

# Киральные сверхпроводящие состояния

Вадимов Василий

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

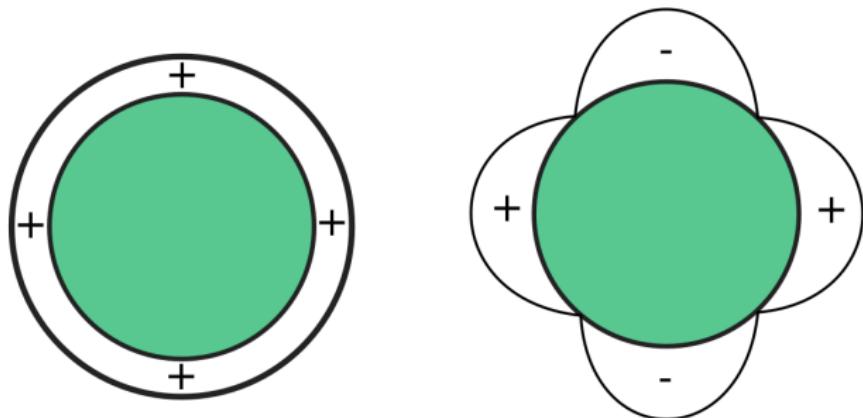
22 октября 2015 г.

# План доклада

- ▶ Типы сверхпроводящего состояния
- ▶ Общие свойства  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$
- ▶ Свидетельства в пользу киральной сверхпроводимости *p*-типа в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ 
  - ▶ Зависимость  $T_c$  от концентрации примесей
  - ▶ Спиновая восприимчивость
  - ▶ Спонтанные магнитные поля
  - ▶ Эффект Керра
- ▶ Сверхпроводящее состояние в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$
- ▶ Неразрешенные проблемы
  - ▶ Количественное описание эффекта Керра
  - ▶ Краевые токи
  - ▶ Доменные стенки
- ▶ Выводы

# Типы сверхпроводящего состояния

Распределение щели на поверхности Ферми. Спин-синглет

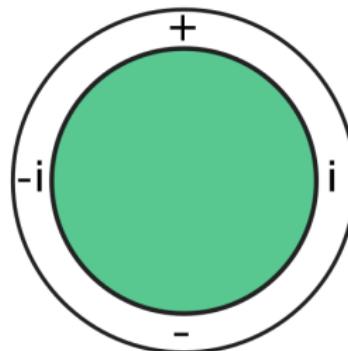
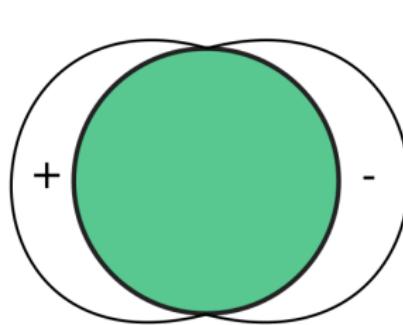


**Слева:** сверхпроводящее состояние *s*-типа (обычная сверхпроводимость, орбитальный момент пары 0). Реализуется в простых металлах.

**Справа:** сверхпроводящее состояние *d*-типа (орбитальный момент пары 2), реализуется в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП).

