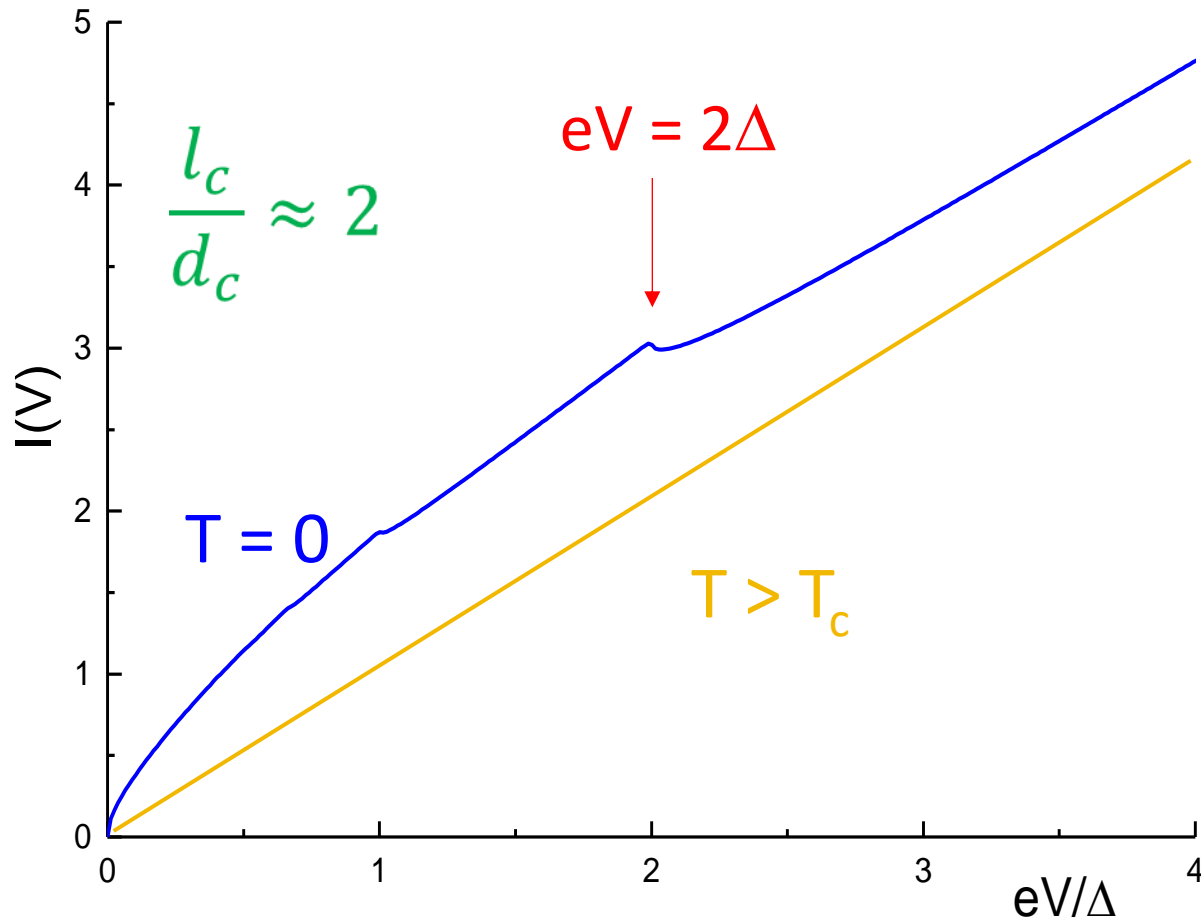
Экспериментальные данные

- многощелевая сверхпроводимость и температурные зависимости СП щелей
- температурные зависимости объёмного и межзёренного критического сверхтока

Результаты и выводы

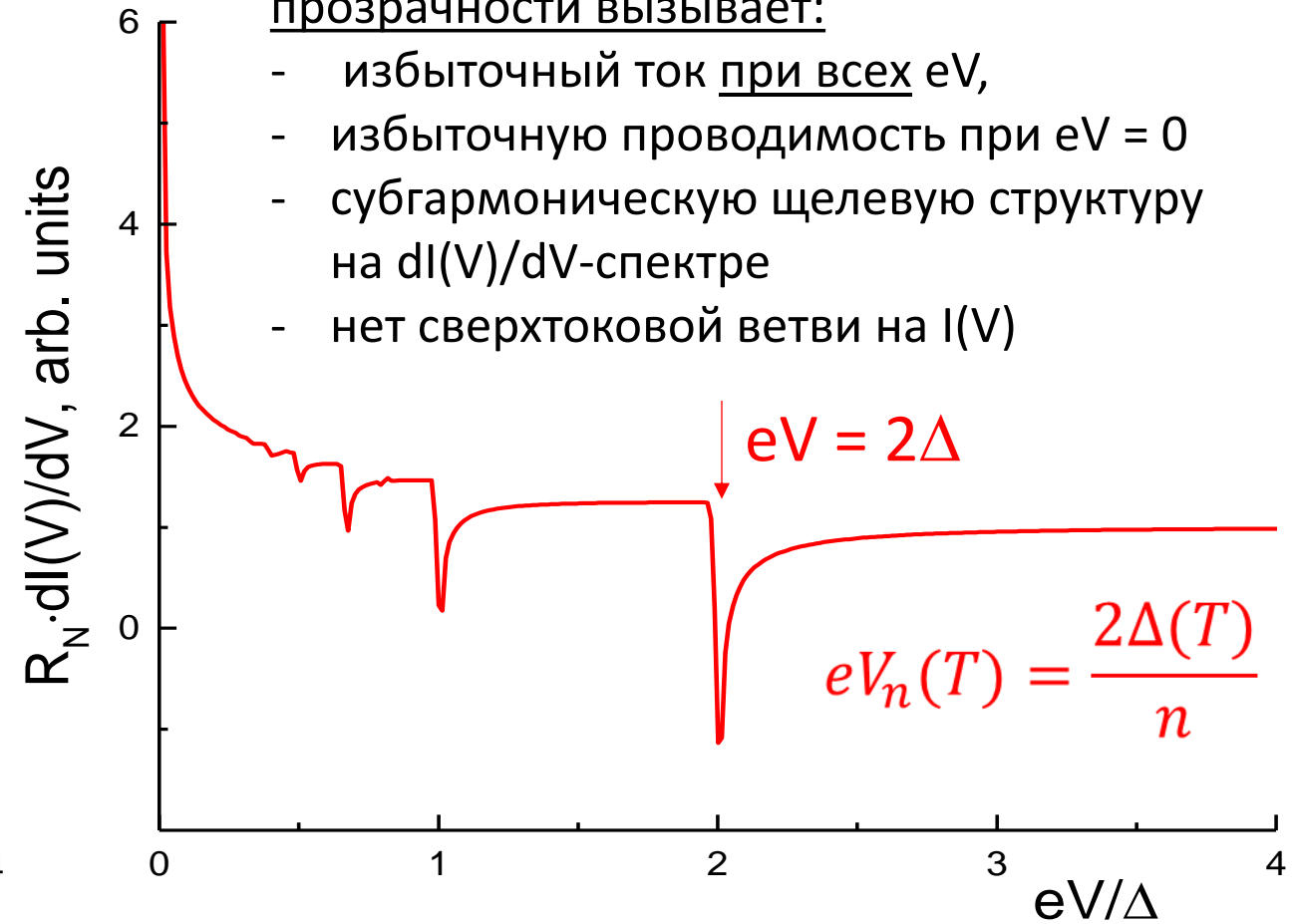
Спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)

SnS-контакт в диффузионном режиме



ЭНМАО в SnS-контакте высокой прозрачности вызывает:

- избыточный ток при всех eV ,
- избыточную проводимость при $eV = 0$
- субгармоническую щелевую структуру на $dI(V)/dV$ -спектре
- нет сверхтоковой ветви на $I(V)$



M. Octavio, M. Tinkham, G.E. Blonder, T.M. Klapwijk, Phys. Rev. B **27**, 6739 (1983);

G.B. Arnold, J. Low Temp. Phys. **68**, 1 (1987);

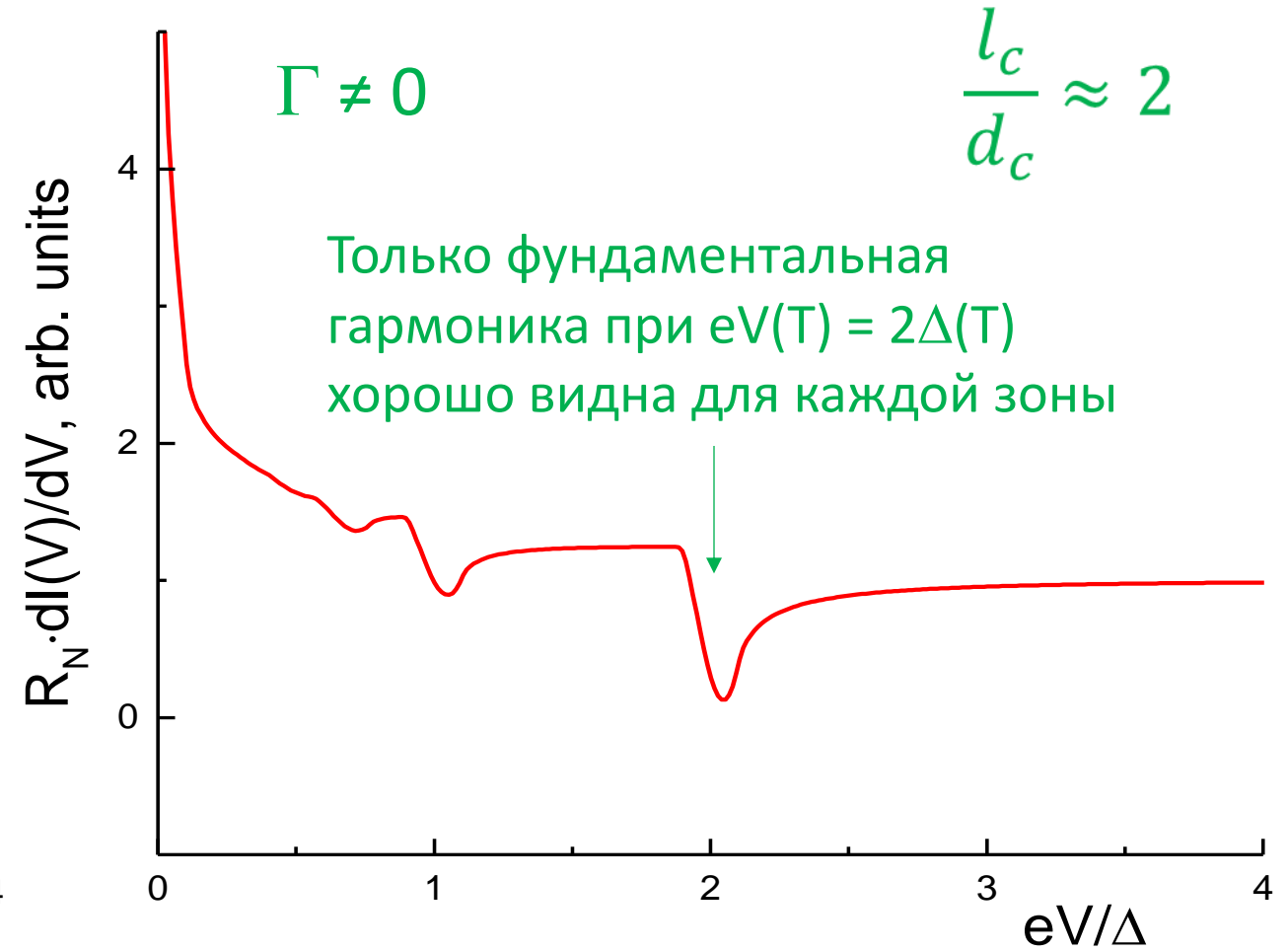
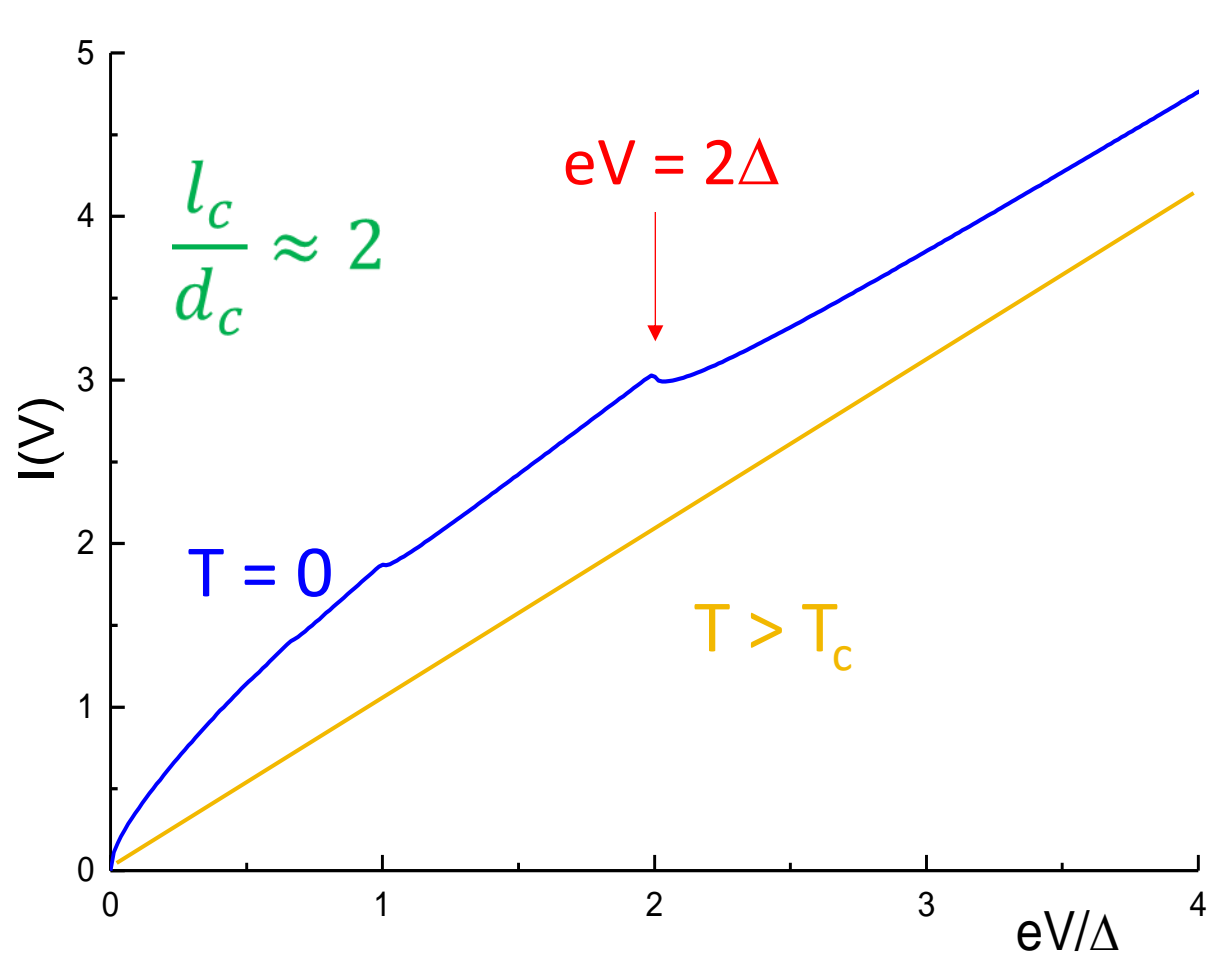
D. Averin, A. Bardas, Phys. Rev. Lett. **75**, 1831 (1995);

R. Kümmel, U. Günsenheimer, R. Nicolsky, Phys. Rev. B **42**, 3992 (1990);

Z. Popovic, S.A.K., T.E. Kuzmicheva, J. Appl. Phys. **128**, 013901 (2020).

Спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)

SnS-контакт в диффузионном режиме



M. Octavio, M. Tinkham, G.E. Blonder, T.M. Klapwijk, Phys. Rev. B **27**, 6739 (1983);

G.B. Arnold, J. Low Temp. Phys. **68**, 1 (1987);

D. Averin, A. Bardas, Phys. Rev. Lett. **75**, 1831 (1995);

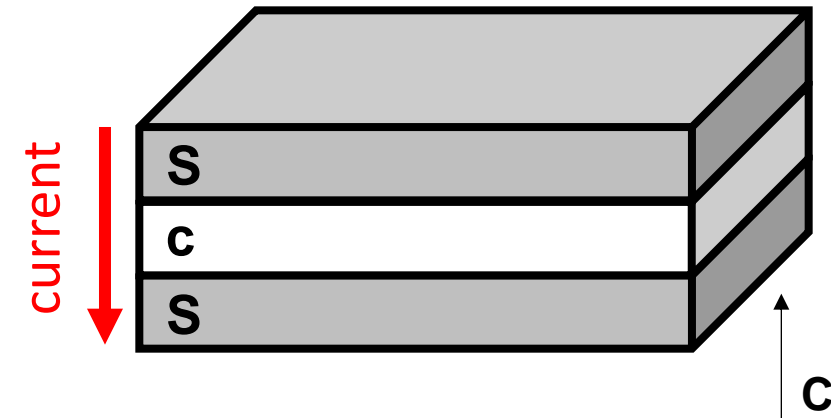
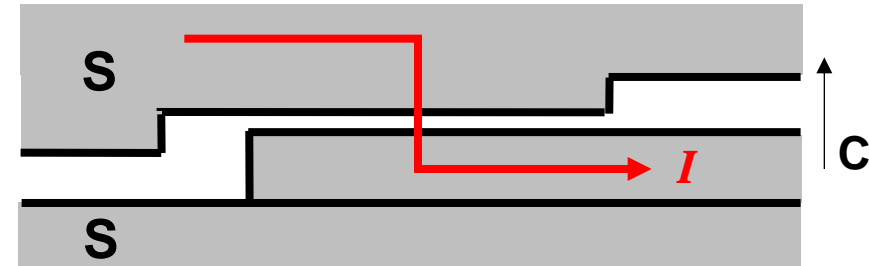
R. Kümmel, U. Günsenheimer, R. Nicolsky, Phys. Rev. B **42**, 3992 (1990);

Z. Popovic, S.A.K., T.E. Kuzmicheva, J. Appl. Phys. **128**, 013901 (2020).

Создание механически регулируемых планарных контактов на микротрещине

Преимущества:

- Чистые криогенные сколы
- Истинное четырёхточечное подключение
- Применимо к моно- и поликристаллам слоистых соединений
- Надежный теплоотвод
- Механическая перестройка контакта
- Большая статистика данных на одном и том же образце
- Планарный контакт контролируемой геометрии (всегда $j \parallel c$)
- Реализация двух спектроскопических методов: туннельной и ЭНМАО
- Прямое локальное измерение объемных СП параметров порядка и их температурной зависимости в режиме ЭНМАО



План доклада

1. Чем интересен $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Введение

2. Как напрямую и локально измерить энергетические параметры сверхпроводящих (СП) конденсатов?

