

ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛЛ-ЭФФЕКТА И ЯМР СОЕДИНЕНИЯ  $U\text{Ве}_{13}$ 

*Н.Е.Алексеевский, В.Н.Нарожный, В.И.Нижанковский, Е.Г.Николаев, Е.П.Хлыбов*

Проведены измерения ЭДС Холла, магнитосопротивления и ЯМР на образцах  $U\text{Ве}_{13}$ . Высказывается предположение о том, что аномальные свойства  $U\text{Ве}_{13}$  связаны с двухзонным характером спектра этого соединения.

Ранее уже сообщалось, что соединение  $U\text{Ве}_{13}$ , имеющее структуру типа  $\text{NaZn}_{13}$ , обладает рядом необычных свойств<sup>1</sup>. Представляло интерес выяснить возможные причины, приводящие к появлению особенностей в таких соединениях. В последнее время нами были исследованы: эффект Холла, магнитосопротивление и ЯМР на образцах  $U\text{Ве}_{13}$ . Образцы были практически однофазные и имели постоянную решетки  $a = 10,254 \text{ \AA}$ . Они приготавливались так же, как это было описано в<sup>2</sup>, и имели размеры примерно  $0,5 \times 1,5 \times 5 \text{ мм}^3$ . Для измерения в области температур ниже градуса использовался прибор с адиабатическим размагничиванием эрбий-алюминиевого граната<sup>3</sup>, а также установка с откачкой гелия-3.

На рис. 1 представлена зависимость ЭДС Холла от магнитного поля для трех температур. Значение константы Холла при понижении температуры, как видно из рисунка, увеличивается. Проведенные измерения показали, что для  $T = 100 \text{ К}$   $(R)_H = 60 \text{ кЭ} = 1,46 \cdot 10^{-11} \text{ Ом}\cdot\text{см}/\text{Э}$ , для  $T = 4,2 \text{ К}$   $(R)_H = 60 \text{ кЭ} = 1,58 \cdot 10^{-10} \text{ Ом}\cdot\text{см}/\text{Э}$ .

На рис. 2 показана зависимость сопротивления от магнитного поля для нескольких температур. Видно, что сопротивление уменьшается с полем, и величина такого уменьшения растет при понижении температуры. Следует отметить перегиб на зависимости  $r(H)$  при  $T \leq 2 \text{ К}$ . Если из константы Холла оценить плотность носителей  $n$ , считая, что  $R = 1/nec$ , то оказывается, что при  $T = 100 \text{ К}$   $n = 4,3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , в то время, как для  $T = 4,2 \text{ К}$   $n = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Приведенные оценочные значения плотности носителей трудно согласовать с данными по измерению теплоемкости, которые дают величину  $\gamma \approx 1 \text{ Дж}/\text{К}^2 \cdot \text{моль}^{-1}$ . Естественно поэтому предположить, что в соединении  $U\text{Ве}_{13}$  имеются две группы носителей: тяжелые и легкие. В этом случае можно также объяснить нелинейное поведение ЭДС Холла с полем, представленное на рис. 1.

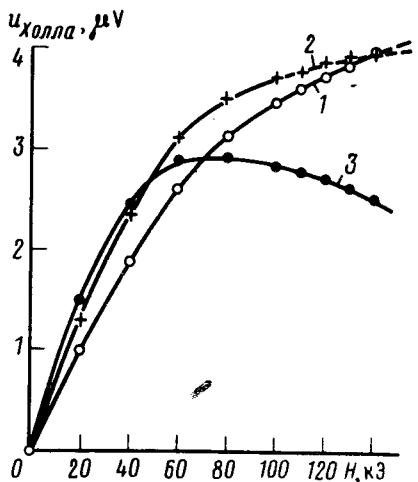


Рис. 1. Зависимость холловского напряжения от магнитного поля для образца  $UBe_{13}$ : 1 -  $T = 4, 2$  К; 2 -  $T = 3$  К; 3 -  $T = 1,9$  К. Измерительный ток = 10 мА

