

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ
имени П.Л.КАПИЦЫ**

на правах рукописи

ТИХОНОВ
Алексей Михайлович

**ЯМР НА ^{55}Mn В КВАЗИОДНОМЕРНЫХ
НЕКОЛЛИНЕАРНЫХ
АНТИФЕРРОМАГНЕТИКАХ**

Специальность 01.04.09 - физика низких температур и
криогенная техника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 1998

Работа выполнена в Институте физических проблем имени
П.Л.Капицы РАН.

Научный руководитель:

академик, доктор физико-математических наук, профессор
А.С.Боровик-Романов

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук
В.В.Дмитриев,

доктор физико-математических наук, профессор В.А.Тулин.

Ведущая организация:

Институт молекулярной физики РНЦ "Курчатовский институт".

Защита состоится: «24» _____ июня _____ 1998 года в _____ 10-00 часов
на заседании Специализированного Ученого совета Д 003.04.01 при
Институте физических проблем РАН им. П.Л.Капицы, 117334, Москва,
ул. Косыгина 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физи-
ческих проблем РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 1998 года.

Ученый секретарь Совета,

доктор физико-математических наук, профессор

Л.А.Прозорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние 20-30 лет физика конденсированного состояния интенсивно изучала особенности двумерных и одномерных систем взаимодействующих частиц. Оказалось, что подобные низкоразмерные системы, в частности, образуют магнитные ионы в некоторых кристаллах, в которых обменное взаимодействие между спинами соседних ионов сильно отличается вдоль различных кристаллографических направлений. Исследование основного состояния таких магнетиков вызывает большой интерес, так как согласно хорошо известной теореме Мермина - Вагнера [1] строго одномерных (1D) или двумерных (2D) анти- или ферромагнетиков в изотропной гейзенберговской модели при $T \neq 0$ не существует.

Особенности кристаллических решеток некоторых двойных солей ABX_3 (A - щелочной металл, B - металл $3d$ группы, X - галоген) обеспечивают низкую размерность обменных структур, образованных ионами B^{2+} . Данная диссертация посвящена изучению ЯМР на ядрах ^{55}Mn в неколлинеарных квазиодномерных гейзенберговских антиферромагнетиках (АФ) с анизотропией типа "легкая плоскость" (ЛП) CsMnBr_3 и RbMnBr_3 и с анизотропией типа "легкая ось" (ЛО) CsMnI_3 . В этих веществах магнитоупорядоченное состояние с нетривиальной структурой возникает при $T_N \approx 10$ К. Так как обменное взаимодействие вдоль кристаллической оси высокого порядка C_6 в несколько сот раз больше чем в базисной плоскости, то магнитная структура этих веществ представляет собой совокупность антиферромагнитных цепочек относительно слабо взаимодействующих между собой.

Согласно данным нейтронографии [2-4] в отсутствие поля в данных магнетиках реализуется плоская треугольная "120-градусная структура": все спины компланарны и ориентированы таким образом, что угол между соседями в базисной плоскости кристалла близок к 120° , а соседние спины вдоль гексагональной оси антипараллельны. Поле анизотропии ориентирует спиновую плоскость относительно осей кристалла. Выбор исследуемых нами веществ не случаен. Дело в том, что магнитный $3d$ -ион Mn^{2+} находится в чисто спиновом состоянии $^6S_{5/2}$ и все эффекты, связанные с неполным вымораживанием орбитального момента, с хорошей точностью отсутствуют.

Магнетикам с "треугольным" типом упорядочения в последние годы уделялось большое внимание. Так, например, в обзоре [5] упоминается более 300 работ. Однако ряд важных вопросов остался невыясненным. Мы надеемся прояснить следующие из них:

1. *Редукция спинов и ее подавление магнитным полем.* Одна из основных задач - определение редукции спина иона Mn^{2+} в квазиодномерной спиновой решетке CsMnBr_3 , RbMnBr_3 и CsMnI_3 при $T \rightarrow 0$. Как было показано Андерсоном [6,7], для основного состояния гейзенберговского 3D антиферромагнетика характерно наличие сильных "нулевых колебаний" - квантовых флуктуаций в спиновой решетке, приводящих, в частности, к уменьшению (редукции) средних спинов магнитных ионов $\langle S \rangle$ по отношению к номиналу S ($S > \langle S \rangle$). В квазиодномерном антиферромагнетике этот эффект должен быть больше, так как в одномерном пределе упорядоченное состояние в АФ цепочке отсутствует [8] и при $T = 0$. Вследствие большой величины редукции спинов в квазиодномерных АФ CsMnBr_3 , RbMnBr_3 и CsMnI_3 , появилась возможность

