

## ВЛИЯНИЕ СПИН-СПИНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СИГНАЛЫ НУТАЦИИ И ПРЕЦЕССИИ ЯДЕР $^{55}\text{Mn}$ В МАНГАНИТАХ С РАССЛОЕНИЕМ МАГНИТНЫХ ФАЗ

Колесенко В.М., Русецкий Г.А.

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. П. Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь

*koles@physics.by*

Интерес к легированным манганитам  $\text{Ln}_{1-x}\text{M}_x\text{MnO}_3$ , где Ln – трехвалентный катион из группы лантаноидов, а M – двухвалентный щелочноземельный металл, например, Ca, Ba или Sr, связан с их интригующими магнитными и электронными свойствами. Благодаря сильной конкуренции между двойными обменными, сверхобменными взаимодействиями ионов  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  и электрон-фононными взаимодействиями (эффект Яна-Теллера в Mn) в манганитах могут возникать ферромагнитная изолирующая и металлическая фазы. В работах [1, 2] были обнаружены линии ЯМР  $^{55}\text{Mn}$  от локализованных ионов  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ , которые соответствуют ферромагнитной изолирующей фазе, и обменная линия  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ , связанная с ферромагнитной металлической фазой (ФМФ). Кроме того, было установлено, что в областях с разными локальными характеристиками в большом температурном интервале наблюдается дополнительная фазовая сепарация ФМФ. В частности, эта сепарация наблюдалась в эксперименте по двухимпульсному спиновому эхо и проявилась в виде двух линий в спектре ЯМР с частотами 365 и 373,9 МГц [3]. Такое расслоение фазы может объясняться изменением величины сверхтонкого взаимодействия и подвижности заряда в соответствующих областях ФМФ.

Спектр ЯМР можно также получить с помощью сигналов одноимпульсного эха (ОЭ), которые генерируются в сигнале свободной прецессии (ССП) после воздействия одного радиочастотного (РЧ) импульса [4, 5]. Более того, ОЭ позволяет разделить во времени сигналы от двух неоднородно уширенных ядерных подсистем [6]. При наличии сепарации ФМФ в манганитах сигналы ОЭ от двух ядерных подсистем также будут разделяться. В настоящее время свойства сигналов ОЭ, генерирующихся в неоднородно уширенных ядерных двухуровневых системах, хорошо изучены [7]. Однако, особенности сигналов ОЭ при наличии спин-спинового взаимодействия между этими подсистемами пока не выяснены.

Поведение СПП и сигнала ОЭ в значительной степени определяется динамикой предшествующего им сигнала нутации. Следовательно, для лучшего понимания изменения поведения СПП и ОЭ, к которым приводит спин-спиновое взаимодействие, необходимо детально изучить влияние этого взаимодействия на сигнал нутации. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

В рамках изинговского взаимодействия опишем две неоднородно уширенные двухуровневые ядерные подсистемы с центральными частотами переходов  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$  ( $\omega_{01} < \omega_{02}$ ), которые возбуждаются импульсным переменным электромагнитным полем несущей частоты  $\omega$ . Тогда в представлении эффективного спина гамильтониан задачи имеет вид:

$$\hat{H} = \hat{H}_1 + \hat{H}_2 + \hat{H}_{12},$$

$$\hat{H}_j = \omega_{0j} \hat{S}_j + \frac{\eta_j \omega_1}{2} (\hat{S}_{+j} e^{-i\omega t} + \hat{S}_{-j} e^{i\omega t}) \quad (j=1, 2), \quad \hat{H}_{12} = k(\hat{S}_{z1} \cdot \hat{S}_{z2}),$$

