

Киральные сверхпроводящие состояния

Вадимов Василий

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

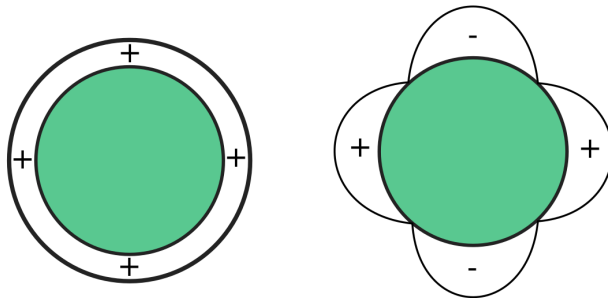
22 октября 2015 г.

План доклада

- ▶ Типы сверхпроводящего состояния
- ▶ Общие свойства Sr_2RuO_4
- ▶ Свидетельства в пользу киральной сверхпроводимости p -типа в Sr_2RuO_4
 - ▶ Зависимость T_c от концентрации примесей
 - ▶ Спиновая восприимчивость
 - ▶ Спонтанные магнитные поля
 - ▶ Эффект Керра
- ▶ Сверхпроводящее состояние в Sr_2RuO_4
- ▶ Неразрешенные проблемы
 - ▶ Количественное описание эффекта Керра
 - ▶ Краевые токи
 - ▶ Доменные стенки
- ▶ Выводы

Типы сверхпроводящего состояния

Распределение щели на поверхности Ферми. Спин-синглет

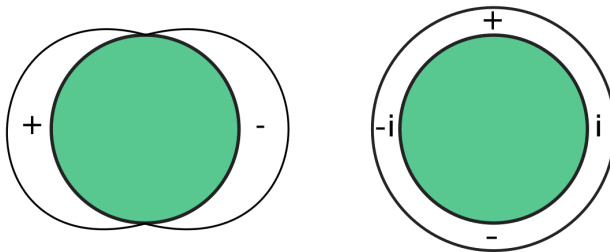


Слева: сверхпроводящее состояния s -типа (обычная сверхпроводимость, орбитальный момент пары 0). Реализуется в простых металлах.

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

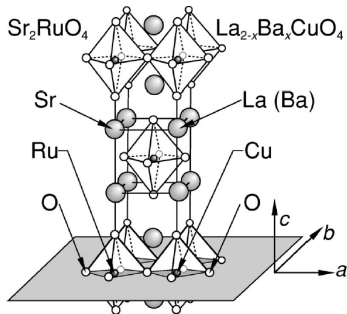
Типы сверхпроводящего состояния

Распределение щели на поверхности Ферми. Спин-триплет

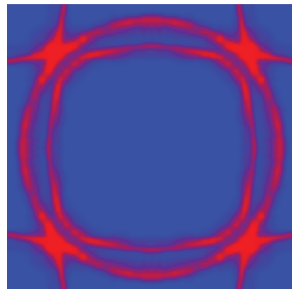


Слева: сверхпроводящее состояние *p*-типа (орбитальный момент 1), одна из фаз в ^3He . **Справа:** киральное сверхпроводящее состояние *p*-типа, реализуется в ^3He и, предположительно, в Sr_2RuO_4 .

Общие свойства Sr_2RuO_4



Кристаллическая решетка Sr_2RuO_4 аналогична решетке $\text{La}_{(2-x)}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, однако, в отличие от последнего, Sr_2RuO_4 не является ВТСП.



Поверхность Ферми в Sr_2RuO_4 . В направлении, перпендикулярном плоскости картинки, дисперсия практически отсутствует.

Зависимость T_c от немагнитных примесей

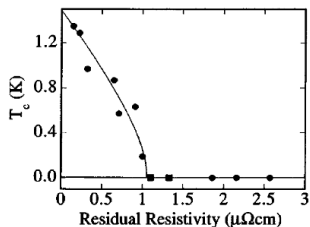
Обычные сверхпроводники

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

Sr_2RuO_4

Сильная зависимость от концентрации примесей. Сверхпроводимость полностью подавлена, когда длина свободного пробега ℓ сравнима с длиной когерентности ξ .

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



Критическая температура, в зависимости от остаточного сопротивления¹.

¹A. 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 γ — гиромагнитное соотношение, B_i — среднее по образцу магнитное поле, K_o — вклад от s электронов, K_s — вклад, связанный со спиновой восприимчивостью.

Спиновая восприимчивость

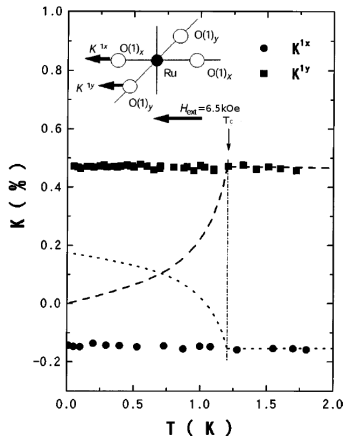
Спин-синглет

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 .

Sr_2RuO_4

На рисунке изображен сдвиг Найта для атомов кислорода, в зависимости от T . Пунктирные линии — вычисления сдвига Найта для атомов кислорода в ВТСП купратах².

Сверхпроводящее состояние в Sr_2RuO_4 является **триплетным**.



²K. Ishida, *et al.*, Nature **396**, 658 (1998)

Спонтанные магнитные поля

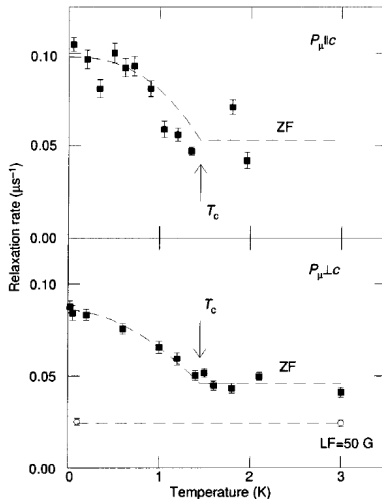
На рисунке приведена зависимость скорости релаксации спиновой поляризации от температуры.

