

УДК 537.635

## ЭФФЕКТ ЭЛЕКТРОННОГО УЗКОГО ГОРЛА В ТЯЖЁЛОФЕРМИОННОМ МЕТАЛЛЕ $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$

*В. А. Иваньшин*

### Аннотация

Обсуждаются возможные обменные взаимодействия, которые приводят к аномальному сужению линии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) кондовского иона  $\text{Yb}^{3+}$  в концентрированных соединениях с Кондо-решёткой  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  и  $\text{YbIr}_2\text{Si}_2$  при температурах ниже 17 К. Эффект электронного узкого горла предложен в качестве возможного механизма ЭПР-релаксации.

### Введение

Магнитные и транспортные свойства тройных интерметаллических соединений вида  $\text{RT}_2\text{X}_2$  ( $\text{R}$  = редкоземельный (РЗ) ион,  $\text{T}$  = металл переходной группы,  $\text{X}$  = элемент IV или V группы) определяются магнитными моментами РЗ ионов и их обменным взаимодействием, которое ослаблено электронами проводимости, а также действием кристаллического электрического поля (КЭП) на сильно коррелированные 4f-электроны. Метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) позволяет получить важную информацию об электронной структуре и взаимодействии между РЗ ионами и электронами проводимости.

$\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  является одним из немногих тяжёлофермионных (ТФ) соединений с Кондо-решёткой на основе иттербия, которые проявляют свойства так называемого не-ферми-жидкостного (НФЖ) поведения (см. работу [1] и ссылки в ней). Особый интерес оно представляет из-за существования квантовой критической точки, связанной с исчезновением антиферромагнитного (АФМ) порядка с  $T_N \approx 70$  мК в сравнительно небольшом магнитном поле  $H_c = 0.06$  Т. Спектр квантовых критических флуктуаций в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  очень сложен и состоит как из АФМ, так и ферромагнитных (ФМ) составляющих, причём последние доминируют в большей части фазовой  $T - H$  диаграммы для температур  $T$  ниже 10 К и полей  $H$  менее 10 Т. Процессы магнитного упорядочения вследствие взаимодействия типа Рудермана – Киттеля – Касуи – Иосиды (РККУ) при этом конкурируют с эффектом Кондо. Аномальное поведение сопротивления, удельной теплоёмкости и магнитных свойств этого интерметаллида свидетельствует о фундаментальном нарушении ферми-жидкостной картины. Следует особо отметить, что, в отличие от сверхпроводников с НФЖ поведением на основе церия,  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  не переходит в сверхпроводящее состояние, вплоть до наиболее низкой достижимой температуры измерений  $T = 10$  мК, что может быть вызвано соперничеством между АФМ и ФМ флуктуациями. Разгадка возможной связи между квантовыми фазовыми переходами и сверхпроводимостью остаётся ключевой проблемой физики твёрдого тела [2].