Детали эксперимента

- спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)
- создание планарных механически регулируемых контактов на микротрещине
- применимость к поликристаллам слоистых соединений

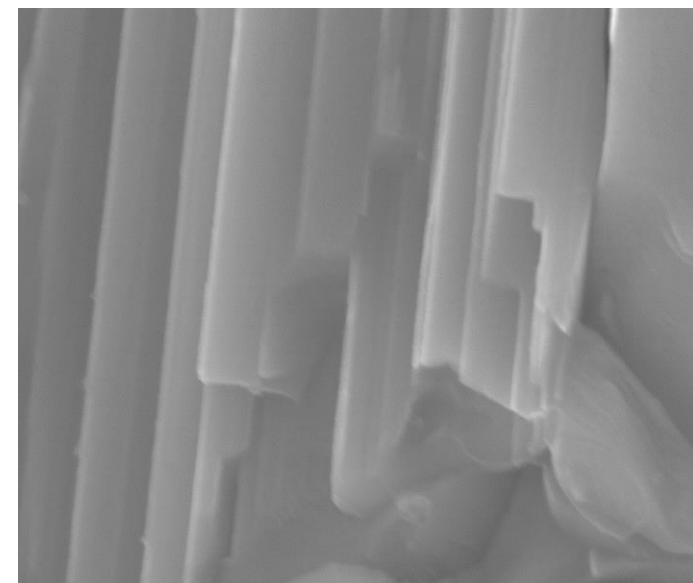
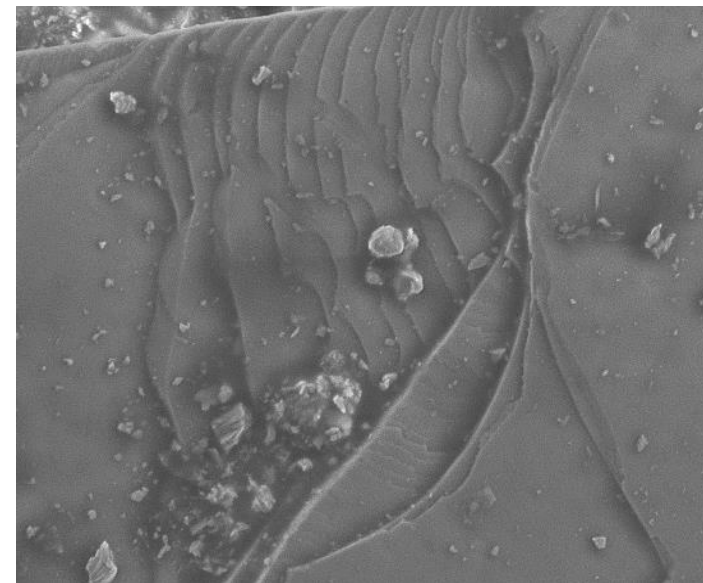
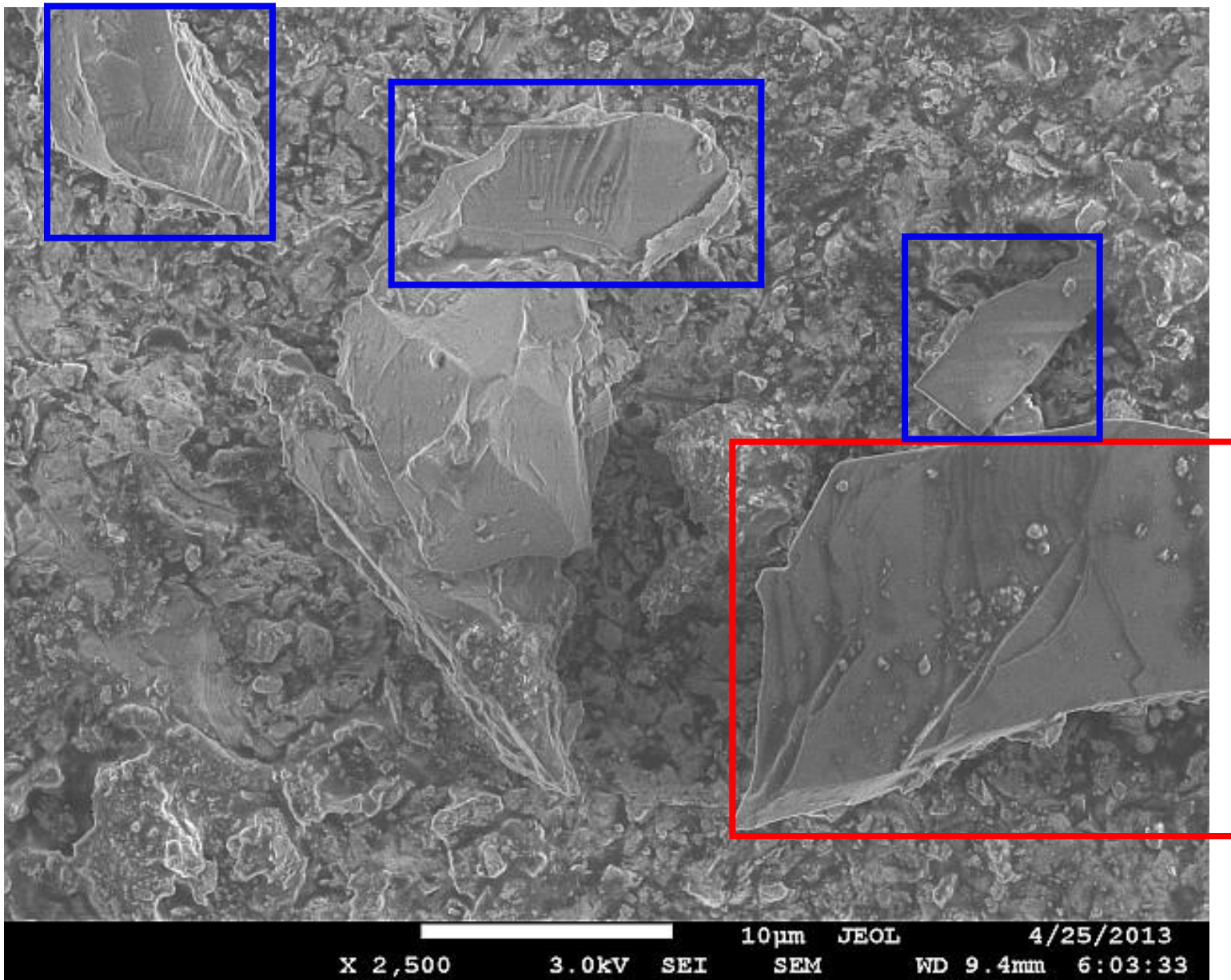
3. Какова СП щелевая структура и $I_c(T)$ для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Экспериментальные данные

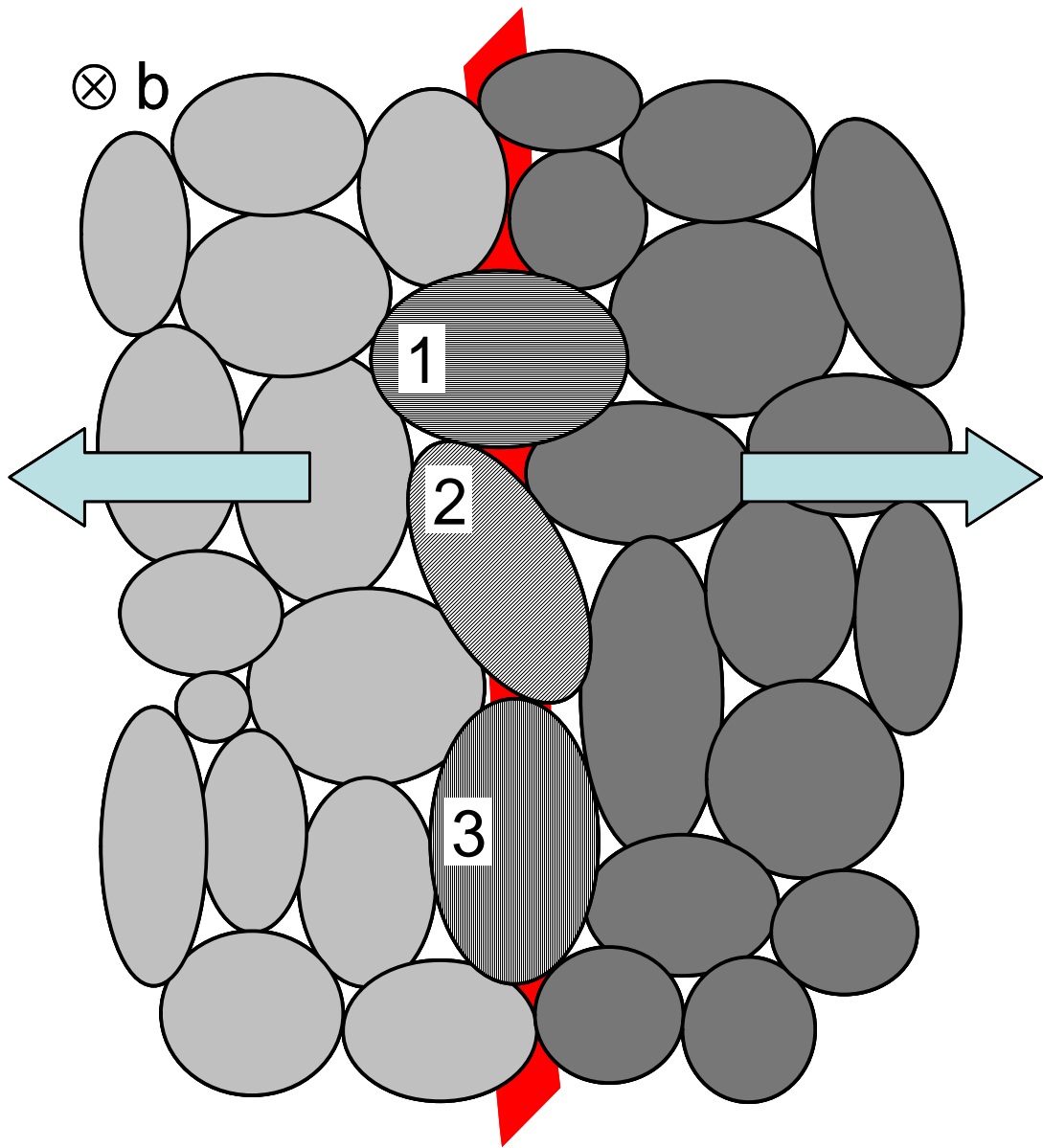
- многощелевая сверхпроводимость и температурные зависимости СП щелей
- температурные зависимости объёмного и межзёренного критического сверхтока

Результаты и выводы

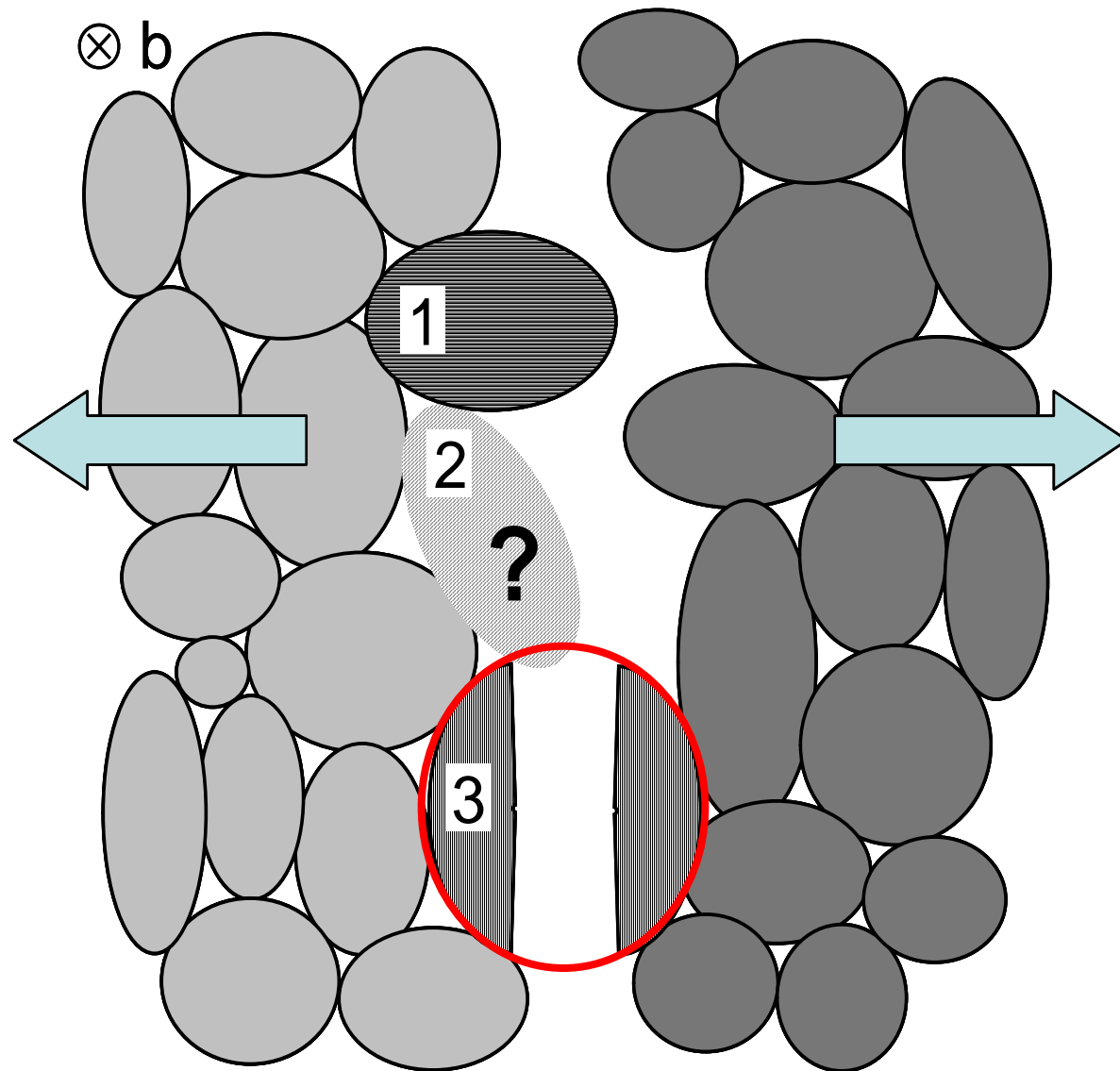
Применимость к поликристаллам слоистых соединений



