

УДК 53.043:53.09:538.9

*А.И.ПОЛЯКОВ, М.И.БИТЕНБАЕВ*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЛЕПОРТАЦИИ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ В СПИНОВЫХ СТРУКТУРАХ

(Представлена академиком НАН РК Б.Н.Мукашевым)

Получено аналитическое выражение для описания процесса телепортации квантовых состояний по цепочке из спиновых нанокластеров. Методами магнитного резонанса определены оптимальные параметры этого процесса.

Понятие телепортации квантовых состояний в последние годы активно используется при обосновании возможности использованияnanoструктур с преобладающим спин-спиновым взаимодействием в элементах спиновой электроники (спин-троники) [1-4]. Указанная возможность вытекает из наличия в гамильтониане дипольного спин-спинового взаимодействия членов, ответственных за процесс взаимной переориентации спинов, которые могут относиться к различным, разнесенным в пространстве, спиновым нанокластерам [5]. Отметим, что обязательным условием процесса переноса (телепортации) квантовых состояний здесь является наличие межкластерного спин-спинового взаимодействия (наряду с традиционным взаимодействием спинов между собой внутри каждого индивидуального спинового кластера).

Таким образом, если в какой-то момент времени перевести один из спиновых кластеров в неравновесное состояние, например, путем локализации внешних резонансных воздействий, то неравновесные квантовые состояния за счет flip-flop переходов между зеемановскими уровнями будут передаваться спинам соседних кластеров [5], т.е. рассеиваться по всей спин-системе (решетке). Однако если спиновые нанокластеры связаны дипольным спин-спиновым взаимодействием в специальные структуры – так называемые спиновые квантовые нити, то перенос неравновесных спиновых состояний будет протекать вдоль этих нитей, т.е. иметь определенную направленность в пространстве. Именно для такого процесса переноса неравновесных спиновых состояний по цепочке из спиновых нанокластеров используется условное понятие телепортации квантовых состояний.

Цель настоящего сообщения - аналитически описать процесс переноса неравновесной поляризации

спинов и определить условия регистрации этого процесса.

Расчеты проводились для спиновой системы, представляющей собой несколько обособленных структурных конфигураций (нанокластеров), в которой каждый нанокластер содержит однотипные атомы с магнитным моментом (спином), равным  $\frac{1}{2}$ . Если такую спин-систему поместить в постоянное магнитное поле  $H_0$ , то за счет зеемановского взаимодействия произойдет расщепление магнитного уровня на два подуровня. Разумеется, что при этом каждый подуровень может иметь "тонкую" структуру (рис.1а), которая формируется за счет локальных внутрикристаллических магнитных полей.

Примем, что в каждом нанокластере между спинами имеет место как коррелированное спин-спиновое взаимодействие, за счет которого в кластерах образуются однотипные квантовые состояния, так и спин-решеточное взаимодействие, определяющее время существования (релаксации) неравновесных квантовых состояний. А межкластерные спин-спиновые взаимодействия осуществляются по уже упомянутому выше flip-flop механизму. В нашем случае именно это межкластерное взаимодействие спинов будет определять как вероятность переноса неравновесной поляризации спинов от одного спинового кластера к другому, так и в целом динамику процесса переноса квантовых состояний вдоль цепочки из нескольких спиновых нанокластеров.

Основные этапы процесса телепортации квантовых состояний между спиновыми нанокластерами для такой многокластерной системы будут состоять в следующем. Внешним избирательным резонансным воздействием (например, импульсом резонансного ВЧ поля) спины кластера  $S_1$  переводятся в неравновесное состояние, а спины  $S_2$ ,  $S_3$ - и  $S_n$ -кластеров в это время по-

прежнему находятся в стационарном состоянии. Амплитуда и длительность импульса подбираются таким образом, чтобы в момент выключения импульса, т.е. при  $t=0$ , разность населенностей между верхним и нижним квантовыми уровнями имела нулевое значение. Тогда при  $t>0$  (т.е. сразу после окончания действия ВЧ импульса) разность населенностей подсистемы спинов в кластере  $S_1$  начнет возвращаться со временем релаксации  $T_1$  к своему стационарному значению в соответствии с соотношением Больцмана. При этом количество квантовых переходов с верхнего уровня  $E_1$  на нижний  $E_2$  будет заметно больше переходов снизу вверх (рис. 1a). В свою очередь, межкластерные спин-спиновые взаимодействия между спинами  $S_1$ - и  $S_2$ -нанокластеров по flip-flop механизму, приведут к увеличению количества спиновых переходов с нижнего квантового уровня на верхний в  $S_2$ -нанокластере, т.е. будет происходить передача неравновесной спиновой поляризации от  $S_1$ -кластера к спинам  $S_2$ -кластера (рис.1a).