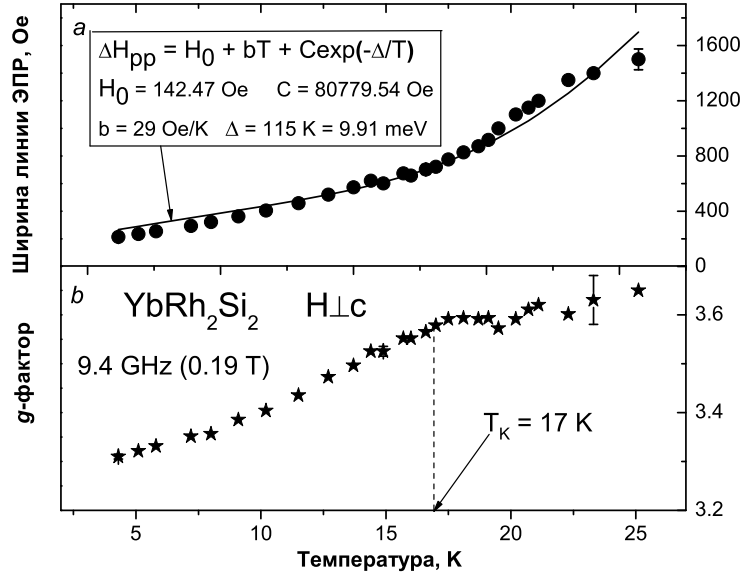


Рис. 1. Температурная зависимость ширины линии ЭПР  $\Delta H_{pp}$  (вверху) и эффективного  $g$ -фактора (внизу) в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ . Сплошной линией представлены результаты расчёта с подгоночными параметрами, указанными на врезке

### 1. Экспериментальные данные и их обсуждение

Эффективная температура Кондо  $T_K$  порядка  $15 \div 30 \text{ K}$  была измерена в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  в результате изучения его транспортных и магнитных свойств [1, 2]. В рамках существующих теоретических представлений об ЭПР в кондо-системах такое значение  $T_K$  соответствует ширине линии ЭПР в пределах  $25 \div 40 \text{ T}$  [3]. Оценка диполь-дипольной ширины линии ЭПР, обусловленной лишь спин-спиновыми взаимодействиями, даёт величину приблизительно  $0.16 \text{ T}$  [4]. Обычно именно по этой причине невозможно наблюдать сигнал ЭПР непосредственно от спинов кондо-ионов. Для того чтобы получить пригодную для измерений ширину ЭПР-поглощения, очень небольшое количество ( $\sim 1 \div 2\%$ ) РЗ ионов со стабильными магнитными моментами внедряется в исследуемый объект в качестве парамагнитных зондов. Так как структура  $\text{RT}_2\text{X}_2$  соединений, как правило, достаточно сложна, чрезвычайно трудно получить информацию о магнитных обменных взаимодействиях в этих системах из теоретических расчётов. Кроме того, характер основного состояния в них часто определяется влиянием нескольких конкурирующих микроскопических взаимодействий (эффекта Кондо, межатомных магнитных взаимодействий, кристаллического электрического поля (КЭП)). Поэтому введение парамагнитных примесей ещё более усложняет, а иногда делает и невозможным детальный теоретический анализ данных ЭПР-экспериментов. Тем более неожиданным и перспективным является обнаружение ЭПР-поглощения в неразбавленных монокристаллах  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  при температурах ниже  $25 \text{ K}$  [4, 5]. Соответствующая ширина линии ЭПР, приписанной локализованным магнитным ионам  $\text{Yb}^{3+}$  ( $4f^{13}$ ,  $J = 7/2$ ), составила величину около  $30 \text{ mT}$  при  $T = 1.5 \text{ K}$ . Изучение угловых и температурных зависимостей ширины ЭПР линии  $\Delta H_{pp}$  и эффективного  $g$ -фактора позволило сделать оценку температуры Кондо  $T_K \approx 17 \text{ K}$  [6]. Температурная зависимость этих ЭПР-параметров проявляла характерные особенности, наблюдавшиеся ранее [7] для систем с кондо-решёткой (рис. 1). Механизм Корринги,