Применимость к поликристаллам слоистых соединений

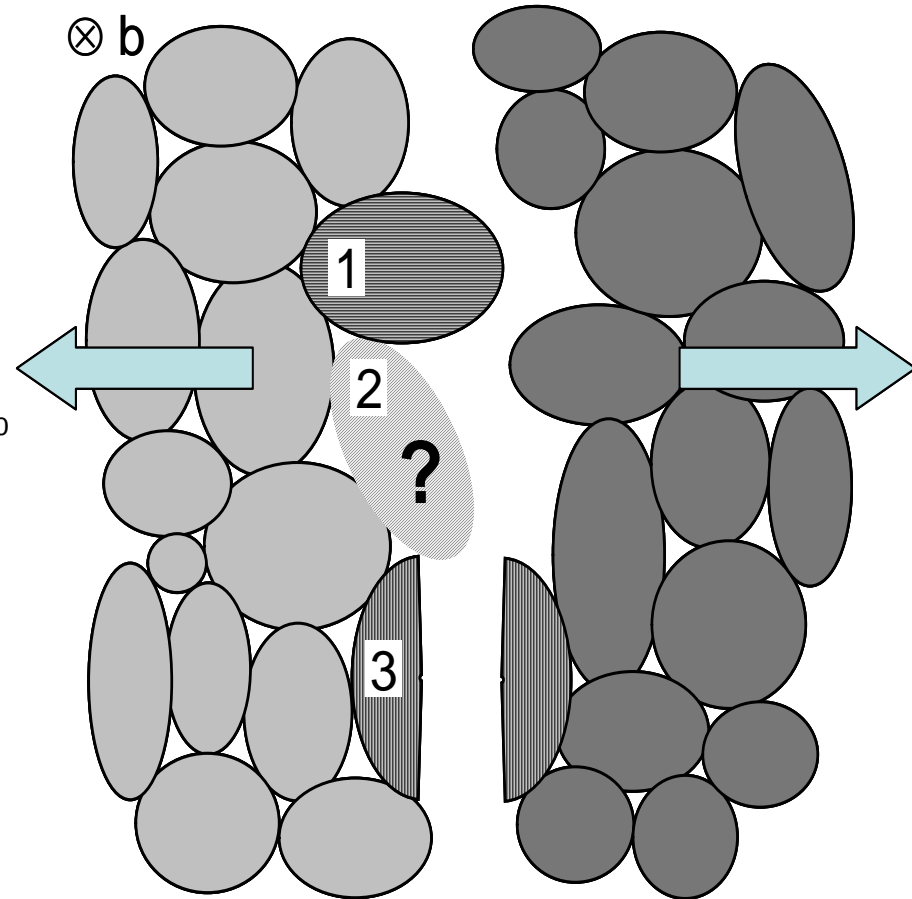
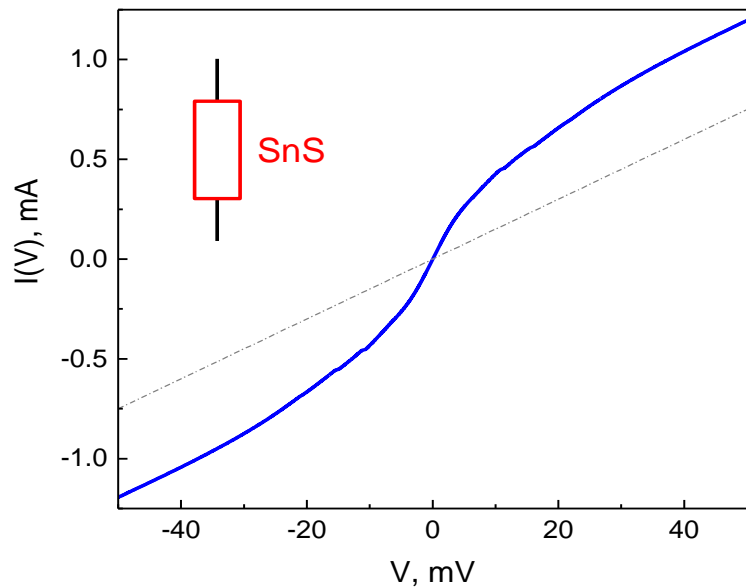
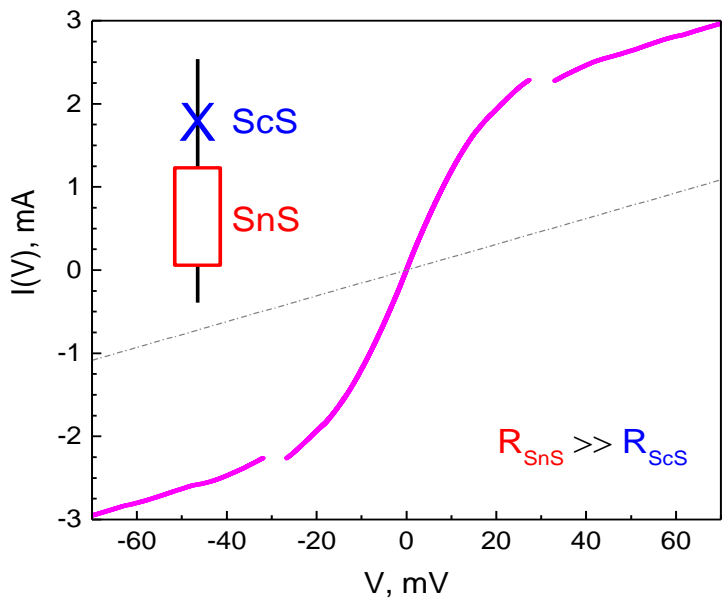
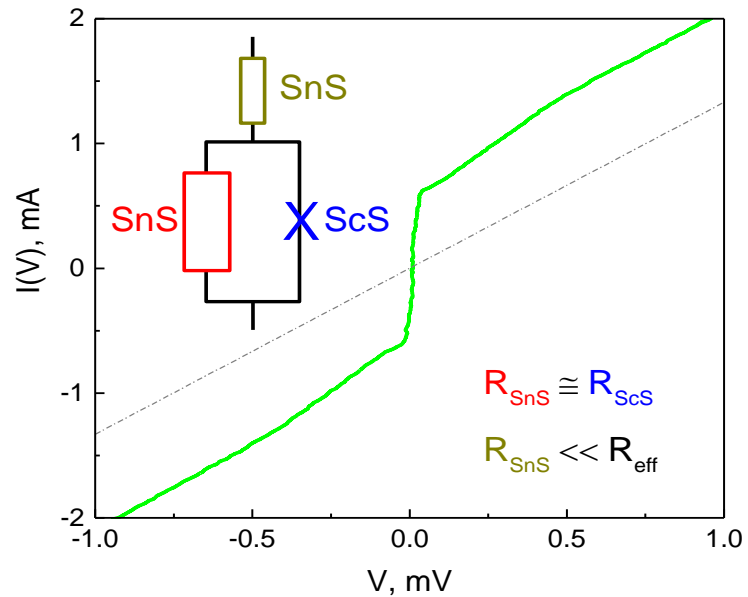
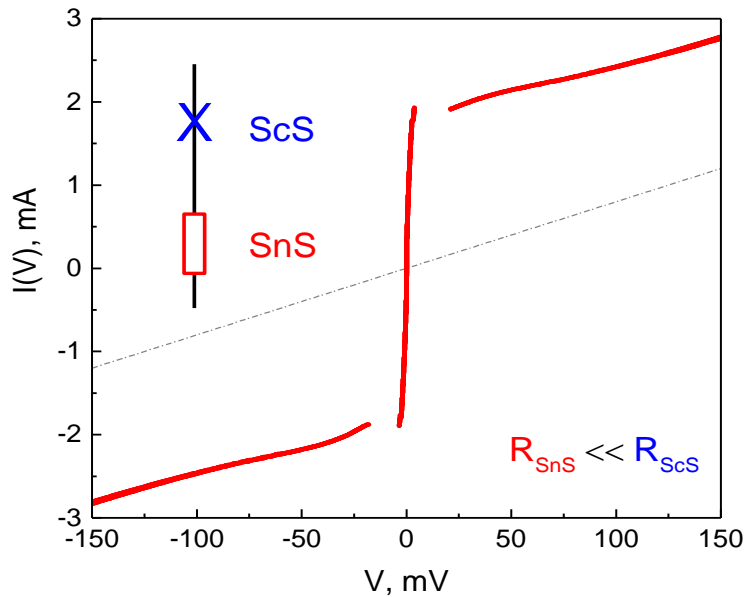


поликристалл слоистого материала до...



... и после образования микротрещины

Типы получаемых туннельных структур



План доклада

1. Чем интересен $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Введение

2. Как напрямую и локально измерить энергетические параметры сверхпроводящих (СП) конденсатов?

Детали эксперимента

- спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)
- создание планарных механически регулируемых контактов на микротрещине
- применимость к поликристаллам слоистых соединений

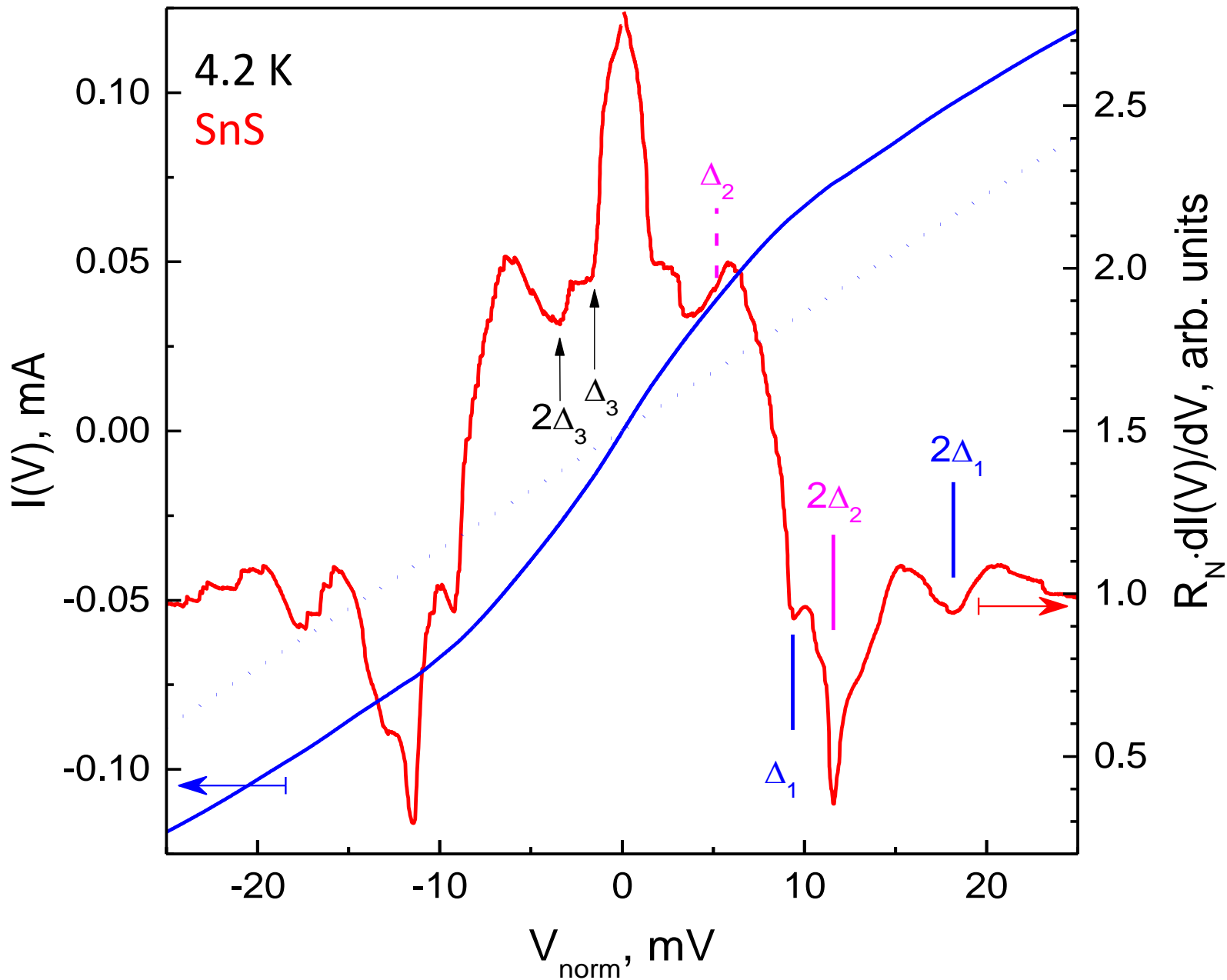
3. Какова СП щелевая структура и $I_c(T)$ для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Экспериментальные данные

- многощелевая сверхпроводимость и температурные зависимости СП щелей
- температурные зависимости объёмного и межзёренного критического сверхтока

Результаты и выводы

Многощелевая сверхпроводимость $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

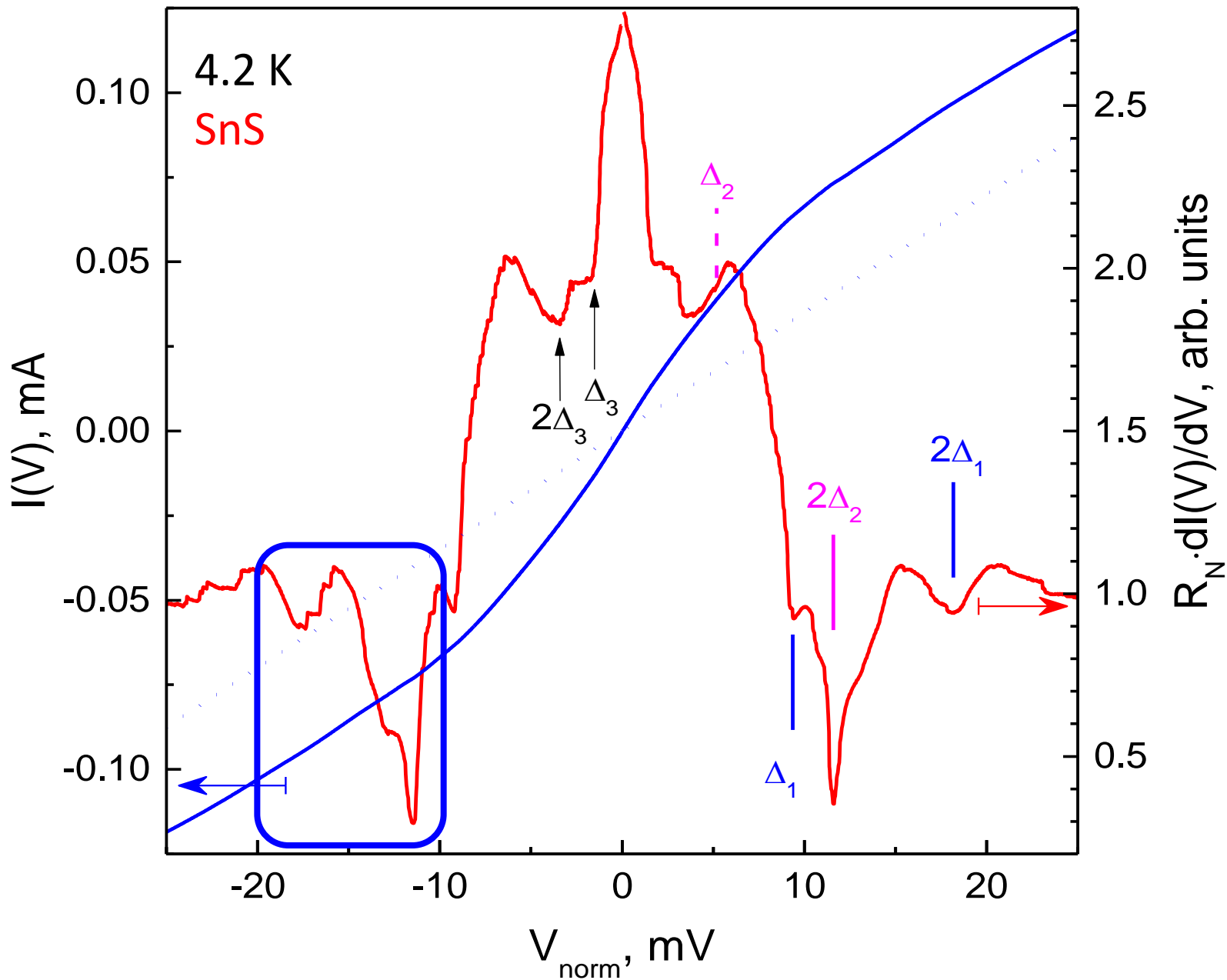


Напрямую определены СП
параметры порядка:

$$\Delta_1 = 8 \text{ мэВ}, \Delta_2 = 4.8 \text{ мэВ},$$

$$\Delta_3 = 1.9 \text{ мэВ} \text{ при } T \ll T_c.$$

Многощелевая сверхпроводимость $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

