

ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЗОНАНСА ВБЛИЗИ ЭНЕРГИИ ФЕРМИ В КОНДО-РЕШЕТКЕ

Ф.Г.Алиев, Н.Б.Брандт, В.В.Мошталков, Н.Е.Случанко,
С.М.Чудинов, Р.И.Ясницкий

В сверхпроводящей кондо-системе CeCu_2Si_2 обнаружено аномальное увеличение (в $40 \div 60$ раз) коэффициента Холла R_H при понижении температуры от 60 до 4 К, свидетельствующее об образовании в CeCu_2Si_2 узкого резонанса вблизи уровня Ферми.

В последнее время ¹⁻³ в теории кондо-решеток переход от магнитного режима ($T \gtrsim T_K$, T_K – температура Кондо) к немагнитному синглетному ($T \ll T_K$) связывается с радикальной перестройкой энергетического спектра в окрестности энергии Ферми ϵ_F : вблизи ϵ_F возникает узкий кондовский резонанс, амплитуда которого возрастает (а ширина убывает) по мере понижения температуры от $T \gtrsim T_K$ к $T \ll T_K$. Появление кондовского резонанса может сопровождаться, в результате когерентности кондовской экранировки магнитных моментов, образованием корреляционной щели на уровне Ферми для некоторых направлений в зоне Бриллюэна ¹. Однако, насколько нам известно, эти эффекты до сих пор не наблюдались.

В настоящей работе с целью экспериментальной проверки теорий ¹⁻³ исследованы температурные зависимости коэффициента Холла $R_H(T)$, удельного сопротивления $\rho(T)$, магнитной восприимчивости $\chi(T)$ у монокристаллических образцов CeCu_2Si_2 и поликристаллов $\text{Ce}_X\text{La}_{1-X}\text{Cu}_2\text{Si}_2$ ($0 < X \leq 1$) в широком интервале изменения давления ($p \leq 12$ кбар), температур ($0,05 \text{ К} \leq T \leq 100 \text{ К}$) и магнитных полей ($H \leq 40$ кЭ).

У твердых растворов $\text{Ce}_X\text{La}_{1-X}\text{Cu}_2\text{Si}_2$ на температурных зависимостях магнитной восприимчивости, измеренной в поле $H \simeq 0,5$ Э при помощи сквида, обнаружен локальный максимум (рис. 1), соответствующий, вероятнее всего, переходу при $T = T_{SG}$ из парамагнитного состояния в спиновое стекло. Температура T_{SG} (см. вставку на рис. 1) немонотонно изменяется при увеличении концентрации X магнитной компоненты в $\text{Ce}_X\text{La}_{1-X}\text{Cu}_2\text{Si}_2$. Амплитуда локального максимума в области $X \geq 0,5$ убывает с ростом X , а сам максимум сильно уширяется. Вблизи $X = 1$ поликристаллы $\text{Ce}_X\text{La}_{1-X}\text{Cu}_2\text{Si}_2$ становятся сверхпроводниками (см. кривую 5 на рис. 1).

У монокристаллов CeCu_2Si_2 ($X = 1$) при уменьшении температуры от ~ 60 до ~ 4 К обнаружен сильный (в $40 \div 60$ раз) рост коэффициента Холла R_H , соответствующий уменьшению концентрации свободных носителей от $n_H \simeq 1,5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ при $T = 60 \text{ К}$ до $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при $T = 1 \text{ К}$ (рис. 2, а). В интервале температур ниже некоторой характерной T_0 , зависящей от давления p , коэффициент Холла практически постоянен, а сопротивление ρ уменьшается. Величина T_0 приблизительно совпадает с температурой T_{max}^{ρ} , при которой на кривой $\rho(T)$ наблюдается максимум (рис. 2, б).

Анизотропия (при $H \parallel J$ и $H \perp J$) производной верхнего критического поля dH_{C2}/dT ($T = T_C$) в CeCu_2Si_2 уменьшается при всестороннем сжатии (рис. 3).