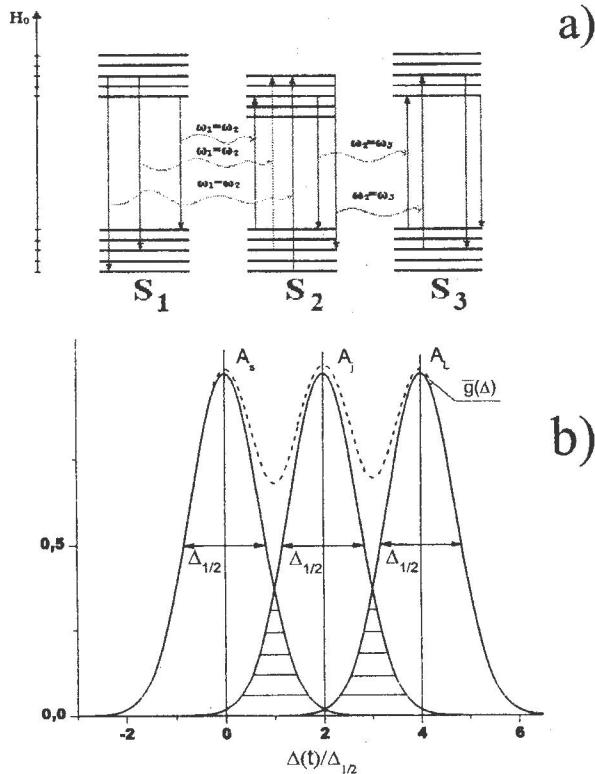


Рис.1. Схема внутрикластерных и межкластерных квантовых переходов между уровнями зеемановского расщепления (а) и формы спектров магнитного резонанса  $g(\Delta)$  (б) в модельной спинсистеме

Разумеется, по этой же схеме будет происходить дальнейшая транспортировка неравновесной спиновой поляризации соседним кластерам в цепочке  $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow \dots \rightarrow S_n$ .

Записав систему уравнений для описания изменений во времени населённостей зеемановских уровней каждого  $n$ -го нанокластера цепочки, аналогично случаю двухкластерной спиновой системы, рассмотренной нами в [6], и решив её, получим:

$$\frac{N_n(t)}{N_n^0} = 1 + \frac{N_1^0}{N_n^0} \frac{(t/\tau)^{n-1}}{(n-1)!} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right), \quad (1)$$

где,

$N_n^0$  и  $N_n(t)$  - соответственно, равновесные и мгновенные (в произвольный момент времени  $t > 0$ ) значения разности населённостей зеемановских уровней в  $S_n$ -нано-кластере;

$\tau$  - характеристическое время телепортации квантовых состояний между двумя соседними нанокластерами;

$T_1$  - время спин-решёточной релаксации спинов в нанокластерах, которое одинаково в однотипных спиновых системах.

Изменяя в уравнении (1) значение  $n$ , легко получить выражение для описания процесса телепортации квантовых состояний при любом количестве кластеров, составляющих конкретную квантовую спиновую «нить». При этом интенсивность эффекта телепортации по мере увеличения длины спиновых цепочек монотонно спадает (см. рис.2) за счет нарушения когерентности межкластерных спин-спиновых взаимодействий, связанных с влиянием спин-решеточных взаимодействий.

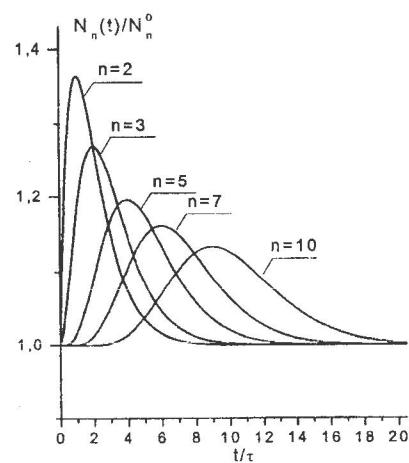


Рис.2. Зависимость изменения населённостей зеемановских уровней от отношения  $t/\tau$  при различной длине квантовых нитей

Из уравнения (1) также следует, что эффект телепортации спиновой поляризации возрастает по мере уменьшения соотношения  $\tau/T_1$ , и пропорционален увеличению отношения  $N_1^0/N_n^0$ . Следовательно, в практическом плане, для получения надёжной телепортации неравновесной поляризации между спиновыми нанокластерами необходимо, чтобы время телепортации  $\tau$  и концентрация спинов в "передающем" и "принимающем" нанокластерах удовлетворяли условию:

$$\tau \ll T_1, N_1^0 > N_2^0 > N_3^0 > \dots N_n^0 \quad (2)$$

Эксперимент по отработке методики определения характеристик процесса телепортации квантовых состояний был выполнен методом ЯМР на образцах гипофосфита натрия  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Данное химическое соединение содержит две спиновые подсистемы. Одна подсистема - это группа протонов, входящих в состав молекулы гипофосфита, а вторая - группа протонов адсорбированных молекул воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ), которые обычно связаны водородными связями с атомами кислорода в  $\text{PO}_2$ .

Спектр ядерного магнитного резонанса  $\text{H}^1$  в образце гипофосфита натрия содержит три резонансных линии: в центре спектра расположена интенсивная линия протонов  $\text{H}_2\text{O}$  и две более слабые, симметрично отстоящие от нее на расстоянии 257.5 Гц, линии протонов гипофосфита (рис. 3). Дуплет протонов гипофосфита обусловлен расщеплением зеемановских уровней за счет их спин-спинового взаимодействия с фосфором с константой расщепления 515.0 Гц.