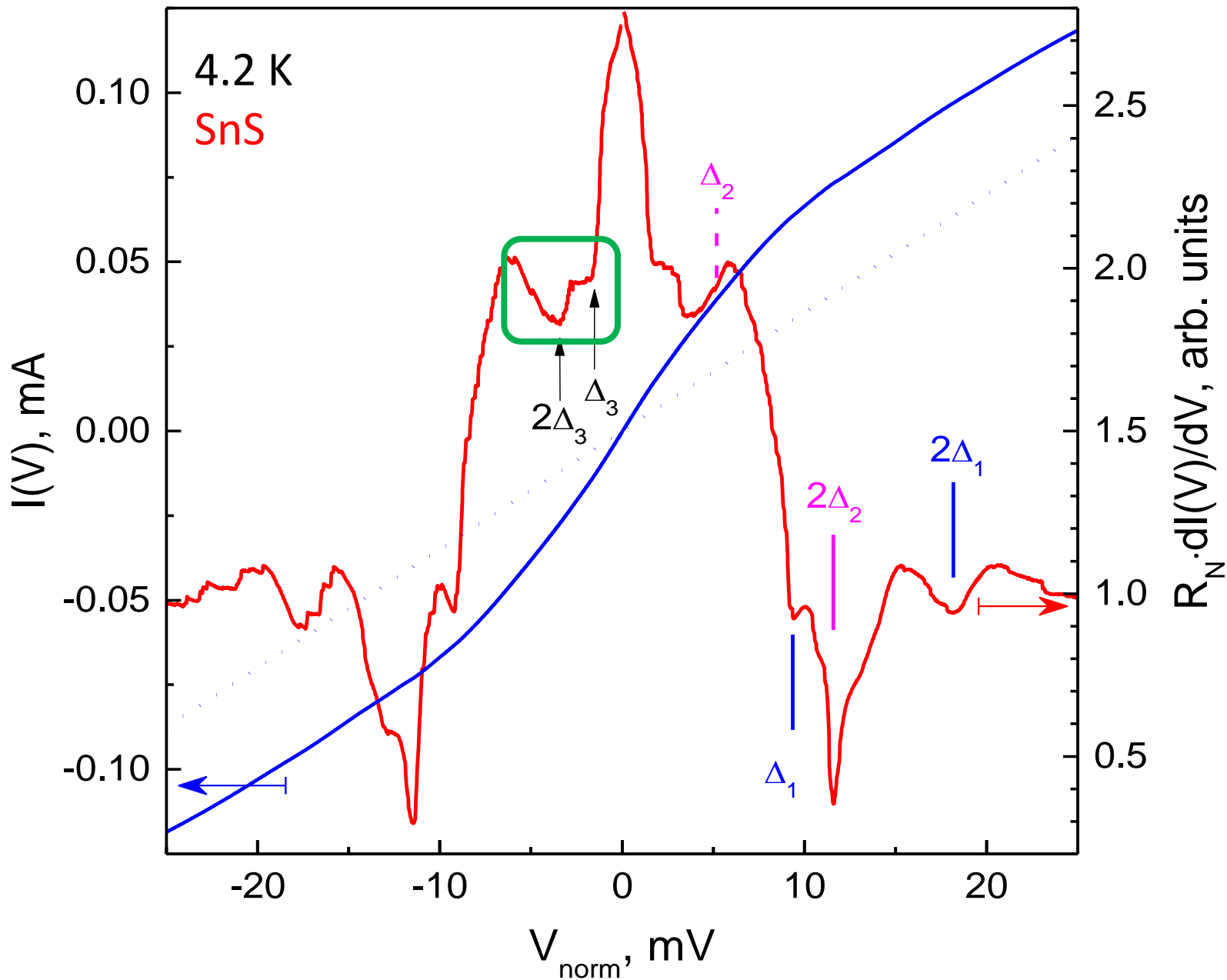


Напрямую определены СП
параметры порядка:

$$\Delta_1 = 8 \text{ мэВ}, \Delta_2 = 4.8 \text{ мэВ},$$

$$\Delta_3 = 1.9 \text{ мэВ} \text{ при } T \ll T_c.$$

Многощелевая сверхпроводимость $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

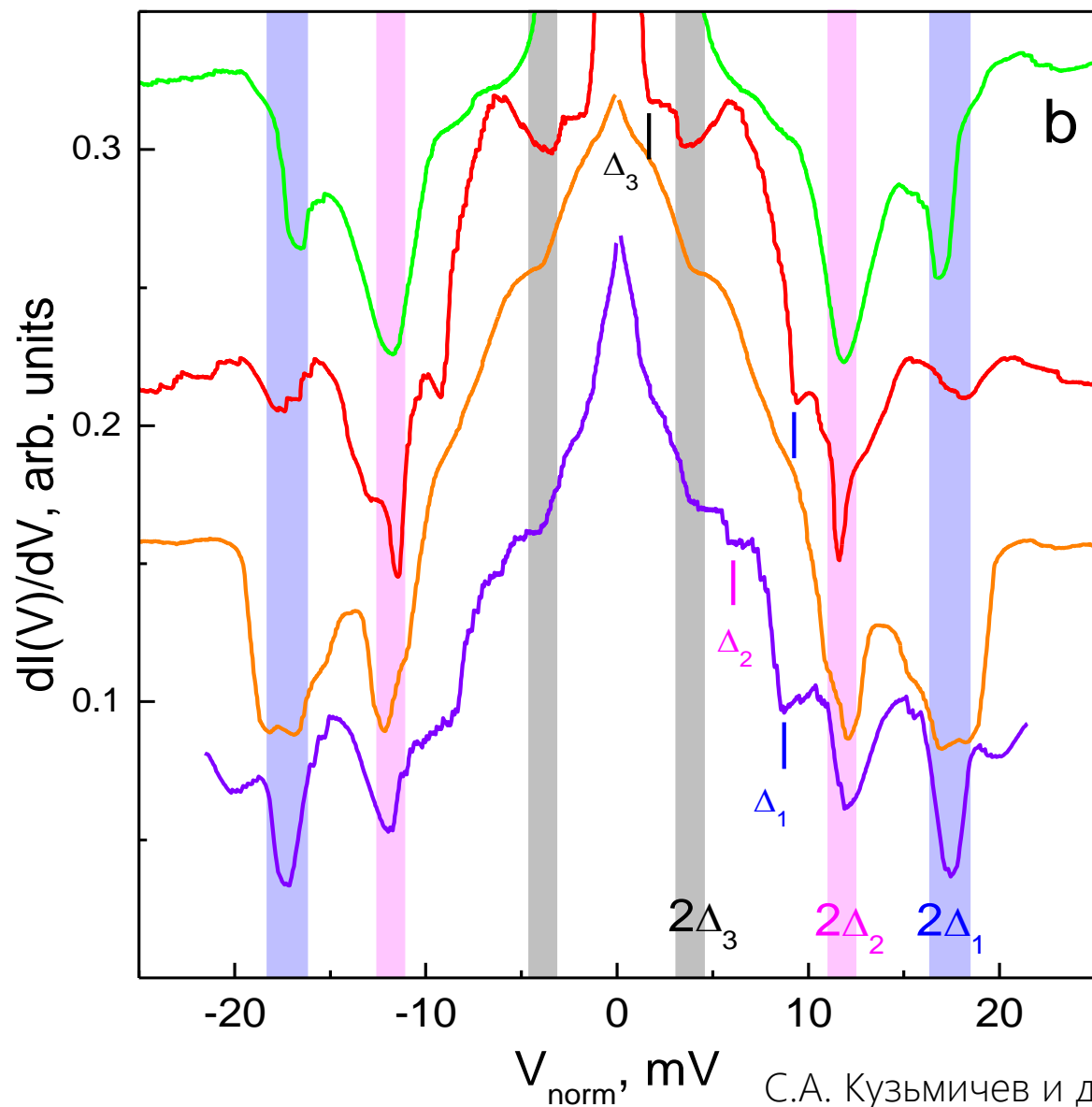
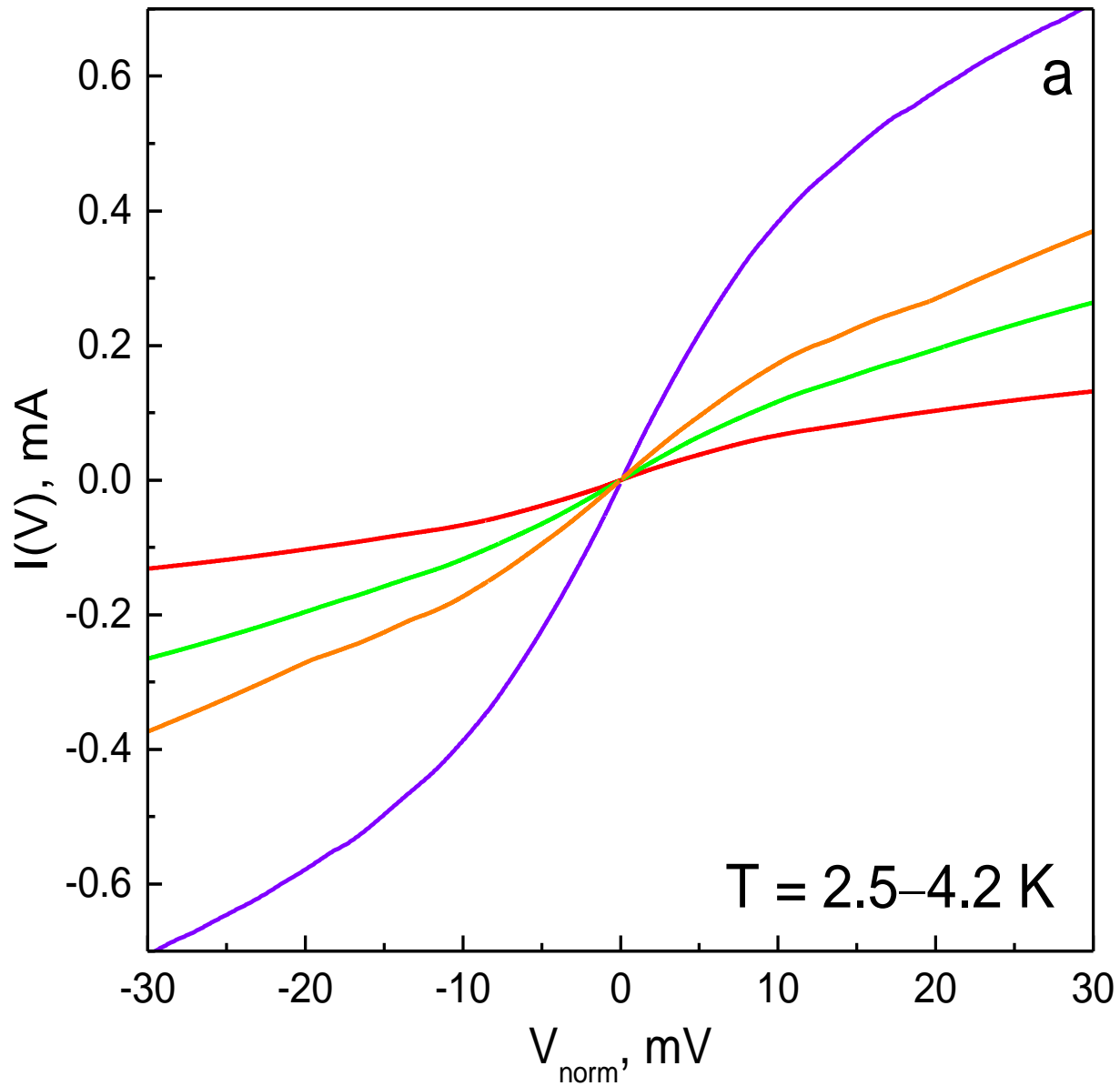


Напрямую определены СП
параметры порядка:

$$\Delta_1 = 8 \text{ мэВ}, \Delta_2 = 4.8 \text{ мэВ},$$

$$\Delta_3 = 1.9 \text{ мэВ} \text{ при } T \ll T_c.$$

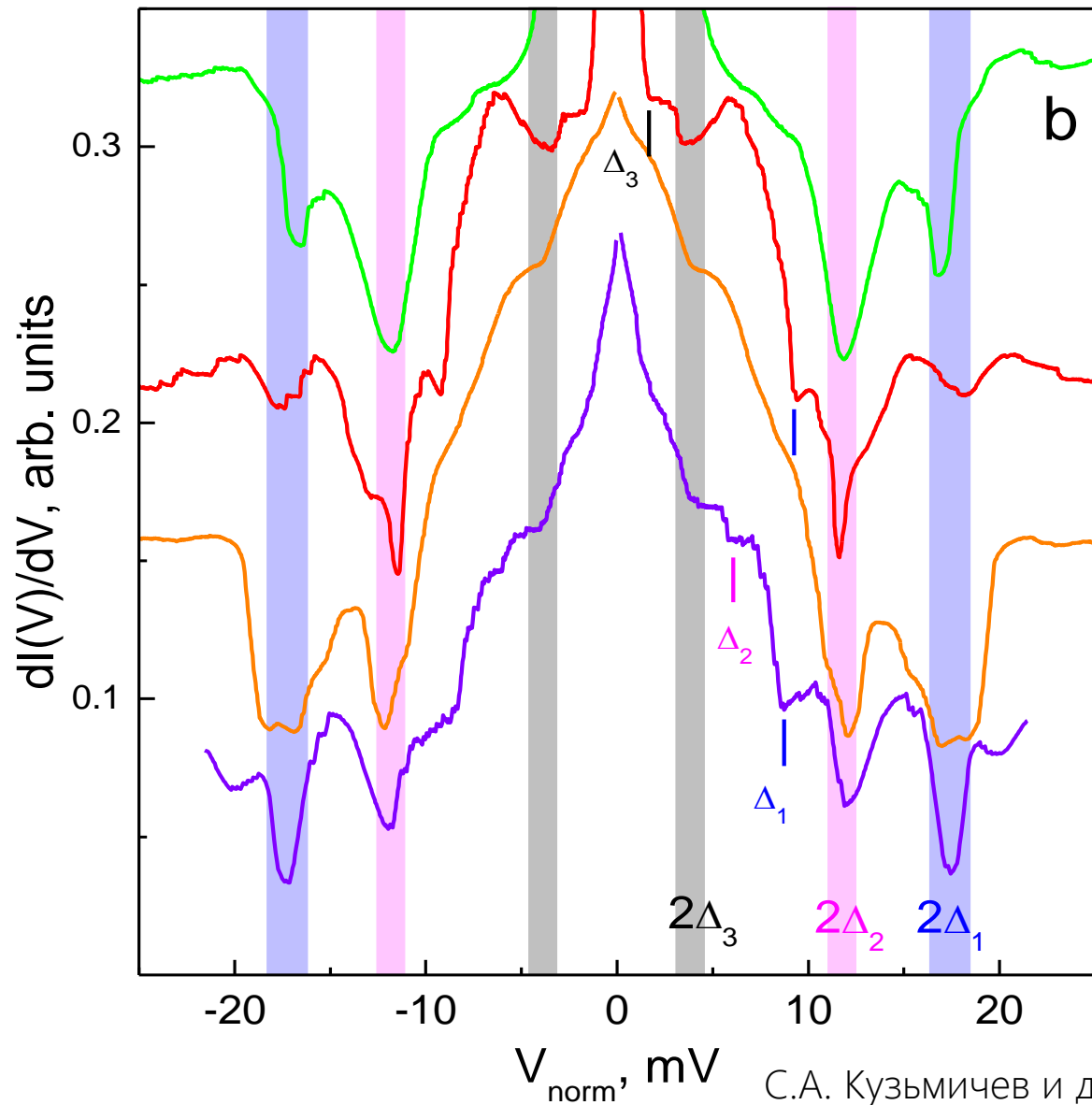
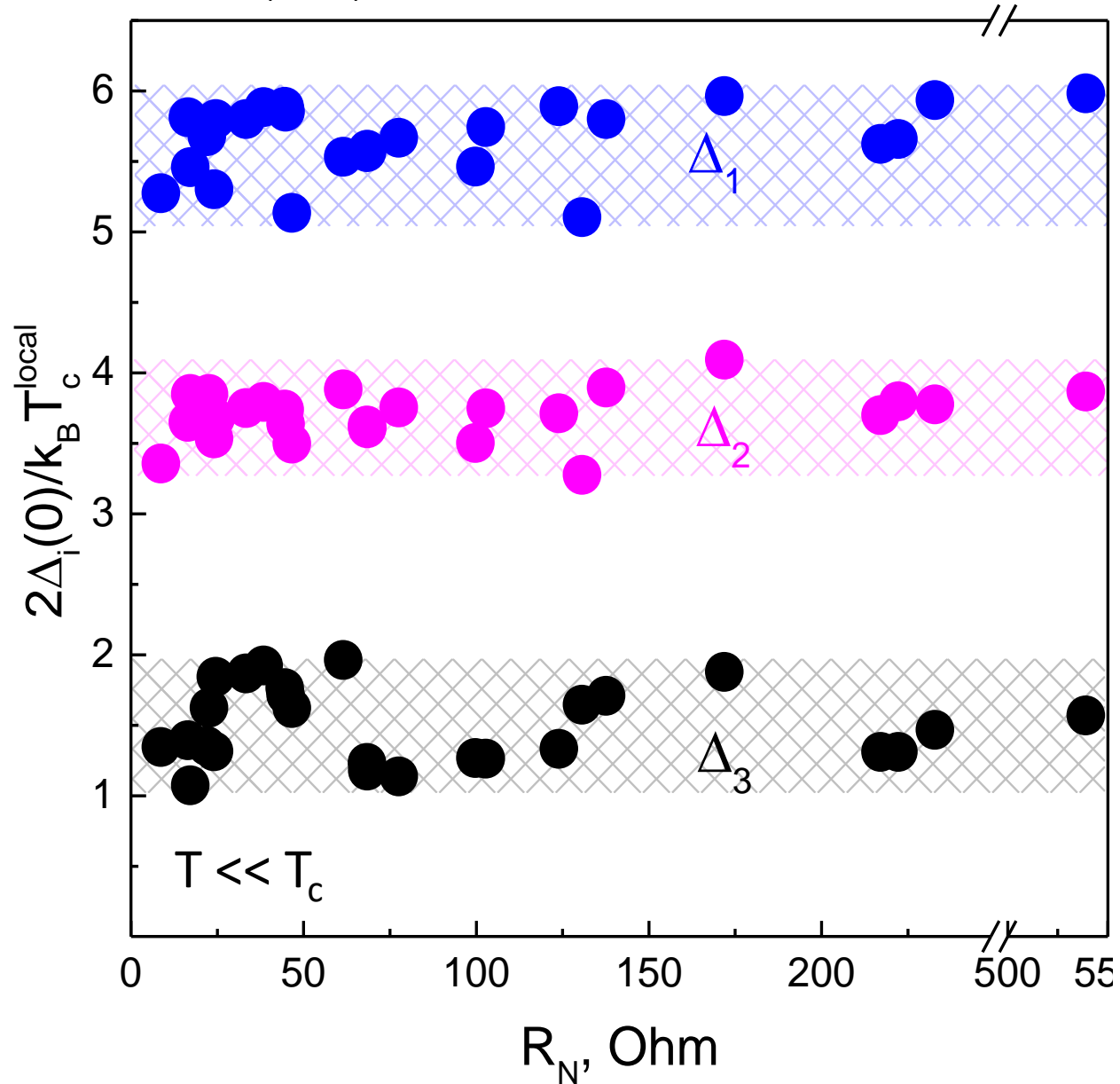
Многощелевая сверхпроводимость $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



С.А. Кузьмичев и др.,
Письма в ЖЭТФ
119, 757 (2024)

Воспроизводимость! Энергетические параметры практически не зависят от R_N .