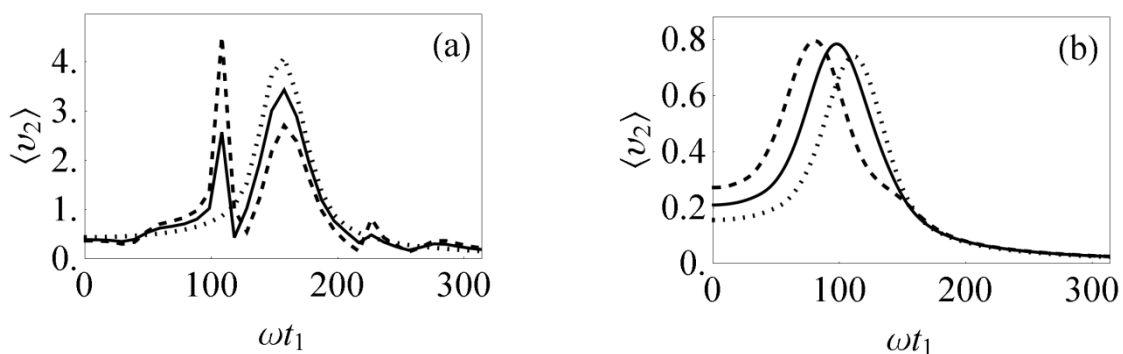
где  $\omega_1 = \gamma B_1$  — частота Раби;  $\gamma$  — гиромагнитное отношение;  $B_1$  — амплитуда РЧ импульса;  $\eta_{1,2}$  - коэффициенты усиления РЧ поля на ядрах в областях ФМФ;  $k$  – коэффициент, характеризующий величину изинговского взаимодействия;  $\hat{H}_1$ ,  $\hat{H}_2$ ,  $\hat{H}_{12}$  - гамильтонианы первой, второй ядерных подсистем, соответственно, и гамильтониан,

описывающий взаимодействие этих подсистем;  $\hat{S}_{zj}$ ,  $\hat{S}^+_{j}$ ,  $\hat{S}^-_{j}$   $j=1, 2$  - операторы эффективного спина.

Рассмотрим поведение сигнала нутации и ССП для каждой из подсистем, пусть 1-ая подсистема возбуждается РЧ импульсом резонансно, а 2-ая подсистема, соответственно, нерезонансно. Когда коэффициент взаимодействия равен нулю суммарный отклик от двух подсистем будет такой, как если бы каждая подсистема возбуждалась РЧ импульсом независимо от другой подсистемы. Поэтому сигнал нутации двухкомпонентной системы на начальном этапе будет суперпозицией колебаний 1-ой и 2-ой подсистем, а на последнем этапе, после затухания сигнала нутации от 2-ой подсистемы, будет представлять собой сигнал нутации от 1-ой подсистемы. Поскольку при резонансном возбуждении неоднородно уширенной двухуровневой системы осцилляции Раби практически не затухают [7], то спектр нутации будет состоять из узкой линии (на частоте Раби) от 1-ой подсистемы и широкой линии (на обобщённой частоте Раби  $(\omega_1^2 + \delta_2^2)^{1/2}$ ) от 2-ой подсистемы. Также при резонансном возбуждении неоднородно уширенной среды сигнал ОЭ в ССП не возникает, поэтому вклад в эхо отклик двухкомпонентной системы вносит только та компонента, которая находится вне резонанса с возбуждающим полем [7].

С ростом силы связи амплитуда спектра нутации от 1-ой подсистемы незначительно уменьшается, при этом в спектре сигнала нутации 2-ой компоненты начинает проявляться узкая линия на частоте Раби (рис. 1а), а во временном поведении этого сигнала после быстро затухающих осцилляций на начальном этапе появляются практически незатухающие колебания на конце сигнала. Незатухающие колебания являются вынужденными и обусловлены влиянием 1-ой подсистемы. Они повторяют колебания 1-ой подсистемы и поэтому не приводят к формированию дополнительного эхо отклика в ССП. При дальнейшем увеличении коэффициента взаимодействия в спектре сигнала нутации 2-ой подсистемы появляется гармоника на удвоенной частоте Раби, связанная с нелинейностью взаимодействия, которая проявляется во временном сигнале нутации в виде ангармонических осцилляций.