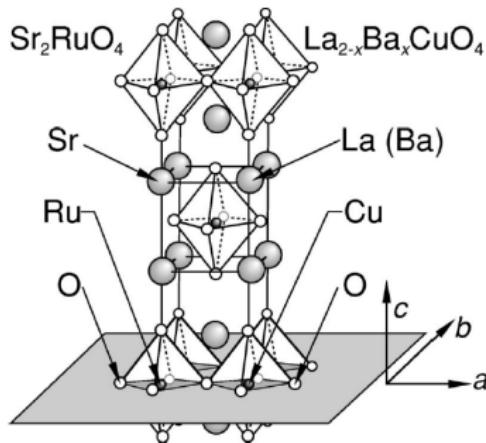
# Типы сверхпроводящего состояния

Распределение щели на поверхности Ферми. Спин-триплет

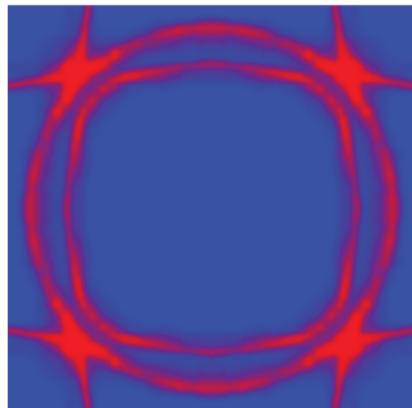


**Слева:** сверхпроводящее состояние  $p$ -типа (орбитальный момент 1), одна из фаз в  ${}^3\text{He}$ . **Справа:** киральное сверхпроводящее состояние  $p$ -типа, реализуется в  ${}^3\text{He}$  и, предположительно, в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ .

# Общие свойства $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$



Кристаллическая решетка  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  аналогична решетке  $\text{La}_{(2-x)}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ , однако, в отличие от последнего,  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  не является ВТСП.



Поверхность Ферми в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . В направлении, перпендикулярном плоскости картинки, дисперсия практически отсутствует.

# Зависимость $T_c$ от немагнитных примесей

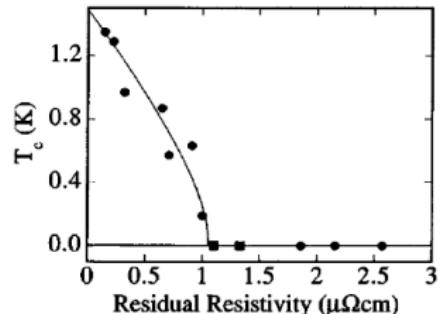
## Обычные сверхпроводники

**Теорема Андерсона:** критическая температура не зависит от концентрации немагнитных примесей.

## $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$

Сильная зависимость от концентрации примесей. Сверхпроводимость полностью подавлена, когда длина свободного пробега  $\ell$  сравнима с длиной когерентности  $\xi$ .

Чувствительность к немагнитным примесям — свидетельство **необычности** сверхпроводящего состояния.



Критическая температура, в зависимости от остаточного сопротивления<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>A. P. Mackenzie, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80** 3890 (1998)

# Спиновая восприимчивость

## Ядерный магнитный резонанс. Сдвиг Найта

Из-за взаимодействия с электронами проводимости частота ЯМР изменяется на сдвиг Найта:

$$\omega = \gamma B_i (1 + K_o + K_s) ,$$

где  $\gamma$  — гиromагнитное соотношение,  $B_i$  — среднее по образцу магнитное поле,  $K_o$  — вклад от  $s$  электронов,  $K_s$  — вклад, связанный со спиновой восприимчивостью.

# Спиновая восприимчивость

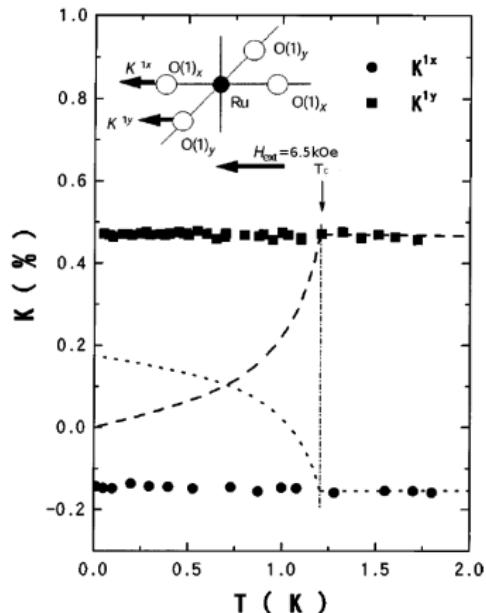
## Спин-синглет

Спиновая восприимчивость  $\chi_s \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow 0$ , в силу отсутствия спина у куперовской пары. По той же причине зануляется спиновый сдвиг Найта  $K_s$ .

## $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$

На рисунке изображен сдвиг Найта для атомов кислорода, в зависимости от  $T$ . Пунктирные линии — вычисления сдвига Найта для атомов кислорода в ВТСП купратах<sup>2</sup>.

Сверхпроводящее состояние в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  является **триплетным**.



