

## ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС НА ПРОСТЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УРОВНЯХ ИОНОВ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ

*С.А.Альтшулер, М.А.Теплов*

Магнитный резонанс на ядрах парамагнитных ионов, основным состоянием которых в кристаллическом поле является электронный спиновый синглет, обсуждался в работах [1–4]. Экспериментальное подтверждение выводов теории было найдено пока лишь в одном случае – при исследовании иона  $V^{3+}$  в корунде [5]. Отсутствие эффекта ЭПР в целом ряде кристаллов, содержащих ионы редких земель с четным числом электронов, заставляет предположить, что здесь нижнее состояние также синглетно и что магнитный резонанс на ядрах редкоземельных ионов может быть обнаружен. Вследствие больших значений констант сверхтонкой структуры и полного момента  $J$  в кристаллах с редкоземельными ионами влияние возбужденных уровней на основной должно быть заметнее, чем в группе железа, а эффект поглощения радиочастотной энергии – сильнее. Спектры поглощения в этих случаях содержат информацию о возбужденных состояниях, которая в совокупности со сведениями, полученными из оптической спектроскопии, может оказаться весьма ценной при определении системы энергетических уровней иона в кристалле и параметров кристаллического поля.

В настоящей заметке сообщается об обнаружении эффекта магнитного резонанса на ядрах  $\text{Pr}^{141}$  в монокристалле октагидрата сульфата празеодима  $\text{Pr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Сульфат празеодима является моноклинным кристаллом [6]. Эксперимент показывает, что в единичной ячейке имеются два магнитно-эквивалентных, но по разному ориентированных комплекса. Кристаллическое поле (по-видимому, ромбической или более низкой симметрии) снимает вырождение основного уровня  $^3\text{H}_4(4f^2)$  таким образом, что нижний уровень оказывается простым; это подтверждается отсутствием эффекта ЭПР. Благодаря сверхтонкому взаимодействию, наличие близлежащих возбужденных уровней снимает шестикратное (по спине ядра) вырождение нижнего штарковского подуровня до дублетов. Заметную роль здесь играет, видимо, и квадрупольное взаимодействие. Измерения проводились на автодинном видеоспектроскопе при температуре  $1,5^\circ\text{K}$ . Для обеспечения вывода кристаллических осей вдоль направления постоянного магнитного поля была сконструирована система вертикального вращения кристалла внутри радиочастотной катушки.

Согласно измерениям, расщепления в нулевом поле равны:

переход  $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ :  $13390 \pm 10$  кГц,

переход  $\pm 3/2 \leftrightarrow \pm 5/2$ :  $22860 \pm 20$  кГц.

В работе были использованы частоты от 4 до 24 МГц, магнитное поле изменялось от 0 до 8500 э. Как выяснилось, при этих условиях реализуется наиболее трудный случай – случай промежуточных полей. Расшифровка спектров в различных ориентациях свелась к диагонализации матриц 6-го

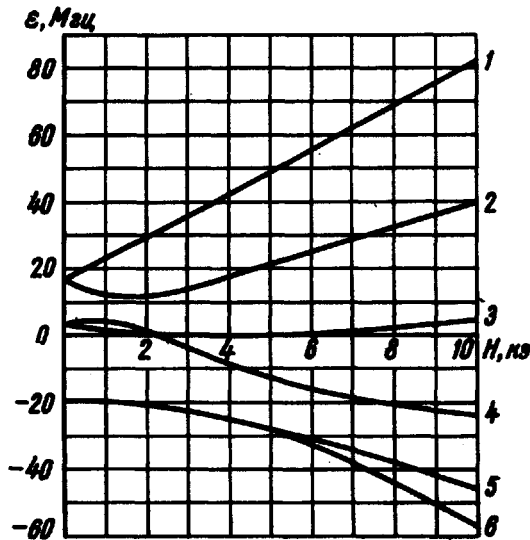


Рис. 1. Зависимость  $|\epsilon_i - \epsilon_k|$  от  $H$  для  $\text{Pt}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ;  $H||y$ ,  $|\gamma_y| = 2,71$  кГц/э. — теория, о — эксперимент

порядка; расчеты велись на электронно-вычислительной машине. Для предварительной ориентировки весьма полезными оказались результаты работы [7].

