

Краткое сообщение

**ФАЗА БЕРРИ В ЯКР ПРИ  
НЕРЕЗОНАНСНОМ РАДИОЧАСТОТНОМ  
ВОЗБУЖДЕНИИ**

Синявский Н.Я.

*Балтийская государственная академия  
рыбопромышленного флота  
Калининград, Россия*

При адиабатической эволюции спиновой системы по замкнутой траектории в параметрическом пространстве гамильтониана вектор состояния, наряду с обычной динамической фазой, получает дополнительную геометрическую фазу или фазу Берри [1]. При механическом вращении образца наличие фазы Берри для различных собственных состояний и изменение фазы со временем проявляется в эксперименте в форме изменения частоты, то есть вращательного расщепления и уширения линии ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) [2]. Топологическая фаза в системе с двумя уровнями для ядерного магнитного резонанса при воздействии  $2\pi$  – импульса с частотой не равной резонансной с помощью эха Хана впервые наблюдалась в работе [3].

В настоящей работе геометрическая фаза впервые исследована в ЯКР для случая спинов  $I=1$  и  $3/2$  при адиабатическом вращении ядерной намагниченности посредством многоимпульсных последовательностей р.ч. импульсов с несущей частотой, сдвинутой относительно резонанса. Экспериментальное наблюдение проявления геометрической фазы в ЯКР – спектре без использования макроскопического вращения образца выполнено также в этой работе впервые.

При возбуждении ЯКР сильным р.ч. полем, теоретическое описание спиновой системы проводилось в представлении взаимодействия, где спиновый гамильтониан эффективно не зависит от времени. Фаза Берри рассчитывалась как

$$\beta_n = i \int_0^T \langle \psi_n | \frac{d}{dt} | \psi_n \rangle dt$$

, где  $\psi_n$  – вектор состояния,  $\tau$  – длительность р.ч. импульса.

ЯКР – измерения на ядрах  $^{35}\text{Cl}$  и  $^{14}\text{N}$  были выполнены на импульсном ЯКР – спектрометре с Фурье-преобразованием (0.5-300 МГц). Использовались порошкообразные образцы  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{CCl}_3\text{CH}(\text{OH})_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2$  (ядра  $^{35}\text{Cl}$ ) и  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$  (ядра  $^{14}\text{N}$ ). В экспериментах использовались нерезонансная многоимпульсная последовательность Карра-Парцелла и последовательность сильных нерезонансных импуль-

сов SORS с разными расстройками частоты от резонанса. Длительности  $\pi/2$  – импульсов для ядер  $^{35}\text{Cl}$  были равны от 6 мкс до 15 мкс, а для ядер  $^{14}\text{N}$  – от 1,5 мкс до 7,5 мкс. Для регистрации накапливаемой в течение р.ч. импульса с расстройкой  $\Delta\nu \neq 0$  геометрической фазы, в окнах последовательностей измерялся сигнал эха (или сигнал свободной индукции). Установлено, это эксперимент с многоимпульсными последовательностями для регистрации проявления фазы Берри очень чувствителен к ошибкам в длительностях  $90^\circ$  - и  $180^\circ$  – ных импульсов и в величине расстройки частоты.

Эксперименты показывают, что вращение ядерной намагниченности при помощи повторяющихся радиочастотных импульсов с несущей частотой, не равной резонансной частоте, эквивалентны быстрому механическому вращению образца [4] и также приводят к расщеплению и уширению линии ЯКР. При изменении расщепления линии при этом следует принимать во внимание множитель шкалы  $t_w/\tau$  и сужение линии ЯКР под действием многоимпульсной последовательности.

Получение структурной информации при помощи квадрупольных ядер в твердых телах может быть выполнено посредством регистрации положения частотных сингулярностей формы линии ЯКР, обусловленных проявлением геометрической фазы при движении ядерной намагниченности вдоль замкнутой траектории в спиновом пространстве. Потеря когерентности сигнала вследствие произвольного накопления фаз Берри, вызванного различными факторами, может рассматриваться как новый механизм релаксации, который следует учитывать в ЯМР и ЯКР экспериментах.

*Работа выполнена по гранту РФФИ № 08-03-00433.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Berry M. V. // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1984. V. 392. P. 45.
2. Tycko R. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. № 22. P. 2281.
3. Лисин В.Н., Федорук Г.Г., Хаймович Е.П. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. № 4. С. 205.
4. Sinyavsky N., Mackowiak M. and Schmidt C. // Z. Naturforsch. 2008. V. 63a. P. 81.