CaKFe₄As₄: статистика данных ЭНМО-спектроскопии

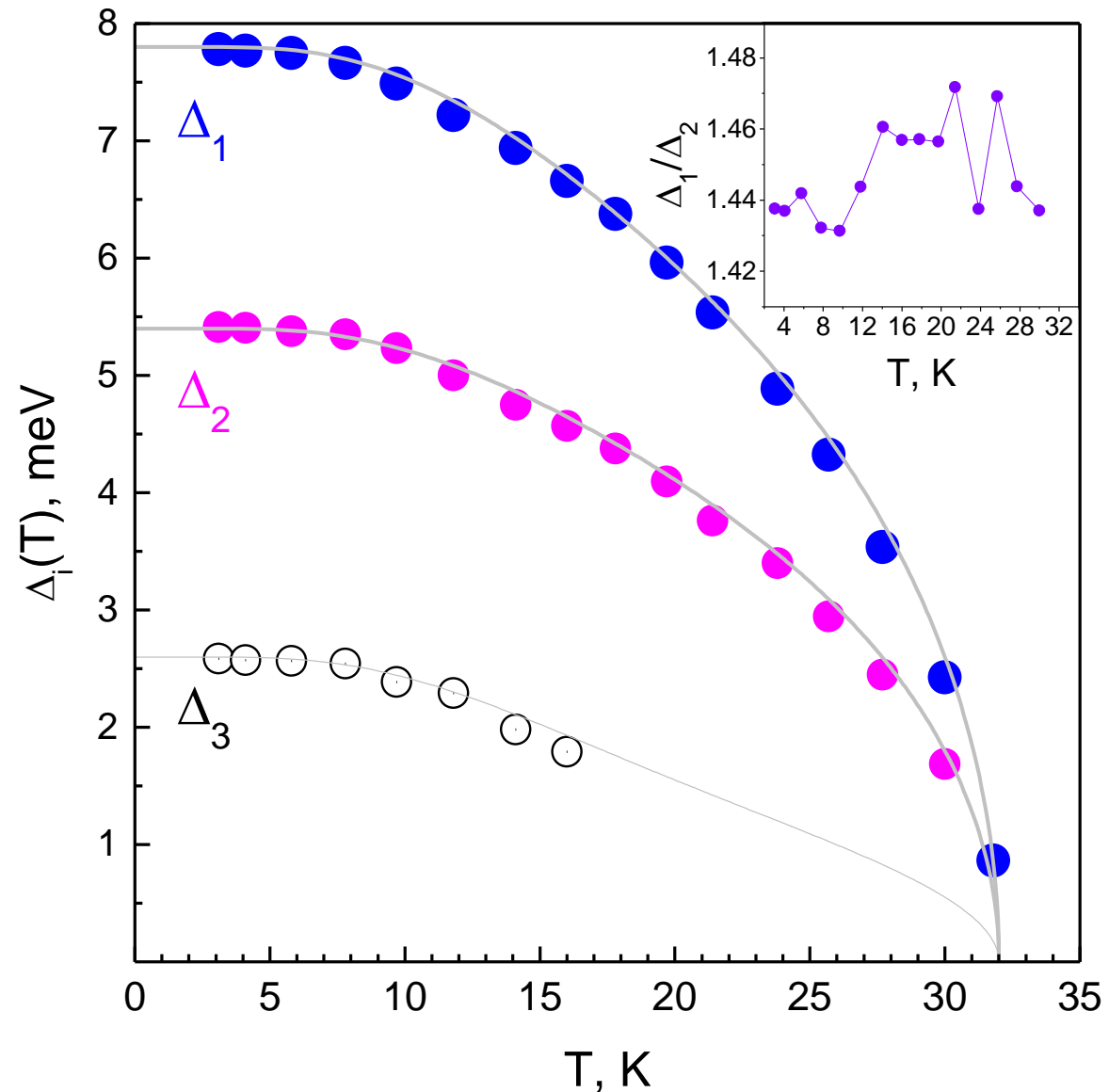
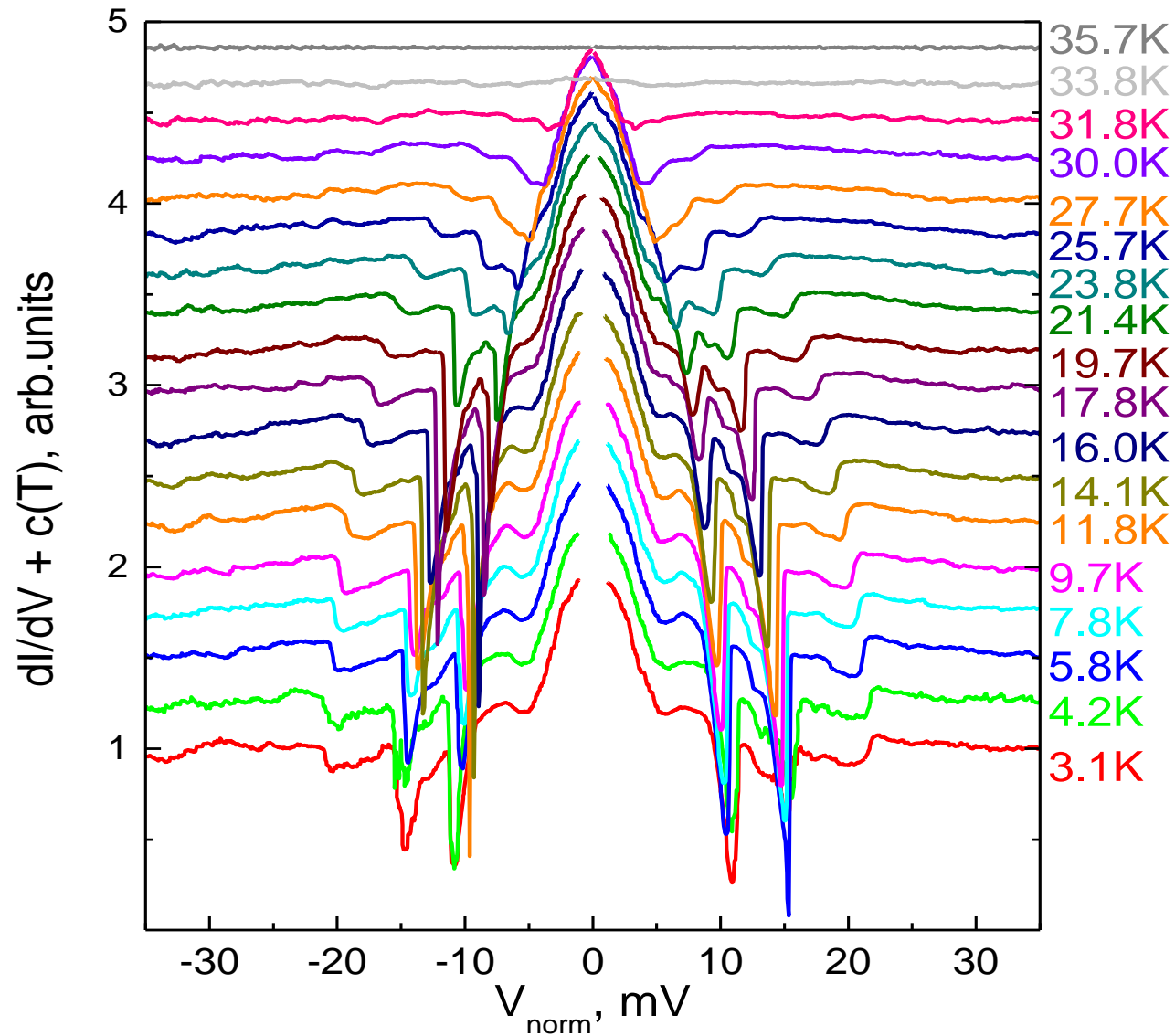


Воспроизводимость!

Характеристические отношения $\approx 5.5, 3.7$ и 1.5 .

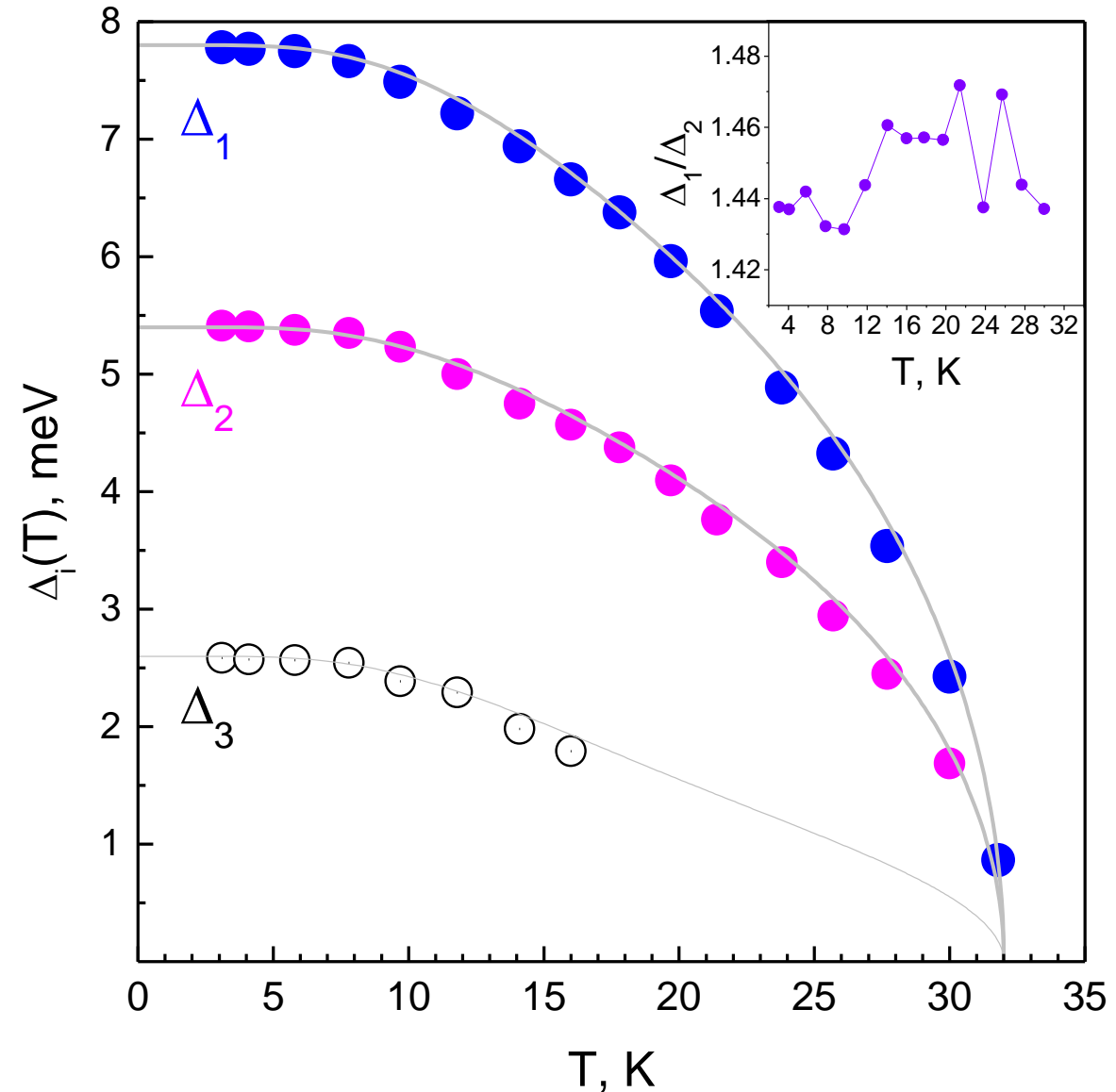
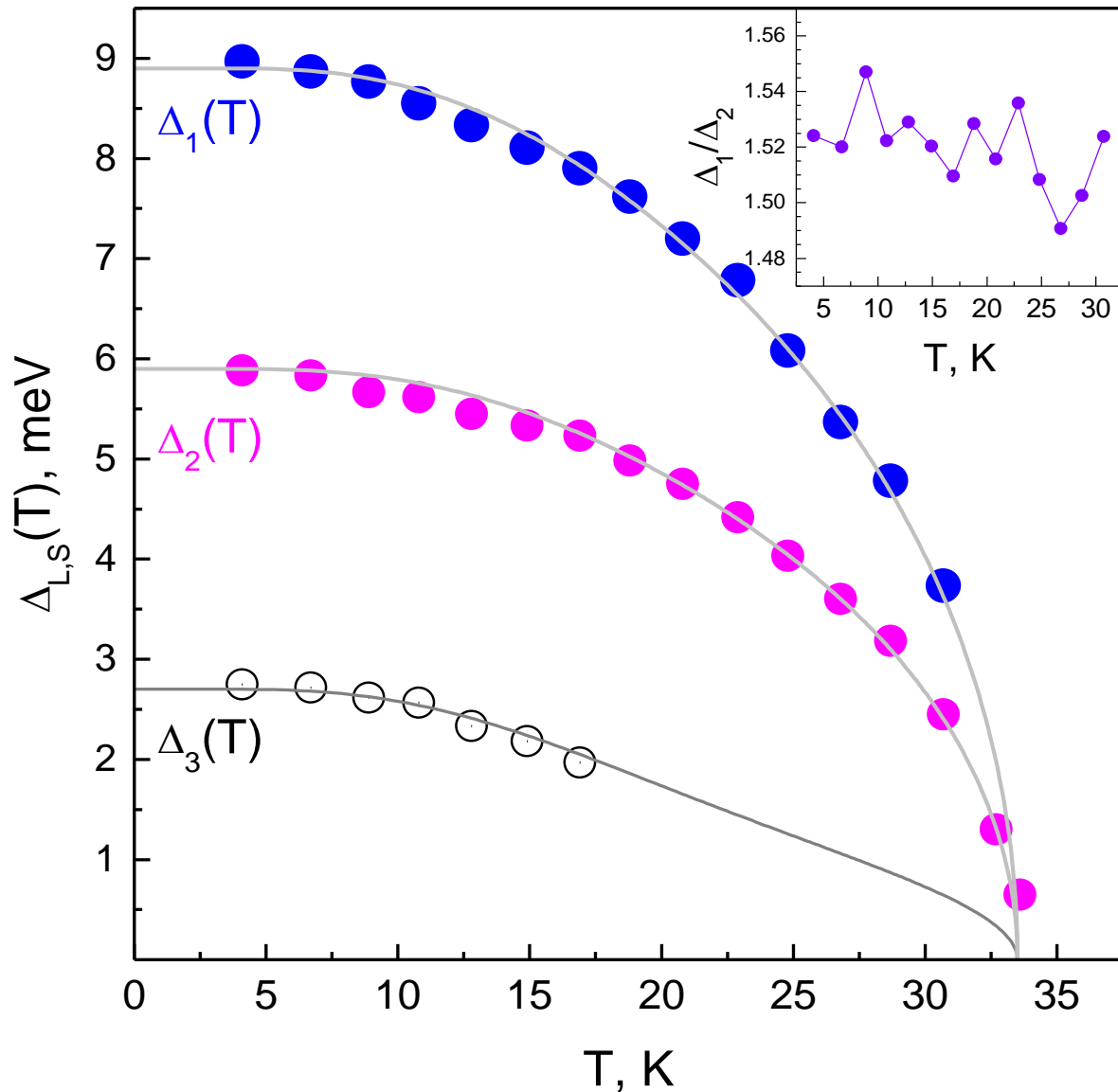
С.А. Кузьмичев и др.,
 Письма в ЖЭТФ
 119, 757 (2024)

Температурные зависимости СП щелей в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



Спектры вручную сдвинуты по вертикали для удобства, $R_N(T) \approx const$. Отношение $\Delta_1(T)/\Delta_2(T) \approx const$. $\Delta_i(T)$ типичны для случая умеренного межзонного взаимодействия.