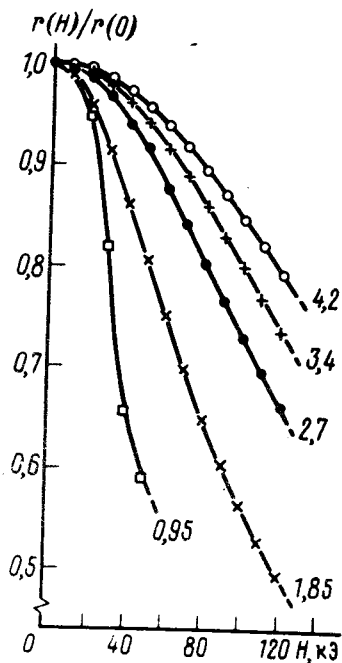


Рис. 2. Приведенное магнитосопротивление  $UBe_{13}$  как функция магнитного поля. Цифры обозначают температуру в К

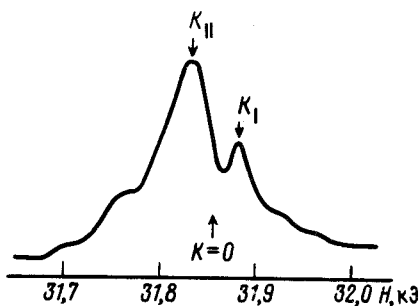


Рис. 3. Спектр ЯМР  $^{99}Be$  в соединении  $UBe_{13}$ .  $f = 19,06$  МГц,  $T = 4,2$  К,  $K_I = -0,085 \pm 0,003\%$ ,  $K_{II} = 0,075 \pm 0,003\%$

На рис. 3 показан спектр ядерного магнитного резонанса  $^{99}Be$  в соединении  $UBe_{13}$ , полученный на частоте 19,06 МГц при 4,2 К. Измерения при различных значениях магнитного поля показали, что широкие крылья слева и справа от двух центральных компонент обусловлены квадрупольным взаимодействием. Наличие двух максимумов в спектре связано, по-видимому, с двумя неэквивалентными позициями Be в решетке  $UBe_{13}$ <sup>4</sup>. Как видно из рисунка, сдвиги Найта для центральных компонент имеют разный знак. Можно предположить, что это обусловлено разным знаком спиновой поляризации в позициях Be I и Be II.

В работе<sup>5</sup> необычные свойства  $UBe_{13}$ , обнаруженные авторами, рассматривались как следствие того, что сверхпроводимость этого соединения связана со спариванием в триплетном состоянии. Такая возможность согласуется с рядом экспериментальных фактов, к числу которых можно отнести зависимость теплоемкости от температуры<sup>5</sup>, экстремально высокие значения  $H_{c2}$ <sup>1, 2</sup>, резкое уменьшение  $T_c$  при растворении в  $UBe_{13}$  изоморфных примесей, таких, как  $ZrBe_{13}$  и  $CeBe_{13}$ <sup>2</sup> и др.

Следует, однако, заметить, что, например, наличие двух типов носителей — тяжелых и легких — существенно осложняет возможность использования триплетного спаривания для объяснения свойств  $UBe_{13}$ <sup>1)</sup>. В связи с этим можно обсудить другие вероятные объяснения необычных свойств  $UBe_{13}$ . Если считать, что в  $UBe_{13}$  существуют тяжелые и легкие носители тока, то можно допустить, что зависимость  $C_p(T)$ , не согласующаяся с теорией БКШ, отражает наличие двух энергетических щелей  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , связанных с двумя типами носителей.

1) Кроме того, большая величина спин-орбитального взаимодействия в этом соединении также затрудняет использование триплетного спаривания.

В этом случае  $5f$ -электроны  $U$  представляют группу тяжелых носителей, а электроны бериллия — группу легких носителей.

Вопрос о двухзонной сверхпроводимости обсуждается, как известно, давно <sup>6</sup>. В случае ниобия рассматривались две щели: одна в  $S$ , а другая в  $d$ -зоне. Вычисленная для случая двух щелей теплоемкость <sup>6</sup> достаточно хорошо согласовывалась с экспериментальными данными.