<sup>2</sup>K. Ishida, et al., Nature 396, 658 (1998)

# Спонтанные магнитные поля

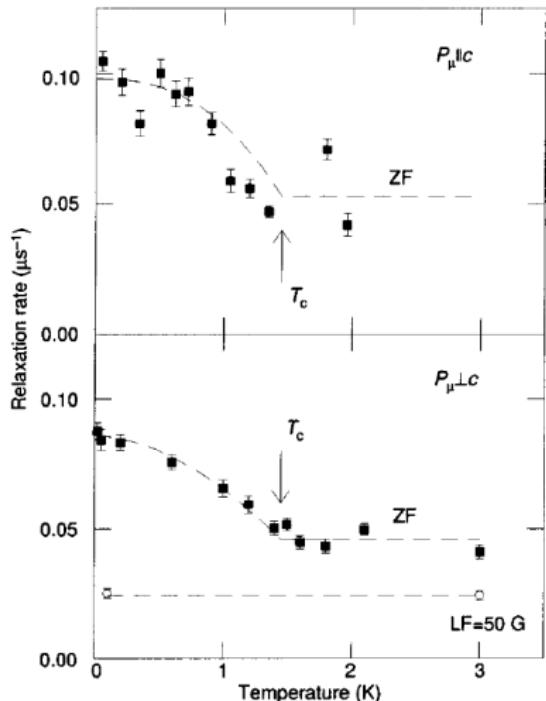
На рисунке приведена зависимость скорости релаксации спиновой поляризации от температуры.

**Верх:** поляризация вдоль оси *c*.

**Низ:** поляризация в плоскости *ab*.

Изменение скорости релаксации объясняется спонтанным появлением магнитных полей в сверхпроводнике<sup>3</sup>.

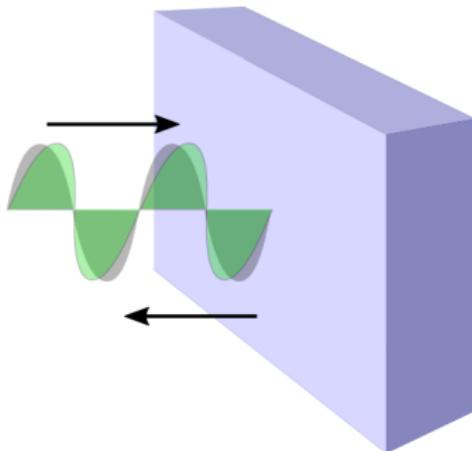
Свидетельствует о **спонтанном нарушении симметрии обращения времени**.



<sup>3</sup>G. M. Luke, et al., Nature 394, 558 (1998)

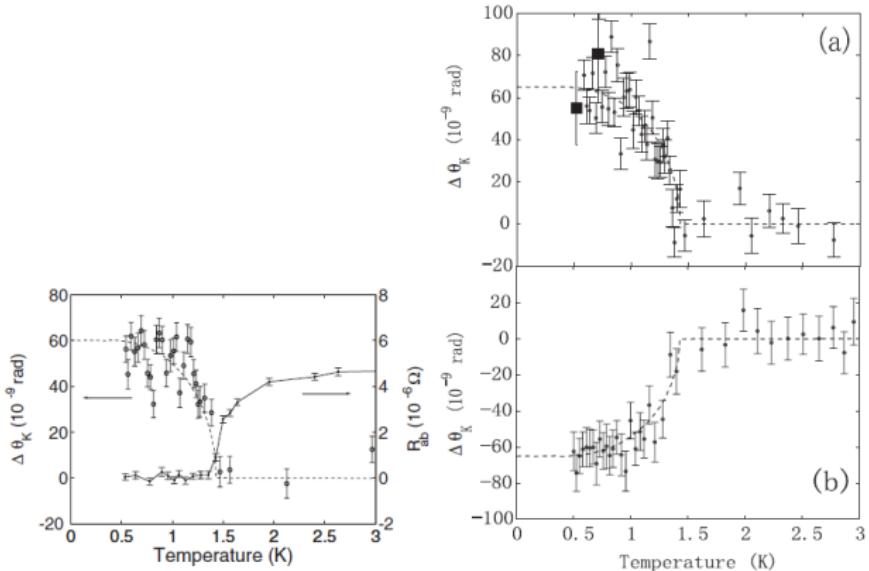
# Полярный эффект Керра

Поворот и появление эллиптичности поляризации при отражении линейно поляризованной волны, падающей на гиротропную среду.