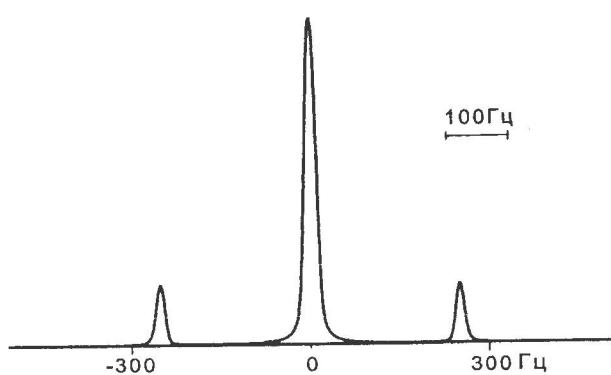


Рис.3. Спектр ЯМР  $\text{H}^1$  в молекуле гипофосфита натрия

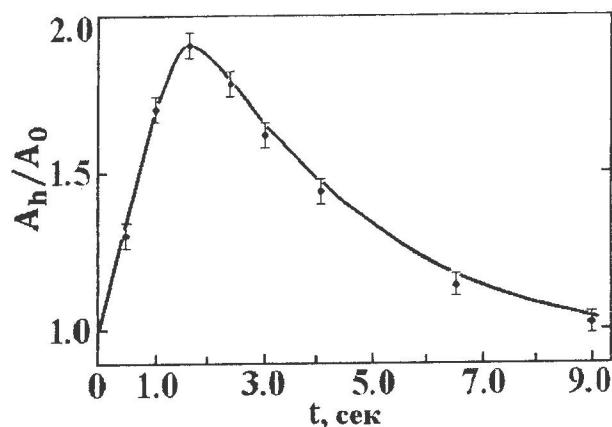


Рис.4. Изменение амплитуды линий ЯМР протонов гипофосфита, обусловленное переносом неравновесных спиновых состояний (точки - эксперимент, сплошная линия - расчет по уравнению (3) при  $n = 2$ )

Спин-система протонов адсорбированной воды приводилась в неравновесное состояние импульсом резонансного ВЧ-поля, а затем, через определенные промежутки времени, замерялись интенсивности спектра явных линий протонов  $\text{H}_2\text{O}$  и гипофосфита. Результаты эксперимента и их сопоставление с данными расчетов позволяют оценить параметры процесса телепортации неравновесной спиновой поляризации (рис.4).

В случае с гипофосфитом хорошее совпадение (в пределах ошибок эксперимента) экспериментальных и расчётных зависимостей получено при следующих релаксационных и концентрационных соотношениях в спиновых нанокластерах:

$$N_1^0/N_2^0 = 2.0; \tau = 0.4 \text{ сек.}, T_1 = 1.7 \text{ сек.}$$

Из рис. 4 также видно, что при временах  $t < 0.5T_1$  эффект телепортации неравновесных спиновых состояний линейно возрастает, достигая максимального значения при  $t = T_1$ , а затем по экспоненте уменьшается, стремясь к своему стационарному состоянию  $N_2(t) = N_2^0$ .

Таким образом, предлагаемый нами подход позволяет:

- проследить за динамикой телепортации неравновесной спиновой поляризации от одного кластера к другому;

- определить релаксационные характеристики

ки спиновых нанокластеров, участвующих в процессах телепортации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nielsen M.A. et.al. Complete quantum teleportation using nuclear magnetic // Nature. 1998. V.396. P. 52-55.
2. Zutic J., Fabian Ja., Sarma S.D. Spintronics: Fundamentals and application-ns // Rev. Mod. Phys. 2004. V.76. P. 323.
3. Огнев А.В., Самардак А.С. Спинtronика: физические принципы, устройства, перспективы // Вестник ДВО РАН. 2006. №4. С.70-80.
4. Кусраев Ю.Г. Спин-зависимые явления вnanoструктурах и спинtronика // Intern. Winter School "Physics of semiconductors". С.-Петербург, 2006.
5. Абрагам А., Гольдман М. Ядерный магнетизм – порядок, беспорядок. М.: Мир, 1984. 300с.

6. Polyakov A.I., Bitenbayev M.I. NMR study of transport of nuclear spin polarization in sodium hypophosphite  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  // Solid State Sciences. 2009. V.11. P. 945-947.

#### Резюме

Спиндік нанокластерлерден тізбектелу бойынша кванттық күйлердің телепортация үрдісін сипаттауға арналған аналитикалық өрнек алынды. Магниттік резонанс әдісімен бұл үрдістің онтайлы параметрлері аныкталды.

#### Summary

Analytic expression for the process description of quantum state teleportation in a spin nanocluster chain is deduced. Optimum parameters of this process are determined by magnetic resonance method.

TOO "Физико-технический институт"  
г. Алматы

Поступила 12.08.09