Вопрос о двухзонной модели для редкоземельных металлов применительно к церию обсуждался в <sup>7</sup>. Магнитные взаимодействия, в основном, могут определяться тяжелыми носителями. Возникновение в магнитном поле поляризации в системе  $5f$ -электронов может, из-за эффекта Петера — Жакарно <sup>8</sup>, привести к компенсации внешнего магнитного поля, что и определит весьма большие значения критических магнитных полей. Эффект компенсации Петера — Жакарно — явление достаточно редкое. По-видимому, отчетливое проявление эффекта компенсации недавно наблюдалось в работе <sup>9</sup>, где на соединении  $Eu_x Sn_{1-x} Mo_6 S_8$  была обнаружена сверхпроводимость, индуцированная магнитным полем. Эффект компенсации, приводящий к индуцированной магнитным полем сверхпроводимости, как это отмечается в <sup>9</sup>, может происходить тогда, когда обменное поле  $H_J$  оказывается больше, чем парамагнитный предел  $H_p$ . Для соединения  $Eu_x Sn_{1-x} Mo_6 S_8$  Фишером и др. <sup>10</sup> была определена величина обменного интеграла  $J$ , которая оказалась равной  $\sim 0,01$  эВ. Если из полученных нами значений сдвига Найта <sup>9</sup>  $Ue$  и восприимчивости <sup>1</sup> для  $Ue_{13}$  оценить величину обменного интеграла, то оказывается, что  $|J| \geq 0,01$  эВ. Учитывая низкое  $T_c$   $Ue_{13}$  ( $\sim 1$  К), можно полагать, что и для этого соединения условие  $H_J > H_p$  заведомо выполнено. Это обстоятельство делает возможность влияния эффекта компенсации на свойства  $Ue_{13}$  достаточно вероятной. Не исключено также, что большие критические магнитные поля могут быть связаны, как это уже отмечалось <sup>2</sup>, с ковалентной неустойчивостью <sup>11</sup> или с образованием кондо-решетки <sup>12</sup>.

Дальнейшие исследования интересных свойств  $Ue_{13}$ , вероятно, позволят установить действительный механизм сверхпроводимости этой системы.

#### Литература

1. Ott H.R., Rudigier H., Fisk Z., Smith J.L. Phys. Rev. Lett., 1983, 50, 1595.
2. Алексеевский Н.Е. Письма в ЖЭТФ, 1984, 40, 66.
3. Alekseevskii N.E., Dodokin A.P., Bazan C., Bagdasarov Kh.S., Fedorov E.A., Belyav L.M. Cryogenics, October 1981, 598.
4. Shoemaker D.P., Marsh R.E., Ewing F.J., Pauling L. Acta Crystallogr., 1952, 5, 637.
5. Ott H.R., Rudigier H., Rice T.M., Ueda K., Fisk Z., Smith J.L. Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 1915.
6. Козн М., Гледстоун Г., Иенсен М., Шриффер Дж. Сверхпроводимость полупроводников и переходных металлов. М.: Мир, 1972, гл. 6, с. 255.
7. Grimberg A.J.T., Schinkel C.J. Solid. State Comm., 1973, 13, 193.
8. Jacarino V., Peter M. Phys. Rev. Lett., 1976, 37, 344.
9. Meul H.W., Rossel C., Decroux M., Fischer O., Remenyi G., Briggs A. Phys. Rev. Lett., 1984, 53, 497.
10. Fischer O., Decroux D., Roth R. J. Phys. C, 1975, 8, L 474.
11. Булаевский Л.Н., Собянин А.А., Хомский Д.И. ЖЭТФ, 1984, 87, 854.
12. Bredt C.D., Morn S., Steglich F., Lüthi B., Martin Richard M. Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 1982; Алиев Ф.Г., Бредт Н.Б., Мошалков В.В., Петренко О.В., Чудинов С.М., Ясницкий Р.И. ЖЭТФ, 1984, 86, 255.