Температурные зависимости СП щелей в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



Спектры вручную сдвинуты по вертикали для удобства, $R_N(T) \approx const$. Отношение $\Delta_1(T)/\Delta_2(T) \approx const$. $\Delta_i(T)$ типичны для случая умеренного межзонного взаимодействия.

План доклада

1. Чем интересен $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Введение

2. Как напрямую и локально измерить энергетические параметры сверхпроводящих (СП) конденсатов?

Детали эксперимента

- спектроскопия эффекта некогерентных многократных андреевских отражений (ЭНМАО)
- создание планарных механически регулируемых контактов на микротрещине
- применимость к поликристаллам слоистых соединений

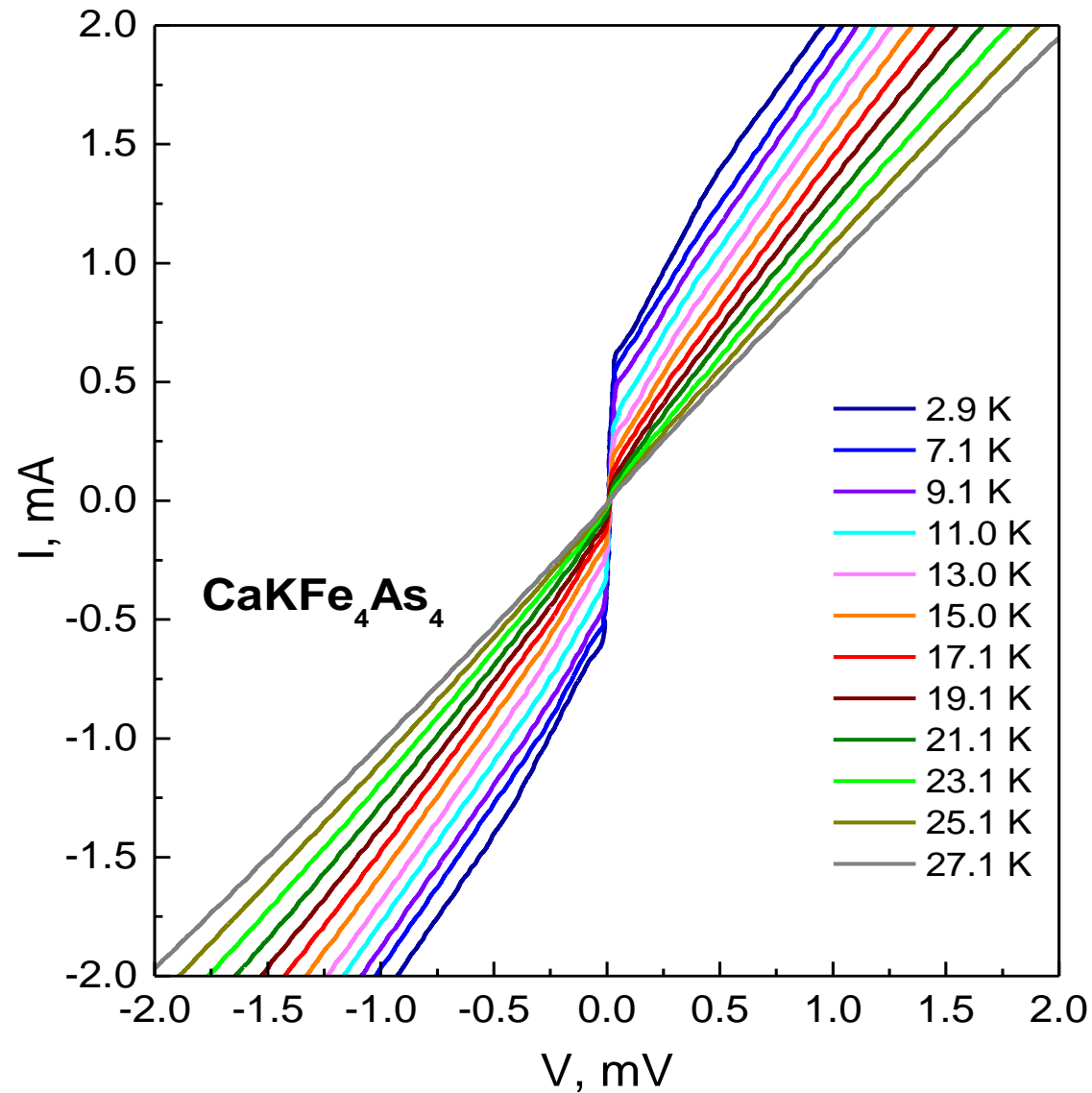
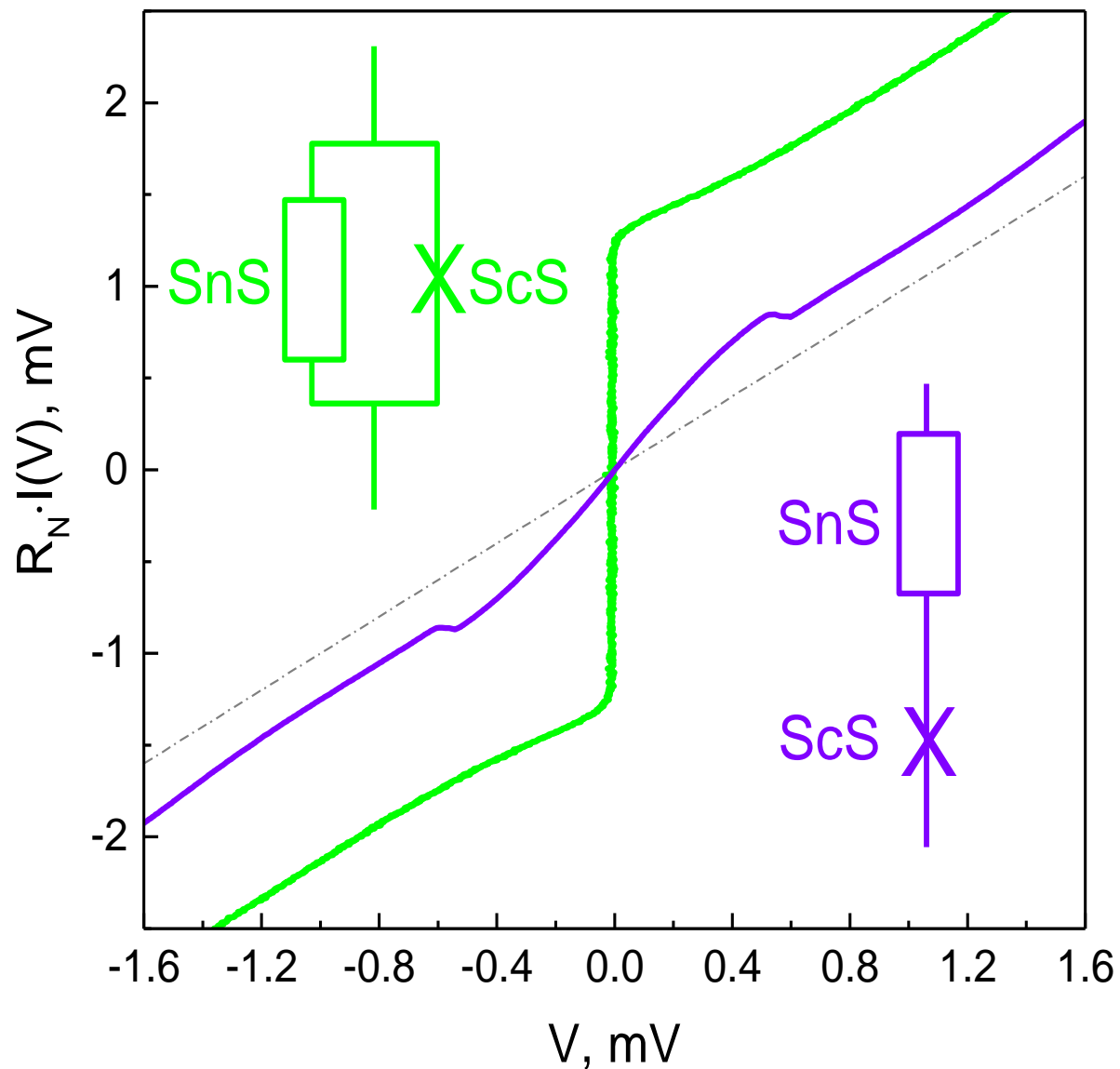
3. Какова СП щелевая структура и $I_c(T)$ для $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$?

Экспериментальные данные

- многощелевая сверхпроводимость и температурные зависимости СП щелей
- температурные зависимости объёмного и межзёренного критического сверхтока

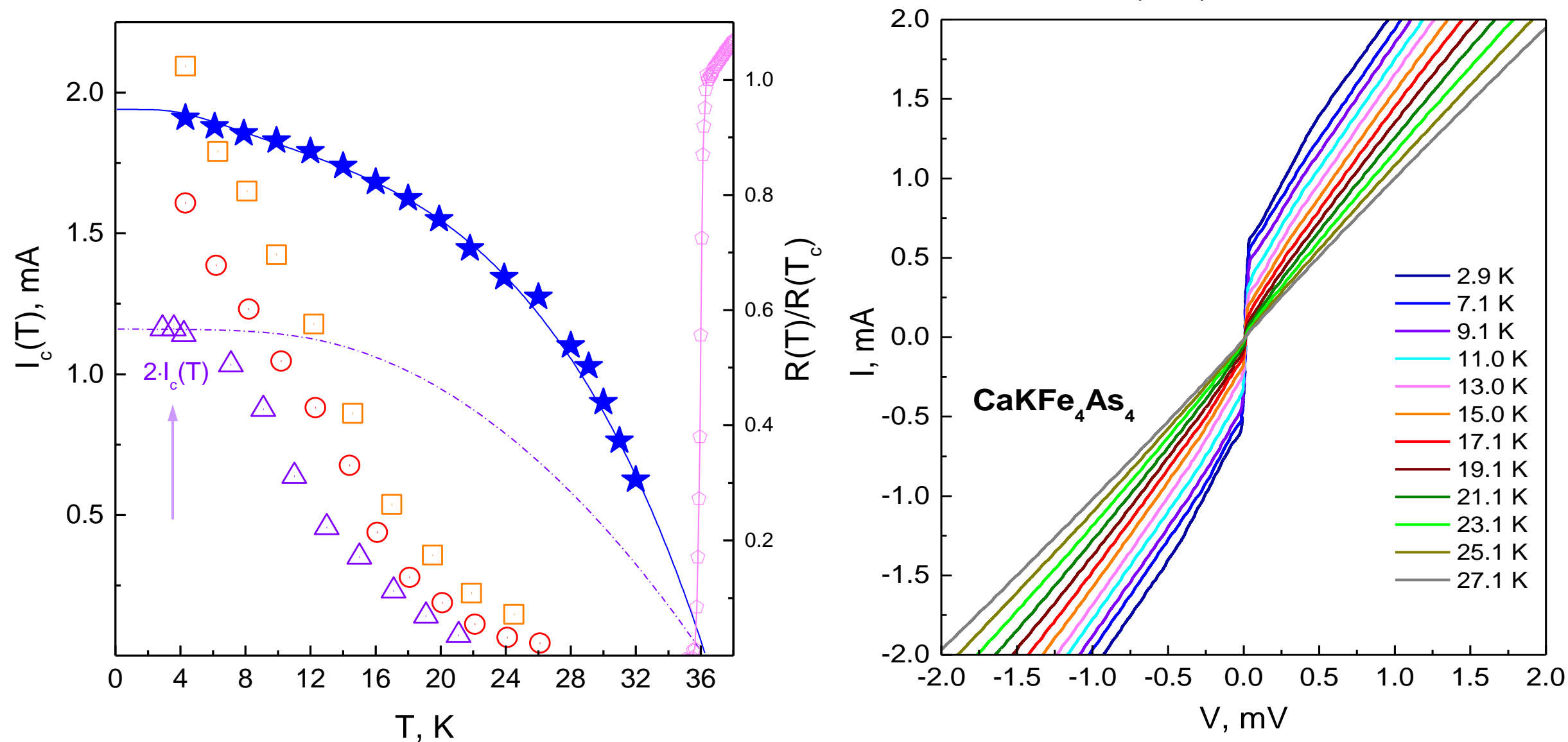
Результаты и выводы

Туннельная спектроскопия структур SnS-ScS в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