В металлах эффект Керра связан с эффектом Холла — наличием холловской проводимости обеспечивается изменение поляризации.

# Полярный эффект Керра



**Слева:** зависимость угла Керра и сопротивления от температуры в нулевом магнитном поле. **Справа:** зависимость угла Керра от температуры в магнитном поле, (a)  $H = +93 Oe$ , (b)  $H = -47 Oe$ .<sup>4</sup>

<sup>4</sup>J. Xia, et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 167002 (2006)

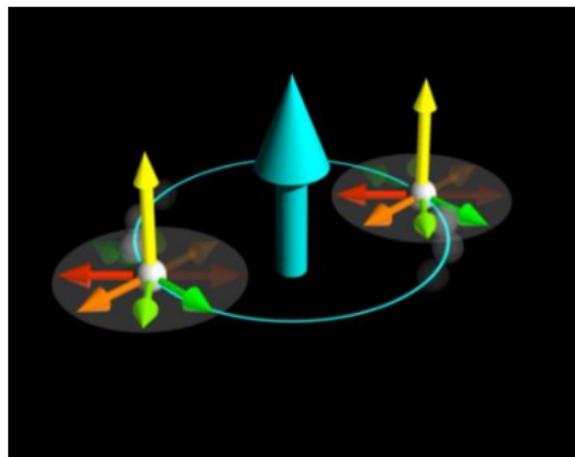
# Сверхпроводящее состояние в $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$

Экспериментально обнаруженные свойства:

- ▶ Спин-триплетное спаривание
- ▶ Спонтанное нарушение симметрии обращения времени

Щель  $\Delta$  должна принадлежать одному из неприводимых представлений группы симметрии кристалла — группы  $D_{4h}$ .

Сверхпроводящее состояние с наименьшим орбитальным моментом, удовлетворяющее всем требованиям, — киральное состояние  $p$ -типа  $\Delta \propto \hat{k}_x \pm i\hat{k}_y$ .



Схематичное изображение куперовской пары в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ .

# Количественное описание эффекта Керра

Возможные причины появления недиагональной компоненты проводимости :

- ▶ Рассеяние на примесях<sup>5</sup>
- ▶ Учет сверхпроводимости на нескольких зонах<sup>6</sup>

Нет количественного соответствия с экспериментом. Угол Керра чувствителен к некоторым неизвестным параметрам образца<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> J. Goryo, Phys. Rev. B **78** 060501 (2008)

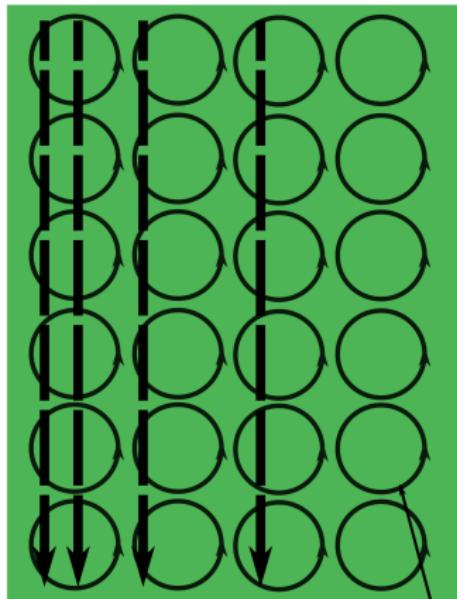
<sup>6</sup> E. Taylor, C. Kallin, Journal of Physics: Conference Series **449** 012036 (2013)

<sup>7</sup> C. Kallin, Rev. Prog. Phys. **75** 042501 (2012)