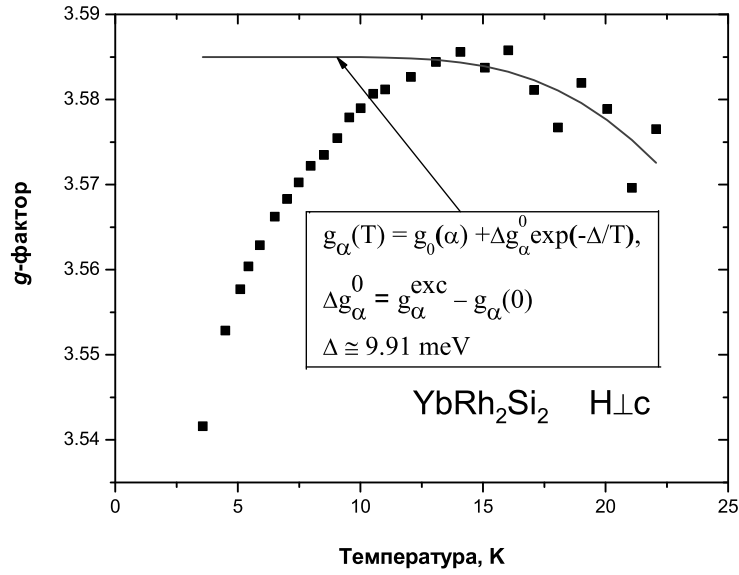


Рис. 2. Температурная зависимость  $g$ -фактора в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ , частота ЭПР-измерений 34.1 GHz [4]. Сплошной линией представлены результаты расчёта с использованием формулы (1), где  $g_{\perp}^{\text{exc}} = 1.0$ ,  $\Delta g_{\perp}^0 = -2.58$  и  $\Delta \approx 9.91$  meV

ответственный за взаимодействие электронов проводимости (ЭП) с локализованными магнитными моментами, является наиболее вероятной причиной линейной температурной зависимости  $\Delta H_{pp}$  ниже 17 К, что можно связать с существованием неэкранированных моментов  $\text{Yb}^{3+}$ , релаксирующих сквозь коррелированную Ферми-жидкость [8]. Наличие таких моментов, по-видимому, обусловлено тем, что их экранировка вследствие эффекта Кондо частично снимается под действием магнитного поля  $H$ , когда энергия зеемановского расщепления  $g\mu_B H$  становится сопоставимой с энергией кондовских флуктуаций  $k_B T_K$  [1].

Впрочем, детальное изучение эффекта Кондо в данной системе может быть осуществлено только после экспериментов при более низких температурах  $T < 1.5$  К. В области высоких температур  $T > 17$  К колебания кристаллической решётки модулируют КЭП лигандов и благодаря спин-орбитальной связи обуславливают спин-решёточную релаксацию (СРР), которая приводит к существенному уширению, ослаблению и исчезновению сигнала ЭПР при температурах выше 25 К. Можно предположить, что сильно-анизотропная ЭПР-релаксация в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  является результатом совместного влияния СРР ионов  $\text{Yb}^{3+}$  [4, 5] и РККУ-взаимодействия с ЭП [6], как это и наблюдалось в различных ТФ соединениях с кондо-решёткой [3]. Механизм СРР, связанный с тепловыми флуктуациями нижних уровней иона  $\text{Yb}^{3+}$  в КЭП [4], способен описать и температурную зависимость  $g$ -фактора для  $T > 17$  К (рис. 2). В этом случае магнитные диполь-дипольные и обменные взаимодействия ионов  $\text{Yb}^{3+}$  с окружением вызывают их случайные переходы с нижнего крамеровского дублета на первый возбуждённый штарковский подуровень с энергией активации  $\Delta \approx 9.91$  meV. Для  $g$ -факторов вклад этого механизма может быть представлен формулой

$$g_{\alpha}(T) = g_0(\alpha) + \Delta g_{\alpha}^0 \exp(-\Delta/T), \quad (1)$$

где  $g_0(\alpha)$  и  $g_{\alpha}^{\text{exc}}$  – эффективные  $g$ -факторы нижнего и первого возбуждённого дублетов иона  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\Delta g_{\alpha}^0 = g_{\alpha}^{\text{exc}} - g_{\alpha}(0)$ ,  $\Delta \approx 9.91$  meV. Тетрагональное КЭП расщеп-

ляет  $f$ -мультиплет ( $f_{7/2}$ ) иона  $\text{Yb}^{3+}$  на четыре крамеровских дублета [9], при этом величина  $\Delta$  достаточно близка к положению первого возбуждённого штарковского подуровня, измеренного в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  с помощью метода неупругого нейтронного рассеяния [10].