Аналитические расчеты показывают, что энергия спин-спинового взаимодействия на интервале свободной эволюции остаётся постоянной. С точки зрения математики это приводит к тому, что уравнения спиновой динамики со спин-спиновым взаимодействием, с точностью до переопределения констант, совпадают с аналогичными уравнениями без взаимодействия, которые подробно исследовались ранее [5,6,7]. Это позволяет, например, по изменению спектра сигнала ОЭ сказать, как изменится момент его формирования. Так, на рис.1с видно, что спектр ОЭ с ростом коэффициента взаимодействия смещается в область низких частот. Это можно трактовать как эффективное уменьшение отстройки от резонанса за счет возрастания силы связи между подсистемами, поскольку было показано, что частота сигнала ОЭ пропорциональна отстройке РЧ импульса от резонанса. Уменьшение отстройки от резонанса в системах без спин-спинового взаимодействия приводит смещению момента формирования сигнала ОЭ в область меньших времён, поэтому можно ожидать, что и эффективное изменение отстройки приведёт к аналогичным результатам. Это предположение подтверждается численным расчётом.



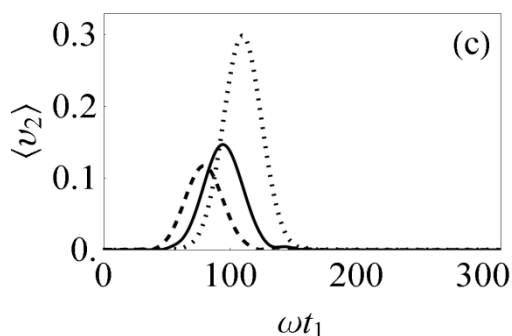


Рисунок 1 - Поведение спектров сигнала нутации (а), затухания свободной прецессии (b), сигнала одноимпульсного спинового эха (с) ядерной подсистемы 2-ой компоненты ФМФ в манганите при  $kt_1\nu_0 = 0$  (пунктирная линия),  $kt_1\nu_0 = 5$  (сплошная линия),  $kt_1\nu_0 = 10$  (штриховая линия) и  $\omega_1\eta_{1,2} = 35\pi$ ;  $\delta_1 t_1 = 0$ ;  $\delta_2 t_1 = 113$ ;  $\sigma t_1 = 15$ ; где  $\sigma$  - полуширина неоднородного уширения ядерных подсистем.

Таким образом, в манганитах с увеличением взаимодействия между ядерными подсистемами двух компонент ферромагнитной металлической фазы, при резонансном возбуждении радиочастотным импульсом одной из подсистем (первой) первая подсистема вызывает вынужденные колебания в сигнале нутации во второй подсистеме, которые вследствие нелинейности взаимодействия являются ангармоническими. В сигнале свободной прецессии при возрастании величины спин-спинового взаимодействия между ядерными подсистемами частота сигнала одноимпульсного эха снижается, вследствие эффективного уменьшения отстройки от резонанса за счет возрастания силы связи.

*Авторы выражают благодарность за ценные советы при подготовке работы А.П. Сайко и Г.Г. Федоруку.*

#### Литература

- [1] G.J. Tomka, P.C. Riedi, Cz. Kapusta et al. J. Appl. Phys. 83, 7151 (1998).
- [2] М.М. Савоста, В.Д. Дорошев, В.И. Каменев и др. ЖЭТФ 124, 633 (2003).
- [3] А.С. Мазур. ФТТ 54, 2089 (2012).
- [4] G. Mamniashvili, T. Gegechkori, A. Akhalkatsi, T. Gavasheli. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 28, 911 (2015).
- [5] В.С. Кузьмин, В.М. Колесенко. ЖПС 79, 411 (2012).
- [6] В.С. Кузьмин, В.М. Колесенко. ЖПС 68, 367 (2001).
- [7] В.С.Кузьмин, И.З. Рутковский, А.П. Сайко, А.Д. Тарасевич, Г.Г. Федорук. ЖЭТФ 97, 880 (1990).