Обнаруженный рост коэффициента Холла R_H (рис. 2) по мере понижения температуры от $T \gtrsim T_K$ до $T \ll T_K$ (T_K в $\text{CeCu}_2\text{Si}_2 \simeq 30 \text{ К}$) можно объяснить образованием кондовского резонанса, соответствующего появлению в кондо-решетке тяжелых фермионов, концентрация которых равна нулю при $T \gg T_K$ и максимальна в области $T \ll T_K$ (см. вставку на рис. 3). В настоящей работе величина R_H определялась по полевым зависимостям холловского напряжения $U(H)$ при $H \leq 40$ кЭ. Вклад тяжелых (с массой $m^* \sim 200 m_0$) фермионов в таком поле пренебрежимо мал. Поэтому, измеряемый коэффициент Холла (рис. 2, а) дает не суммарную концентрацию электронов в зоне, а только концентрацию сво-

бодных, не "залипающих" на кондовских центрах электронов. Если считать, что убывание концентрации свободных носителей обусловлено только их перераспределением в кондовский резонанс, то плотность тяжелых фермионов в CeCu_2Si_2 возрастает от $n \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при $T \sim 60 \text{ К}$ до $n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ при $T \leq 4 \text{ К}$.

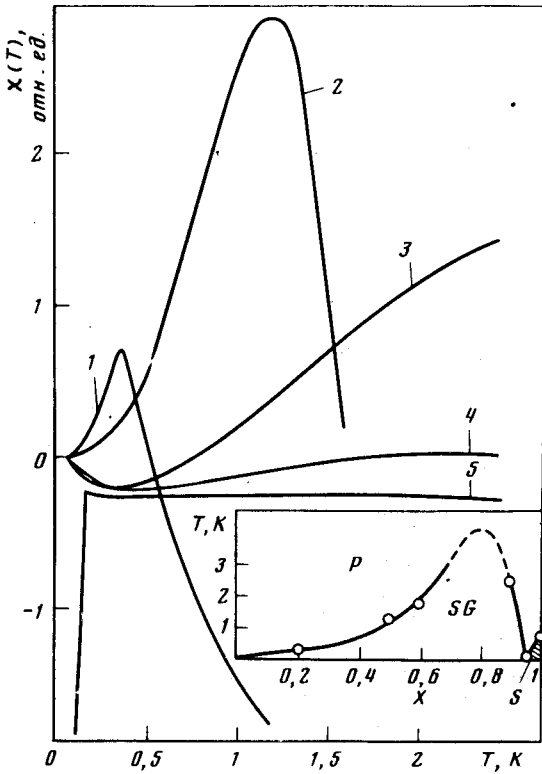


Рис. 1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости $\chi(T)$ у $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Cu}_2\text{Si}_2$ при различных концентрациях x : 1 – 0,2; 2 – 0,5; 3 – 0,7; 4 – 0,9; 5 – 1,0. На вставке показана фазовая диаграмма магнитных свойств $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Cu}_2\text{Si}_2$ (P – парамагнитное состояние, SG – спиновое стекло, S – сверхпроводящее состояние)

С этой точки зрения, полученные данные позволяют связать гигантские значения коэффициента γ электронной теплоемкости в кондо-решетках (у CeCu_2Si_2 $\gamma \approx 1000 \text{ мДж/моль} \cdot \text{К}^2$ ⁴ у CeAl_3 $\gamma \approx 1600 \text{ мДж/моль} \cdot \text{К}^2$ ⁵ для сравнения – у ормальных металлов $\gamma \approx 1 \div 10 \text{ мДж/моль} \cdot \text{К}^2$ именно с образованием вблизи ϵ_F узкого ($\sim kT_K$) кондовского резонанса большой амплитуды (см. вставку на рис. 3), а не с f -уровнем, который в этих системах лежит ниже уровня Ферми на 2 эВ ⁶.