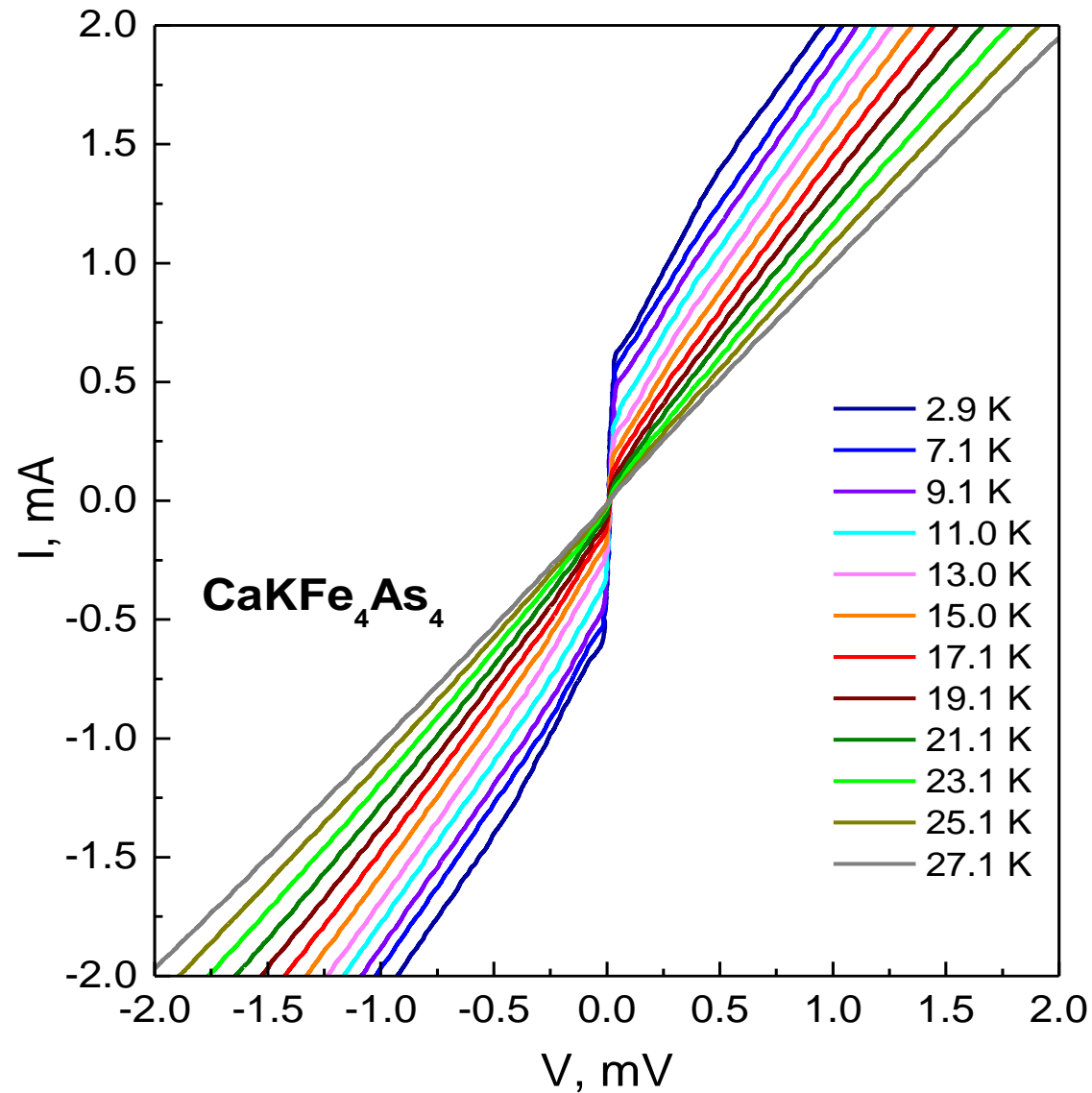
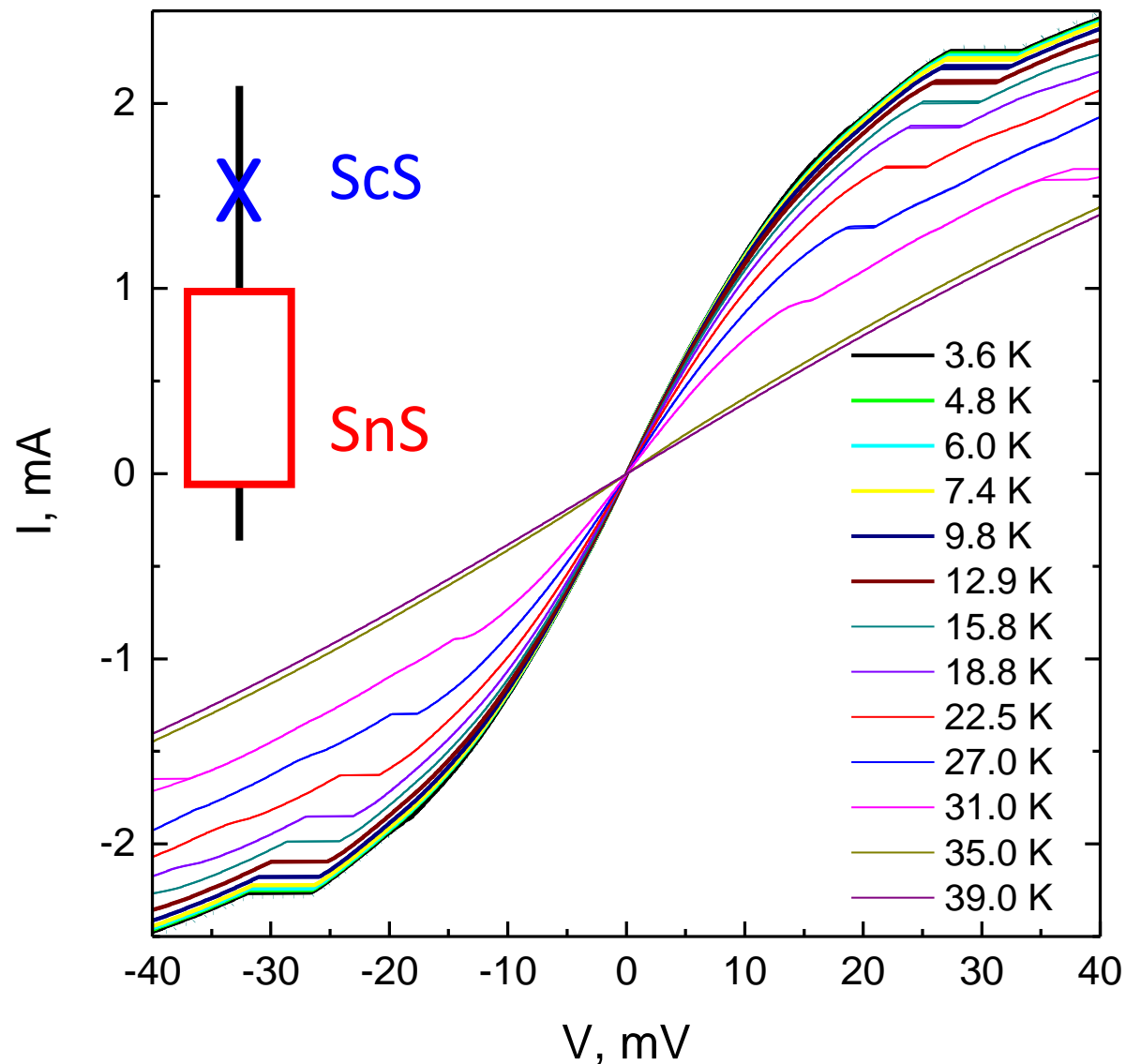
Температурная зависимость критических значений сверхтока для туннельного контакта с областью слабой связи может быть получена при малых значениях постоянного тока (< 10 mA).

Туннельная спектроскопия структур SnS-ScS в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



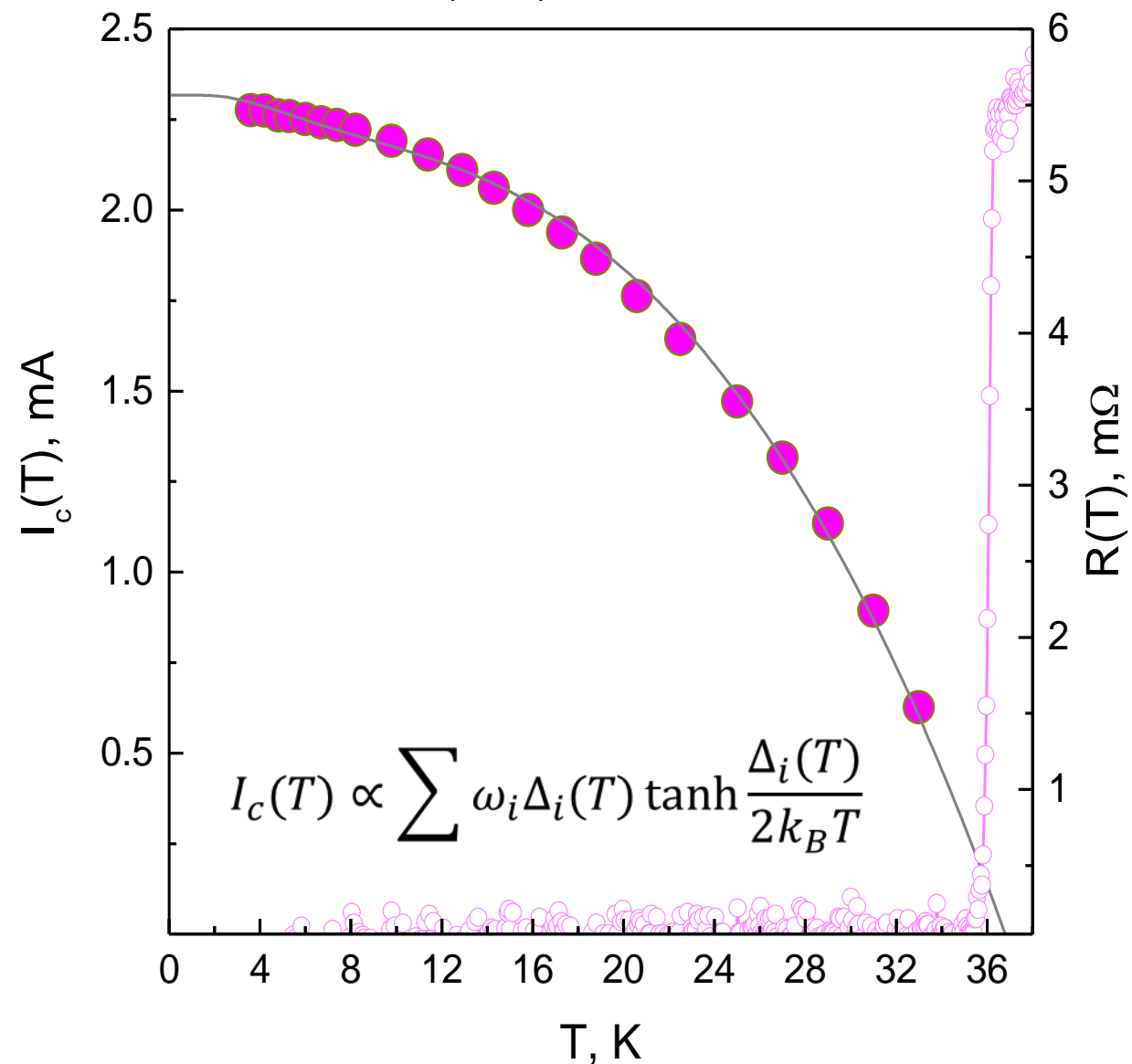
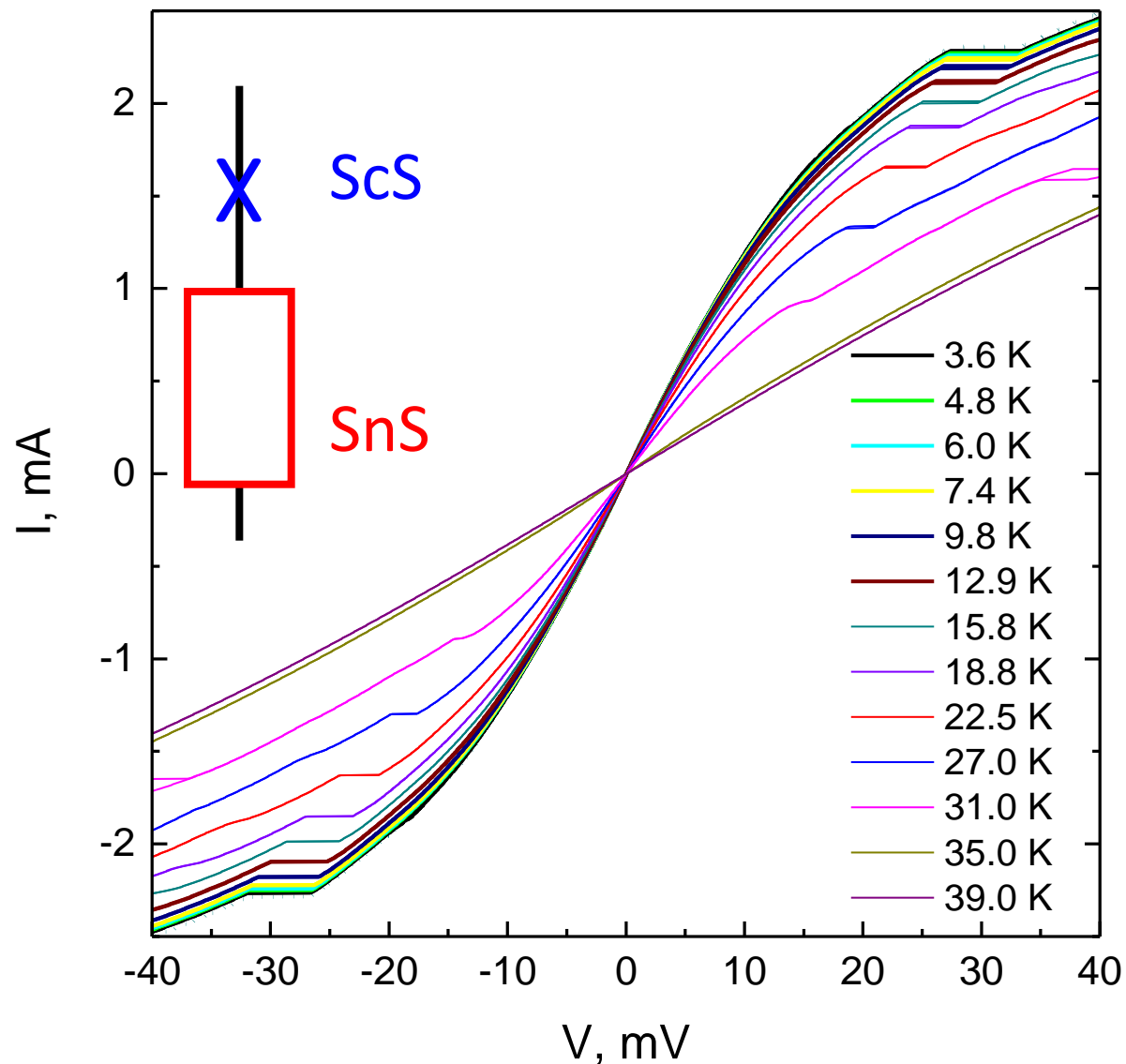
Для температурных зависимостей критического сверхтока наблюдается два вида поведения. Объёмный ток $I_c(T)$ (звёзды) описывается $\Delta_i(T)$ с характерист. отношениями $2\Delta_i(0)/k_B T_c \approx 5.1$ и 0.9 .

Туннельная спектроскопия структур SnS-ScS в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



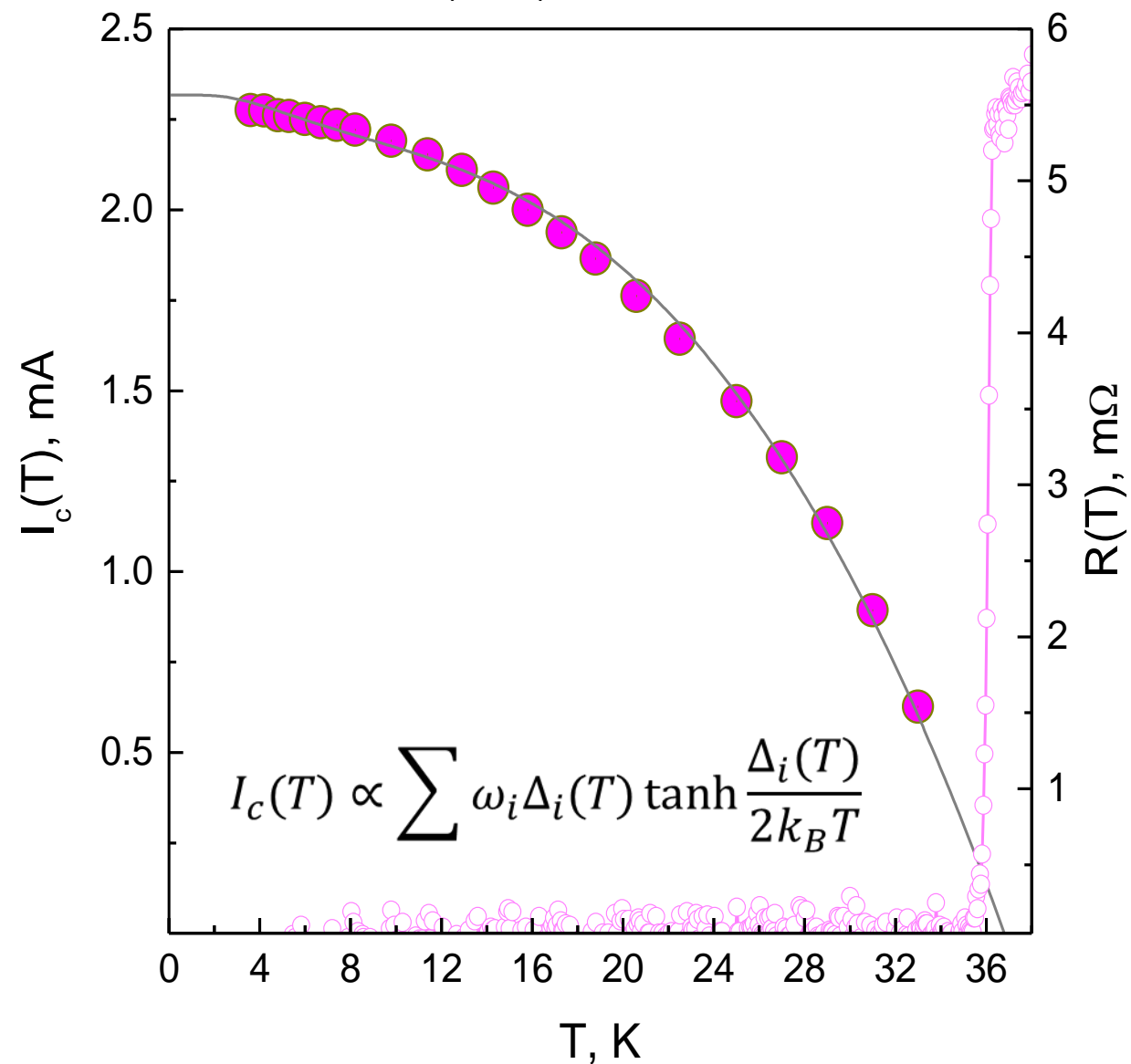
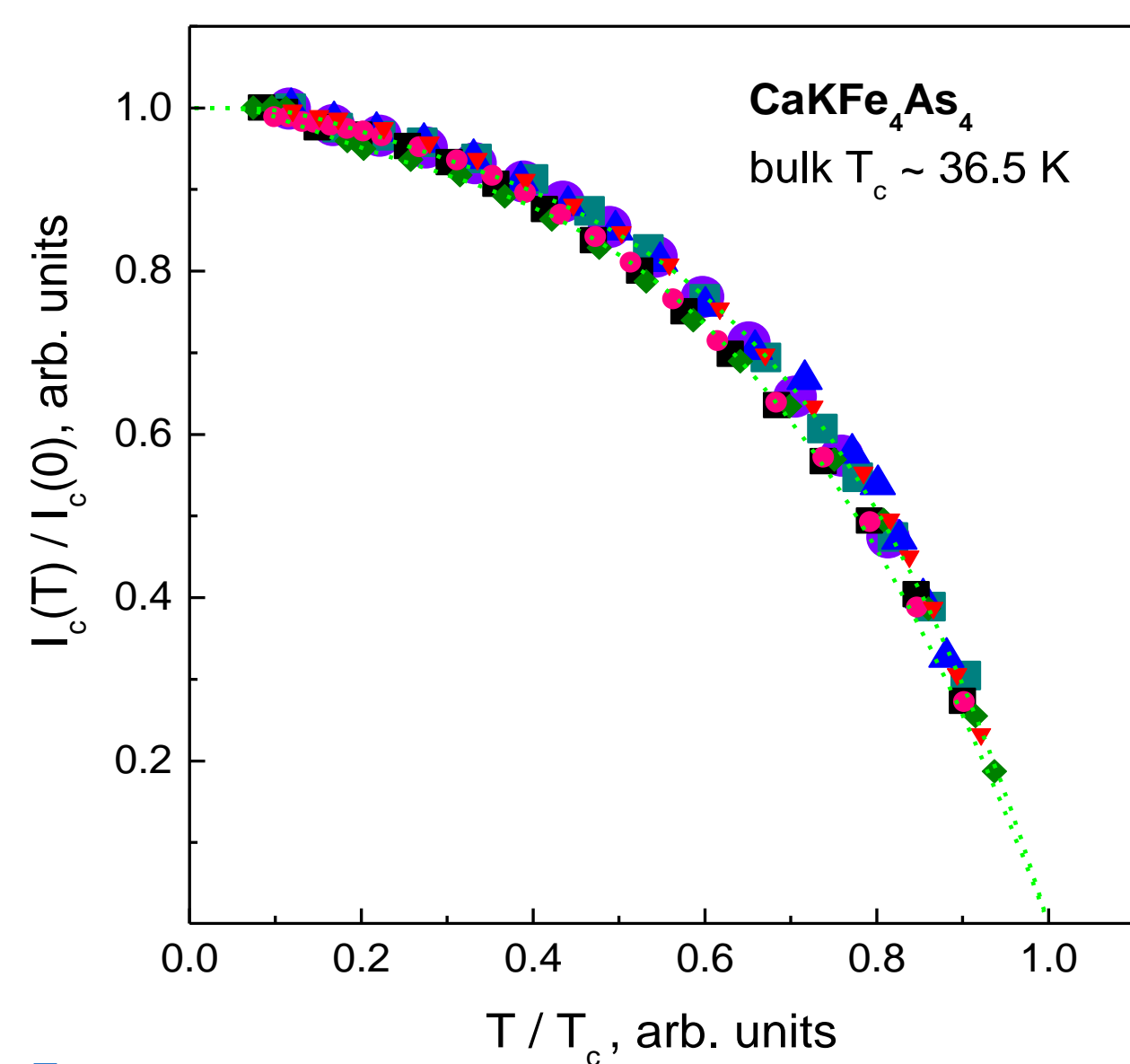
Для температурных зависимостей критического сверхтока наблюдается два вида поведения. Объёмный сверхток $I_c(T)$ (левая панель), критический сверхток зерно-зерно (правая панель).