В итоге предварительной обработки экспериментальных данных можно сказать, что спектр описывается ядерным спин-гамильтонианом вида:

$$\mathcal{H} = \gamma_x H_x I_x + \gamma_y H_y I_y + \gamma_z H_z I_z + D [I_z^2 - 1/3I(I+1)] + E(I_x^2 - I_y^2),$$

где  $|\gamma_x| = 4,640 \pm 0,050$  кГц/э,  $|\gamma_y| = 2,710 \pm 0,010$  кГц/э,  $|\gamma_z| = 12,0 \pm 2,0$  кГц/э,  $|D| = 5865 \pm 5$  кГц,  $|E| = 730 \pm 1$  кГц. Рисунки иллюстрируют метод определения констант спин-гамильтониана: на рис. 1 изображена система ядерных энергетических уровней в "y"-ориентации\*, а на рис. 2 – кривые зависимости частоты того или иного перехода от величины магнитного поля. Нумерация уровней энергии позволяет быстро отыскать на рис. 2 нужный переход.

Магнитный момент ядра  $\text{Pt}^{141}$  равен  $+4,28$  яд.магн. [8], гиромагнитное отношение  $\gamma_{\text{яд}} = +1,310$  кГц/э. Из сравнения последней величины с  $\gamma_{\text{фак}}$

торами, приведенными выше, следует, что вклад электронного магнетизма в основное диамагнитное состояние здесь весьма велик. Более точно-

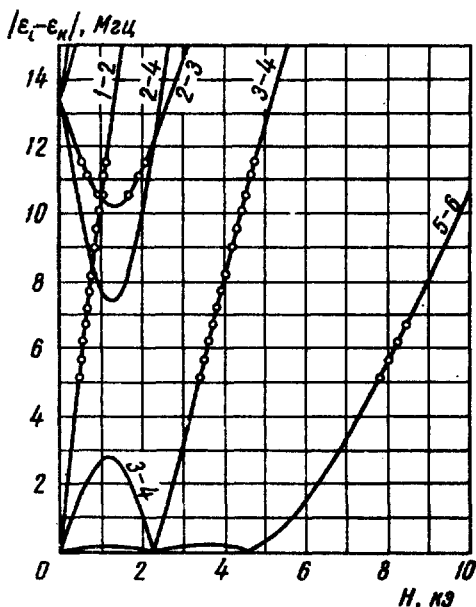


Рис. 2

му определению величины  $|\gamma_z|$  препятствует довольно сильная анизотропия  $\gamma$ -фактора.

Детальное обсуждение методики и результатов эксперимента будет опубликовано позднее.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность О.И.Марьяхиной за помощь в обработке экспериментальных результатов и Л.А.Шербаковой за изготовление кристалла.

Казанский государственный университет  
им.В.И.Ульянова-Ленина

Поступило в редакцию  
23 декабря 1966 г.

### Литература

- [1] М.М.Зарипов. Изв. АН СССР, сер. физ., 22, 1220, 1956.
- [2] Р.М.Минева. ФТТ, 5, 1403, 1963.
- [3] С.А.Альтшулер, Р.М.Минева. ФТТ, 7, 310, 1965.
- [4] Л.Я.Шекун. ФТТ, 8, 2929, 1966.
- [5] С.А.Альтшулер, В.Н.Ястребов. ЖЭТФ, 47, 382, 1964.
- [6] В.И.Иверонова, В.П.Тарасова, М.М.Уманский. Вестник МГУ, 8, 37, 1951.
- [7] М.М.Зарипов, Л.Я.Шекун. Сб. Парамагнитный резонанс. Изд.-во КГУ, Казань, 1964.

[8] B.Bleaney. Quantum Electronics, proceedings of the third international Congress, 1, Paris, 1964.

---

\* При диагонализации спин-гамильтониана мы предположили, что константы  $D$  и  $E$  – отрицательны.