Недавние исследования [11–13] интерпретировали  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  и родственное соединение  $\text{YbIr}_2\text{Si}_2$  в качестве интерметаллидов со смешанной валентностью иттербия, равной приблизительно 2.9, и значительной гибридизацией между  $f$ -электронами и ЭП  $d$ -типа. Стоит подчеркнуть, что ЭПР-поглощение (как и НФЖ поведение) было обнаружено только в этих двух концентрированных ТФ сплавах на основе иттербия [14]. Отклонение валентности  $\text{Yb}$  от значения  $3+$  в них может только в незначительной степени объяснить аномально узкие линии ЭПР ниже  $T_K$ .

Предварительный анализ [15] показал, что в качестве возможного релаксационного механизма может быть предложен эффект электронного узкого горла (ЭУГ), который вызывает резкое уменьшение скорости релаксации спинов иттербия в интервале температур  $1 \div 10$  К. Режим ЭУГ возникает, если скорость релаксации ЭП к локализованным моментам иттербия  $\delta_{eS}$  становится сравнимой или даже больше скорости релаксации ЭП к решётке  $\delta_{eL}$ , то есть ЭП эффективнее взаимодействуют со спинами  $\text{Yb}$ , чем с колебаниями решётки.

В ходе ЭПР-измерений характерное для ЭУГ поведение приводит к увеличению коэффициента механизма Корринги  $b = d\Delta H_{pp}/dT$  и к сдвигу величины  $g$ -фактора при уменьшении концентрации РЗ ионов.

Эффект ЭУГ может возникнуть при уменьшении числа локализованных спинов, добавлении других магнитных примесей, а также при изменении характера и плотности ЭП. ЭУГ наблюдался, в частности, в ЭПР-исследованиях на ионах гадолиния, введённых в виде примеси в интерметаллические соединения типа  $\text{Gd}_{1-x}\text{La}_x\text{T}_2\text{Si}_2$  ( $\text{T} = \text{Cu}, \text{Ni}$ ) [16]. Для процессов ЭПР-релаксации замена  $\text{Cu}$  на  $\text{Ni}$  приводила к двум последствиям: повышалась плотность состояний на уровне Ферми (то есть возрастала  $\delta_{eS}$ ) и изменялся  $d$ -характер ЭП (увеличивалась  $\delta_{eL}$ ). Последний эффект существенно сильнее, и в том случае, когда количество  $d$ -электронов у элемента переходной группы увеличивается, ЭУГ усиливается. Другими словами, спины  $\text{Gd}$  в соединении с медью  $\text{GdCu}_2\text{Si}_2$  были сильнее связаны с системой ЭП, чем в  $\text{GdNi}_2\text{Si}_2$ .

Таким образом, обменные взаимодействия между системами ЭП, спинов  $\text{Yb}$ , а также  $\text{Rh}$  или  $\text{Ir}$  играют решающую роль при возникновении ЭУГ в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  или в  $\text{YbIr}_2\text{Si}_2$  соответственно. При этом возможные горловые эффекты должны быть выражены сильнее в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ . Сценарий ЭУГ нашёл подтверждение в недавних измерениях методом ЭПР чистого по изотопному составу иттербия образца  $^{174}\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  и разбавленных систем вида  $\text{YbRh}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  и  $\text{Yb}_{1-x}\text{R}_x\text{Rh}_2\text{Si}_2$  ( $\text{R} = \text{La}, \text{Lu}$ ) [17–19]. Так, в  $^{174}\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  наблюдалась меньшая остаточная ширина линии ЭПР и менее эффективное уширение сигнала при повышении температуры по сравнению с исходным соединением. Вносимый в результате внедрения примесей  $\text{La}$  или  $\text{Ge}$  беспорядок приводил к более эффективной ЭПР-релаксации  $\text{Yb}$ . При увеличении концентрации  $\text{Lu}$  или  $\text{La}$  в  $\text{Yb}_{1-x}\text{R}_x\text{Rh}_2\text{Si}_2$  ЭПР-сигнал от иттербия также заметно уширяется (до  $\sim 0.3$  Т при температуре около 15 К в  $\text{Yb}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{Rh}_2\text{Si}_2$ ), что является характерным признаком эффекта ЭУГ. Это означает, что локализованные магнитные моменты  $\text{Yb}^{3+}$  становятся настолько сильно связанными с ЭП, что сигнал ЭПР в разбавленных соединениях в температурном интервале  $1.5 \div 15$  К определяется, главным образом, режимом ЭУГ.