Туннельная спектроскопия структур SnS-ScS в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$



Температурная зависимость сверхтока описывается концентрацией куперовских пар в БКШ-приближении для многозонного сверхпроводника на основе экспериментальных $\Delta_i(T)$.

Туннельная спектроскопия структур SnS-ScS в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$

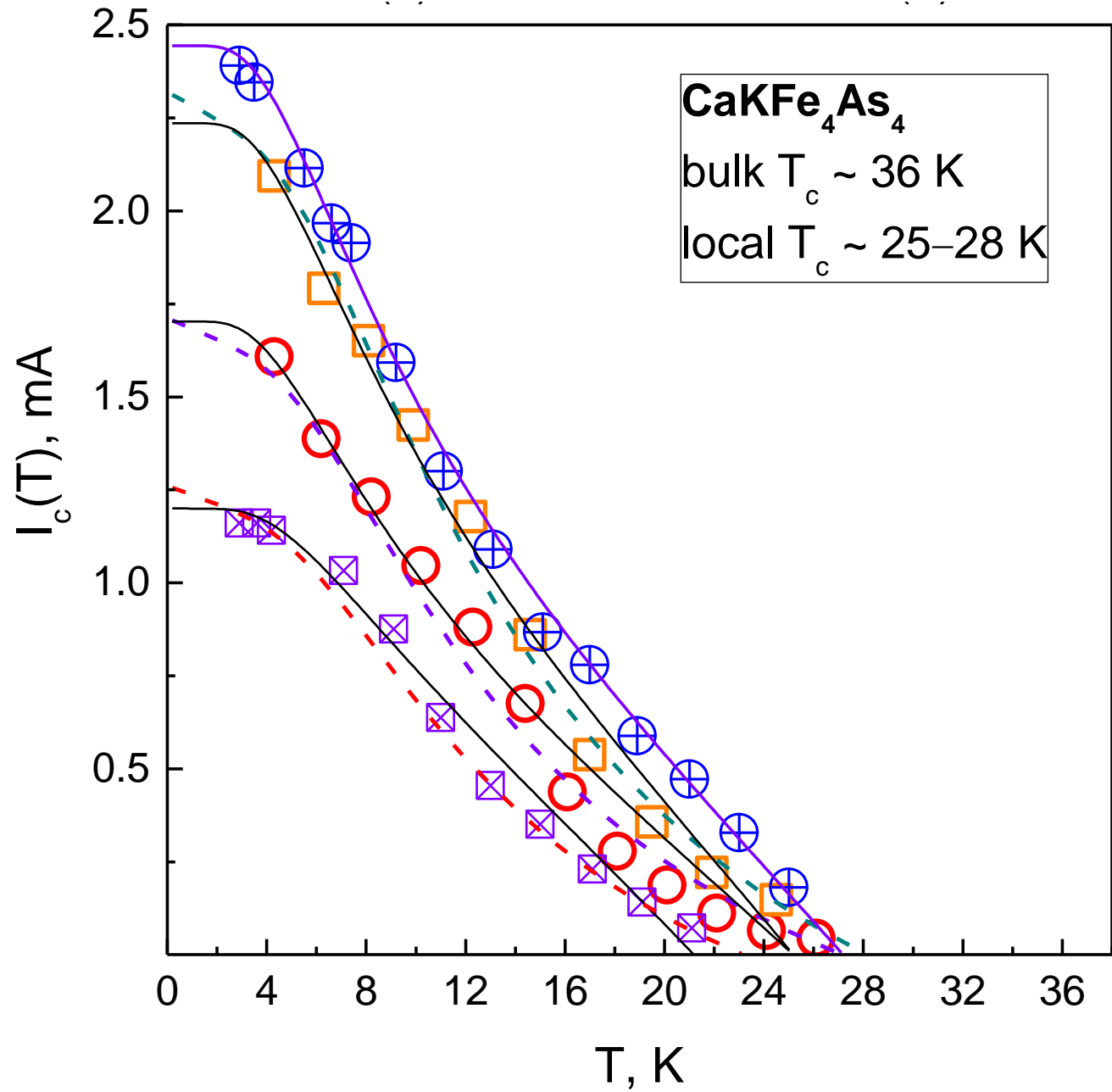


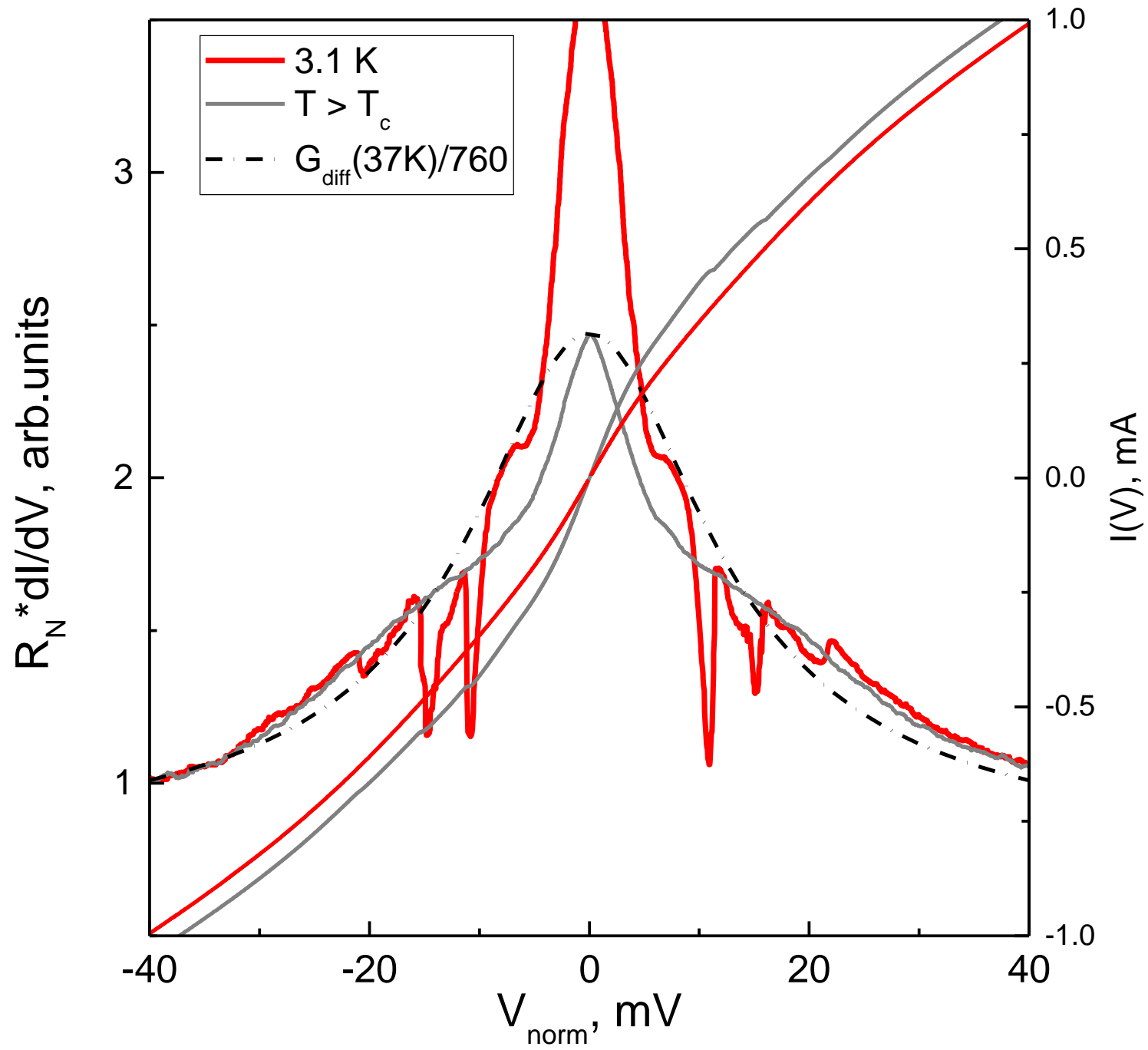
Температурная зависимость сверхтока описывается концентрацией куперовских пар в БКШ-приближении для многозонного сверхпроводника на основе экспериментальных $\Delta_i(T)$.

Результаты и выводы

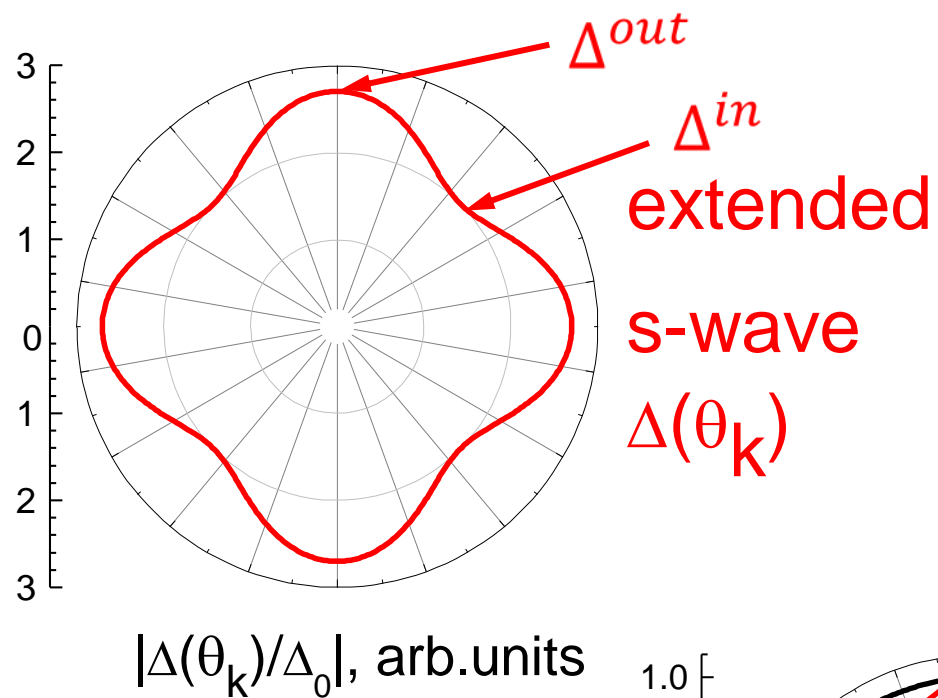
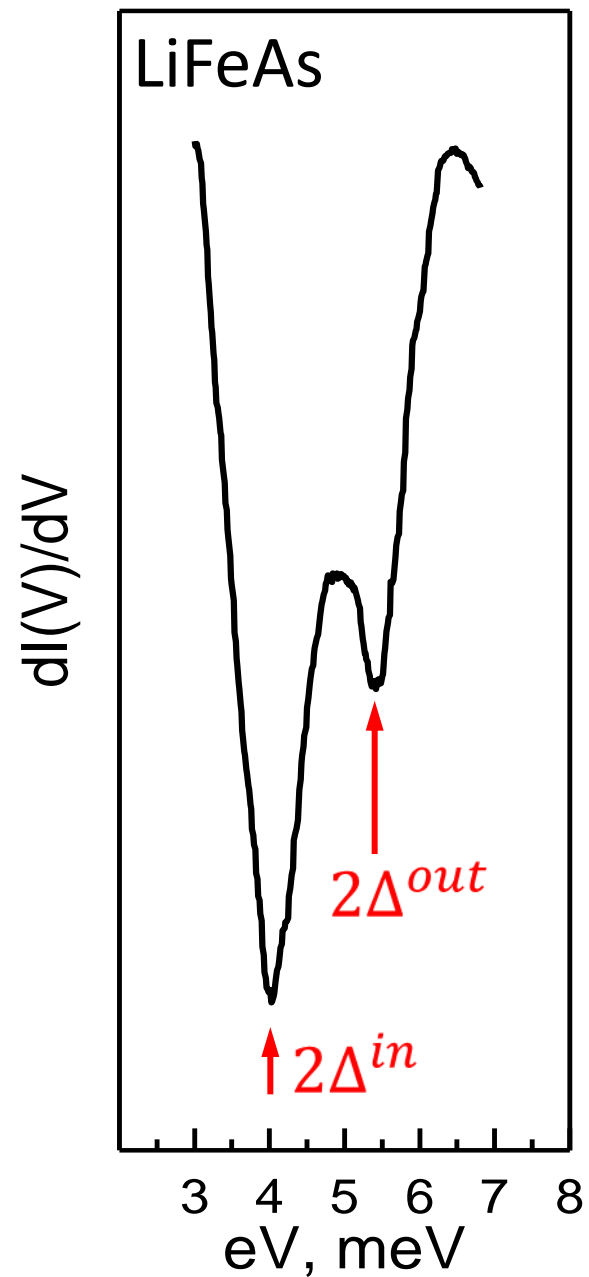
1. В поликристаллах $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ ниже T_c обнаружена многощелевая сверхпроводимость. С помощью ЭНМО-спектроскопии SnS-контактов напрямую определены амплитуды трех СП щелей $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ и их характеристические отношения $2\Delta_i(0)/k_B T_c \approx 5.5, 3.7$ и 1.5 при $T \ll T_c$. При этом $\Delta_1(T) / \Delta_2(T) \approx \text{const}$.
2. Возможно получение двух типов зависимостей $I_c(T)$: «объемных», определяемых объемными макроскопическими СП параметрами порядка $\Delta_i(T)$, и «поверхностных», определяемых СП щелью, наведенной благодаря эффекту близости.
3. Температурная зависимость объёмного сверхтока $I_c(T)$ может быть описана в рамках многозонной модели с использованием экспериментальных $\Delta_{1,2,3}(T)$.
4. Разориентация зерен в $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ может служить дополнительным фактором более резкого уменьшения поверхностных криттоков I_c с температурой.

Спасибо за внимание!





Multiple Andreev Reflection Effect (MARE): in-plane gap anisotropy



Anisotropy degree

$$A \equiv 100\% \cdot \left[1 - \frac{\Delta^{in}}{\Delta^{out}} \right]$$