# Поверхностные токи

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$

поверхностный ток

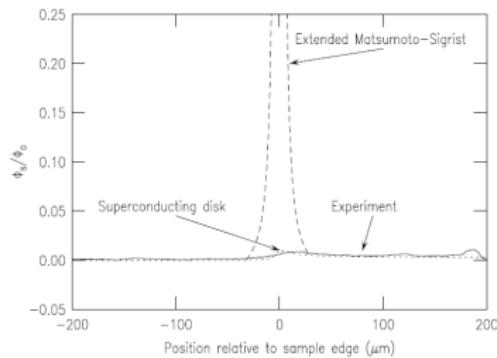


куперовские пары

# Поверхностные токи

- ▶ СКВИД-измерения<sup>8</sup>
- ▶ Измерения Холловскими датчиками<sup>9</sup>

Найденные токи на три порядка меньше, чем предсказанные теоретически.



Результаты СКВИД измерений границы  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . Сплошная линия — экспериментальный результат, длинный пунктир — теоретические предсказания<sup>10</sup>.

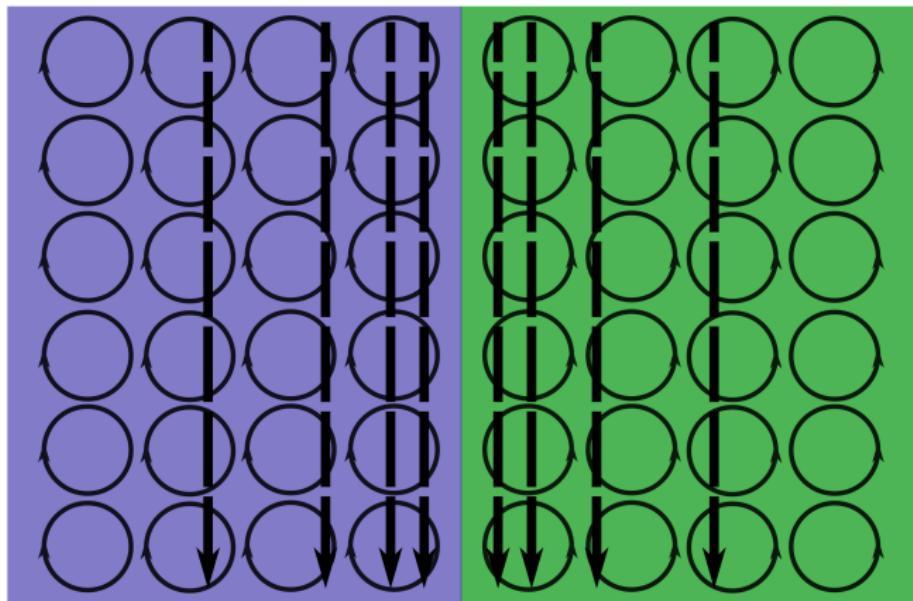
<sup>8</sup>J. R. Kirtley, *et al.*, Phys. Rev. B **76** 014526 (2007)

<sup>9</sup>P. G. Bjornsson, *et al.*, Phys. Rev. B. **72** 012504 (2005)

<sup>10</sup>M. Sigrist and M. Matsumoto, J. Phys. Soc. Japan **68** 994 (1999)

# Доменные стенки

$\text{Sr}_2\text{RuO}_4$



киральные домены

## Доменные стенки

Экспериментальные данные по киральным доменам:

- ▶ K. D. Nelson, *et al.*, *Science* **306** 1151 (2004): один или несколько крупных доменов
- ▶ C. W. Hicks, *et al.*, *Phys. Rev. B* **81** 214501 (2010): мелкие домены порядка 30 нм
- ▶ J. Xia, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 167002 (2006): домены не меньше 50 мкм.

# Выводы

Текущие результаты:

- ▶ Достаточно весомые косвенные свидетельства в пользу киральной сверхпроводимости *p*-типа в  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$
- ▶ Отсутствие прямых подтверждений (поверхностные токи и доменные стенки)

Направления исследований:

- ▶ Новые тесты на симметрию параметра порядка
- ▶ Попытки учесть влияние других зон на сверхпроводимость

# Спасибо за внимание!

- ▶ C. Kallin, Rep. Prog. Phys. **75** 042501 (2012)
- ▶ A. P. Mackenzie and Y. Maeno, Rev. Mod. Phys. **75** 657 (2003)