### Выводы

Конкуренция между эффектами Зеемана и Кондо, флуктуации валентности иттербия и релаксация в условиях ЭУГ предложены в качестве возможных причин наблюдения обменно-суженных линий ЭПР в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  и  $\text{YbIr}_2\text{Si}_2$ . При  $T < 17$  К ширина линии ЭПР и  $g$ -фактор проявляют особенности, характерные для эффекта Кондо и релаксационного механизма Корринги. Процессы СРР, обусловленные первым возбуждённым штарковским подуровнем иона  $\text{Yb}^{3+}$ , определяют температурную зависимость этих ЭПР-параметров в  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  при более высоких температурах. Представляется целесообразным проведение дальнейших ЭПР-экспериментов при  $T < 1.5$  К и на более высоких частотах ЭПР-регистрации с целью обнаружения возможных резонансных линий от ионов Yb, Rh или Ir, а также изучения возможной роли ФМ флуктуаций в ЭПР-релаксации ионов  $\text{Yb}^{3+}$  ниже  $T_K$ . Нет сомнения, что опыты подобного рода будут стимулировать новые теоретические исследования по особенностям ЭПР в кондо-системах с НФЖ поведением.

### Summary

V.A. Ivanshin. ESR bottleneck effect in the heavy-fermion metal  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ .

Possible exchange interactions which lead to the unusual narrowed electron spin resonance (ESR) linewidths of the Kondo ion  $\text{Yb}^{3+}$  in the dense Kondo lattice systems  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  and  $\text{YbIr}_2\text{Si}_2$  below 17 K are discussed. An approach related to the electron bottleneck effect is proposed as a possible mechanism of the ESR relaxation.

### Литература

1. *Gegenwart P., Tokiwa J., Westerkamp T., Weickert F., Custers J., Ferstl J., Krellner C., Geibel C., Kersch P., Müller K.-H., Steglich F.* High-field phase diagram of the heavy-fermion metal  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // *New J. Phys.* – 2006. – V. 8. – Art. 171.
2. *Steglich F.* From Kondo impurities to heavy-fermion superconductivity and quantum critical points // *Physica B.* – 2006. – V. 378–380. – P. 7–12.
3. *Krug von Nidda H.-A., Heinrich M., Loidl A.* Dynamic susceptibility in heavy-fermion systems and related materials, probed by electron spin resonance // *Relaxation Phenomena: Liquid Crystals, Magnetic Systems, Polymers, High-Tc Superconductors, Metallic Glasses, Chapt. 2.2.* / Eds. W. Haase, S. Wrobel. – Berlin: Springer, 2003.
4. *Иваньшин В.А., Аминов Л.К., Куркин И.Н., Зицельшмидт Й., Штокерт О., Ферстль Ю., Гайбель К.* Электронный парамагнитный резонанс ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в концентрированном соединении с тяжёлыми фермионами  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // *Письма в ЖЭТФ.* – 2003. – Т. 77. – С. 625–628.
5. *Sichelschmidt J., Ivanshin V.A., Ferstl J., Geibel C., Steglich F.* Low temperature electron spin resonance of the Kondo ion in a heavy-fermion metal:  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V. 91. – P. 156401-1–156401-4.
6. *Ivanshin V.A., Zverev D.G.* ESR study of the undoped heavy-fermion compound  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // *Appl. Magn. Reson.* – 2004. – V. 27. – P. 87–91.
7. *von Spalden Y., Tsang E., Baberschke K., Schlottmann P.* ESR study of the Kondo effect in  $\text{Au}^{171}\text{Yb}$  and  $\text{Au}^{174}\text{Yb}$  // *Phys. Rev. B.* – 1983. – V. 24. – P. 24–28.
8. *Continentino M.A.* Thermodynamic approach to obtaining a highly spin-polarized strongly correlated Fermi liquid // *Phys. Rev. B.* – 2005. – V. 72. – P. 113108-1–113108-4.