Следует иметь в виду, что согласно ¹ процессы образования кондовского резонанса и возникновения корреляционной щели при низких температурах могут происходить одновременно. В связи с этим не исключено, что убывание $\rho(T)$ является следствием уменьшения эффективности рассеяния подвижных носителей на редуцированных магнитных моментах Се в результате появления когерентности кондовского рассеяния.

Аномально большое значение производной $dN_{C_2}/dT(T = T_C)$ ⁸ (рис.3) также свидетельствует о большой плотности состояний $g(\epsilon)$ вблизи ϵ_F . Отметим, что экспериментально наблюдаемое значение $dN_{C_2}/dT(T = T_C)$ близко к оценке, которую можно сделать по значениям ρ ⁸ и γ (при $T = 0,6 \text{ К}$) ⁴: $dN_{C_2}/dT(T = T_C) \approx 140 \text{ кЭ/К}$.

Соединение CeCu_2Si_2 отличается от других известных кондо-решеток на основе Се тем, что в нем валентность церия составляет $\nu_{\text{Ce}} \approx 3,08$ ⁷ (у идеальной кондо-решетки $\nu_{\text{Ce}} = 3$), так что оно близко к соединениям с промежуточной валентностью. Всестороннее сжатие,

увеличивая отклонение ν_{Ce} от целочисленного значения, индуцирует переход от кондо-решетки к соединению с переменной валентностью. Поэтому уменьшение под действием давления концентрации тяжелых фермионов можно связать с уменьшением амплитуды и уширением кондовского резонанса при этом переходе. Убывание плотности состояний тяжелых фермионов является причиной уменьшения под давлением среднего значения dH_{C2}/dT ($T = T_C$), которое пропорционально $g(\epsilon_F)$.

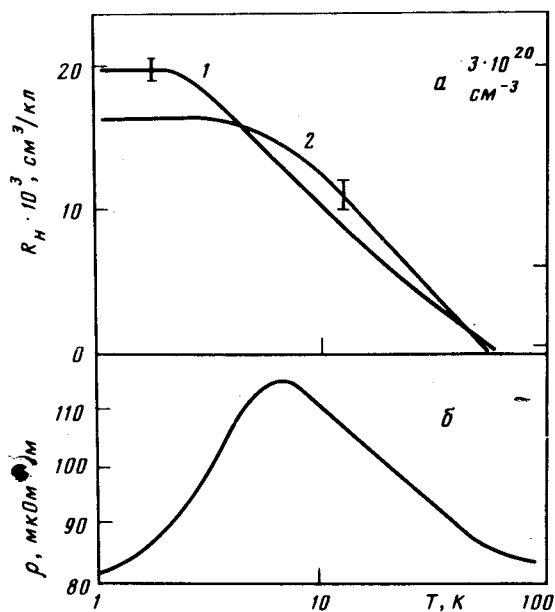


Рис.2

Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента Холла R_H (а) и удельного сопротивления ρ (б) у $CeCu_2Si_2$. Правая шкала верхнего рисунка показывает рассчитанную по R_H холловскую концентрацию. Кривые 1 и 2 измерены при давлениях 3,8 и 6,0 кбар соответственно. Зависимость $\rho(T)$ снята при давлении 3,8 кбар