Верх: поляризация вдоль оси c .

Низ: поляризация в плоскости ab .

Изменение скорости релаксации объясняется спонтанным появлением магнитных полей в сверхпроводнике³.

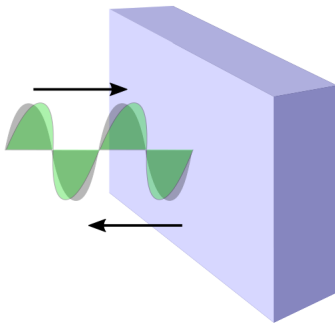
Свидетельствует о **спонтанном нарушении симметрии обращения времени**.



³G. M. Luke, *et al.*, Nature **394**, 558 (1998)

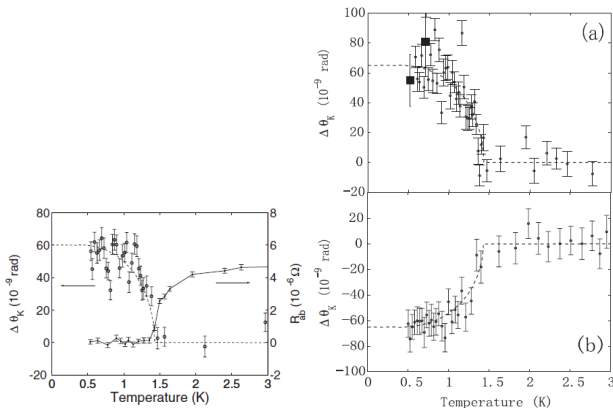
Полярный эффект Керра

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 обеспечивает 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) $H = -47 Oe$.⁴

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

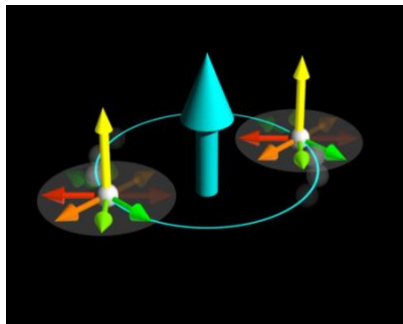
Сверхпроводящее состояние в Sr_2RuO_4

Экспериментально обнаруженные свойства:

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

Щель Δ 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 Sr_2RuO_4 .

Количественное описание эффекта Керра

Возможные причины появления недиагональной компоненты проводимости :

- ▶ Рассеяние на примесях⁵
- ▶ Учет сверхпроводимости на нескольких зонах⁶

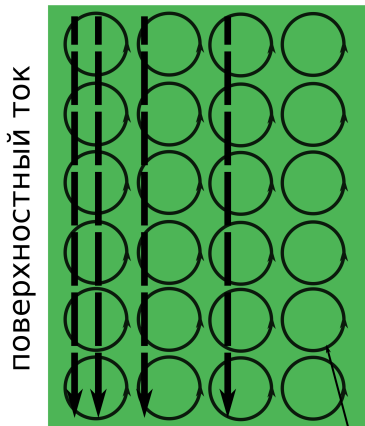
Нет количественного соответствия с экспериментом. Угол Керра чувствителен к некоторым неизвестным параметрам образца⁷.

⁵J. Goryo, Phys. Rev. B **78** 060501 (2008)

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

⁷C. Kallin, Rev. Prog. Phys. **75** 042501 (2012)

Поверхностные токи

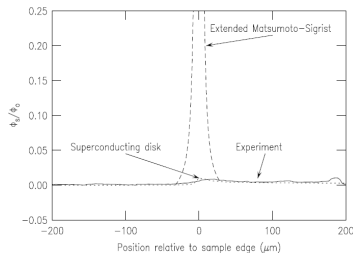


куперовские пары

Поверхностные токи

- ▶ СКВИД-измерения⁸
- ▶ Измерения Холловскими датчиками⁹

Найденные токи на три порядка меньше, чем предсказанные теоретически.



Результаты СКВИД измерений границы Sr_2RuO_4 . Сплошная линия — экспериментальный результат, длинный пунктир — теоретические предсказания¹⁰.

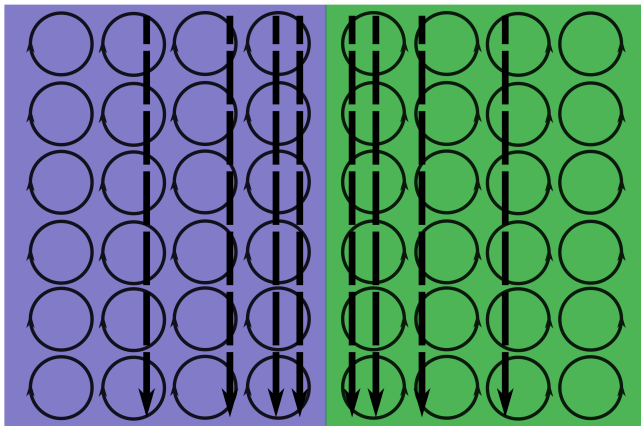
⁸J. R. Kirtley, *et al.*, Phys. Rev. B **76** 014526 (2007)

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

¹⁰M. Sigrist and M. Matsumoto, J. Phys. Soc. Japan **68** 994 1999

Доменные стенки

Sr_2RuO_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 Sr_2RuO_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)