9. *Ivanshin V.A., Kurkin I.N., Leushin A.M., Aminov L.K.* Crystal electric field excitations in the non-Fermi liquid compound  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // J. Supercond. and Nov. Magnetism. – 2007. – V. 20. – P. 131–133.
10. *Stockert O., Koza M.M., Ferstl J., Murani A.P., Geibel C., Steglich F.* Crystalline electric field excitations of the non-Fermi-liquid  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // Physica B. – 2006. – V. 378–380. – P. 157–158.
11. *Norman M.R.* Hall number in  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // Phys. Rev. B. – 2005. – V. 71. – P. 220405(R)-1–220405(R)-4.
12. *Jeong T., Pickett W.E.* First-principles study of the electronic structure of heavy fermion  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  // J. Phys. C. – 2006. – V. 18. – P. 6289–6297.
13. *Danzenbächer S., Kucherenko Yu., Vyalikh D.V., Laubschat C., Hossain Z., Geibel C., Zhou X.J., Yang W.L., Mannella N., Hussain Z., Shen Z.-X., Molodtsov S.L.* Energy Dispersion of 4*f*-Derived Emissions in Photoelectron Spectra of the Heavy-Fermion Compound  $\text{YbIr}_2\text{Si}_2$  // Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – Art. 106402.
14. *Sichelschmidt J., Hossain Z., Ferstl J., Geibel C., Steglich F.* Electron spin resonance of heavy fermion metals: probing the quantum critical regime // Abst. of the Internat. Conf. “Nanoscale properties of condensed matter probed by resonance phenomena”, Kazan, Russia. – Kazan, 2004. – P. 46.
15. *Mironov G.I., Ivanshin V.A.* Spin dynamics in  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$  probed by ESR // Physica B. – 2005. – V. 359–361. – P. 47–49.
16. *Kaczmarek K.* ESR bottleneck effect in dilute  $\text{Gd}_{1-x}\text{La}_x\text{T}_2\text{Si}_2$  (T = Cu, Ni) systems // J. Alloys and Compd. – 1996. – V. 240. – P. 88–95.
17. *Sichelschmidt J., Ferstl J., Geibel C., Steglich F.* Kondo ion electron spin resonance in  $\text{YbRh}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$  ( $x = 0.05$ ) // Physica B. – 2005. – V. 359–361. – P. 17–19.
18. *Wykhoff J., Sichelschmidt J., MaQuilon S., Pham L., Fisk Z., Krellner C., Ferstl J., Krug von Nidda H.-A., Geibel C., Steglich F.* How many Kondo-ions are seen by the electron spin resonance in  $\text{Yb}_{1-x}\text{R}_x\text{Rh}_2\text{Si}_2$ ? // Abst. of the DPG Spring Meeting, Dresden, Germany. – Dresden, 2006. – P. TT.25.81.
19. *Wykhoff J., Sichelschmidt J., Ferstl J., Krellner C., Geibel C., Steglich F., Fazlishanov I., Krug von Nidda H.-A.* Electron spin resonance in  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$ : The role of the residual linewidth // Physica C. – Submitted.

Поступила в редакцию  
29.08.06

---

**Иваншин Владимир Алексеевич** – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории магнитной радиоспектроскопии Казанского государственного университета.

E-mail: [Vladimir.Ivanshin@ksu.ru](mailto:Vladimir.Ivanshin@ksu.ru)