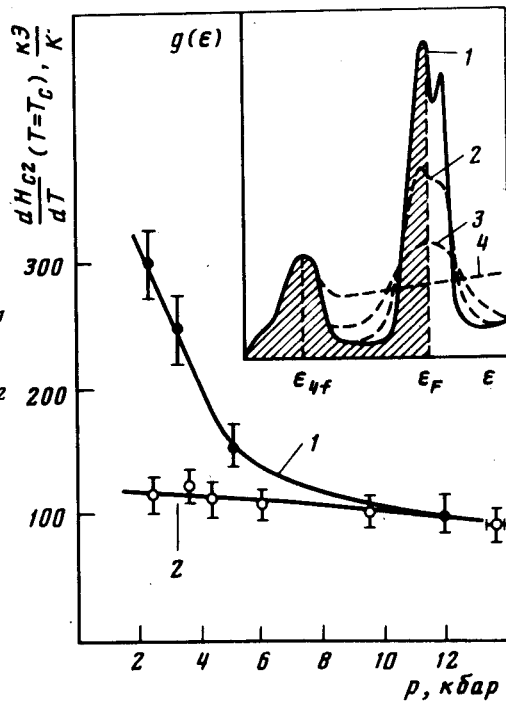


Рис.3

Рис. 3. Барическая зависимость производной верхнего критического поля dH_{C2}/dT ($T = T_C$) у $CeCu_2Si_2$ для направления $H \parallel J$ (кривая 1) и $H \perp J$ (кривая 2). Измерительный ток J течет в направлении, перпендикулярном кристаллографической оси "С" в $CeCu_2Si_2$. На вставке показана перестройка энергетического спектра кондо-решетки при понижении температуры от $T \gg T_K$ (4) через $T \sim T_K$ (3) и $T < T_K$ (2) к $T \ll T_K$ (1) (T_K - температура Кондо)

Заметим, что сильный рост коэффициента Холла (рис. 2, а) свидетельствует о том, что $CeCu_2Si_2$ представляет собой кондо-решетку, в которой относительная концентрация свободных электронов (в пересчете на один магнитный центр) близка к единице. Этот вывод подтверждается нетривиальной зависимостью магнитных свойств твердых растворов $Ce_xLa_{1-x}Cu_2Si_2$ (рис. 1), у которых происходит плавный переход от кондо-примеси ($X \ll \ll 1$) к кондо-решетке ($X \sim 1$), обуславливающий также исчезновение характерного для изолированной кондо-примеси плато на кривых $\rho(T)$ и появление максимума на температурных зависимостях удельного сопротивления при $X \geq 0,5$ в ряду $Ce_xLa_{1-x}Cu_2Si_2$.

При увеличении концентрации X в области $X \geq 0,5$ за счет возникновения кондовского резонанса при $X \rightarrow 1$, убывает относительная (на 1 магнитный центр) концентрация свободных носителей, что приводит к ослаблению РККИ взаимодействия кондовски редуцирован-

ных магнитных моментов церия и уменьшению T_{SG} (вставка на рис. 1). Одновременно, при $X \rightarrow 1$, растет концентрация тяжелых фермионов, которые и обуславливают появление сверхпроводимости в CeCu_2Si_2 .

В заключение пользуемся случаем выразить искреннюю признательность Д.И.Хомскому, А.И.Буздину и Р.В.Луциву за обсуждение результатов.

Литература

1. *Martin R.M.* Phys. Rev. Lett., 1982, **48**, 362.
2. *Zlatić V.* J. Phys. F., 1981, **11**, 2147.
3. *Lavagna M., Lacroix C., Cyrot M.J.* J. Phys. F, 1982, **12**, 745.
4. *Rauchschwalbe V., Lieke W., Bredl D., Steglich F., Aarts J., Martini K.M., Mota A.C.* Phys. Rev. Lett., 1982, **49**, 1448.
5. *Lawrence J.M., Riseborough P.S., Parks R.D.* Rep. Progr. Phys., 1981, **44**, 1.
6. *Allen J.W., Oh S.J., Lindau I., Lawrence J.M., Johansson L.I., Hagström S.B.* Phys. Rev. Lett., 1981, **46**, 1100.
7. *Umlauf E., Hess E.* Physica B, 1981, **108**, 1347.
8. *Алиев Ф.Г., Брандт Н.Б., Луцив Р.В., Моцалков В.В., Чудинов С.И.* Письма в ЖЭТФ, 1982, **35**, 435.
9. *Алиев Ф.Г., Брандт Н.Б., Моцалков В.В., Чудинов С.М., Луцив Р.В., Ясницкий Р.И.* ФТТ, 1982, **24**, 2385.

Московский
государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
13 января 1983 г.