наблюдать некоторые тонкие эффекты, например подавление квантовых спиновых флуктуаций (соответственно, уменьшения редукиции) внешним магнитным полем. Этому вопросу посвящено несколько вышедших в последнее время теоретических работ [9-13]. Механизмом подавления квантовых флуктуаций удалось объяснить некоторые особенности полевых зависимостей намагниченности в этих веществах, а именно: слабую нелинейность роста продольной компоненты намагниченности в магнитных полях перпендикулярных спиновой плоскости и анизотропию намагниченности выше переориентационного фазового перехода. Был рассчитан связанный с подавлением квантовых флуктуаций рост среднего спина магнитных ионов, оказавшийся вполне заметным уже в полях $H < 0.1H_E$ [9,10]. Однако прямые измерения $\langle S \rangle (H)$ до нашей работы отсутствовали. Большая точность, с которой можно измерять сверхтонкие поля H_{hf} ($H_{hf} = -A_0 \langle S \rangle / \hbar \gamma_n$, A_0 - константа сверхтонкого взаимодействия, \hbar - постоянная Планка, $\gamma_n / 2\pi = 1.06$ МГц/кЭ - гиромагнитное отношение для ^{55}Mn), делает метод ЯМР на ядрах магнитных ионов надежным способом изучения полевой зависимости среднего спина.

2. Уточнение магнитных структур. Неколлинеарная магнитная структура АФ CsMnBr_3 , RbMnBr_3 и CsMnI_3 , а также конкуренция между полем кристаллической анизотропии и междоузельным обменным взаимодействием порождают интересные трансформации в спиновых решетках этих магнетиков при приложении магнитного поля. ЯМР на ядрах ^{55}Mn является мощным методом изучения этих переориентационных явлений, так как спектр ЯМР очень чувствителен к симметрии

упорядочения магнетика. Так по полевому расщеплению спектра ЯМР можно определить углы между магнитным полем и направлениями спинов, то есть получить важную микроскопическую информацию о строении магнетика. В частности, CsMnBr_3 является легкоплоскостным антиферромагнетиком с правильной треугольной магнитной решеткой. При приложении внешнего магнитного поля в любом направлении в легкой плоскости, спектр ЯМР должен расщепляться на три ветви. Увеличение напряженности поля делает треугольную магнитную решетку неустойчивой к частичному схлопыванию подрешеток с переходом в коллинеарную структуру. Изучая зависимость резонансных частот ветвей ЯМР от величины приложенного поля, можно проследить за процессом перехода треугольной антиферромагнитной структуры в коллинеарную и сравнить с существующими расчетами в рамках подхода среднего поля [14]. В ЛЮ АФ CsMnI_3 важно исследовать область переориентационного фазового перехода в магнитном поле, который согласно разным экспериментальным данным сочетает черты фазового перехода I рода (спин-флоп переход) и фазового перехода II рода.

3. Динамический сдвиг частоты ЯМР. Особенность резонансных свойств антиферромагнетиков с магнитными ионами Mn^{2+} при температуре ~ 1 К связана с сильной корреляцией колебаний ядер с колебаниями электронной системы, приводящей к сильной деформации спектра ядерного резонанса [15] (пуллинг или ДСЧ ЯМР). Поэтому третьей нашей задачей явилось изучение ДСЧ ЯМР в многоподрешеточных АФ. В антиферромагнетиках с линейной по полю модой АФМР пересечение "электронных" частот с ядерными происходит в поле примерно 0.2 кЭ. ДСЧ ЯМР прекращается в поле около 5 кЭ. В ЛП АФ CsMnBr_3

низкочастотная ветвь АФМР ($\omega_{e0} \propto H^3$) пересекает ядерные частоты ($\omega_n \propto H_{Hf}$) приблизительно в поле 10 кЭ, поэтому взаимодействие электронных и ядерных колебаний происходит в более значительном интервале магнитных полей. Изучить и описать искаженный спектр ЯМР, его температурную зависимость, а также сравнить результаты с данными АФМР, представляет интерес для теории динамики неколлинеарных спиновых структур.

Научная новизна

В настоящей диссертационной работе впервые изучен спектр ЯМР в легкоплоскостном и легкоосном антиферромагнетиках с "треугольной" магнитной структурой и исследованы спиновые переориентационные переходы в этих неколлинеарных структурах в области низких температур. Уточнены данные по редукции спинов Mn^{2+} в квази-1D АФ $CsMnBr_3$, $RbMnBr_3$, $CsMnI_3$ в нулевом магнитном поле. Впервые получены результаты по полевой зависимости средних спинов магнитных ионов в этих квазиодномерных АФ. Они демонстрируют подавление квантовых спиновых флуктуаций магнитным полем. Проведено сравнение с теоретическими расчетами. Обнаружено новое явление - анизотропия редукции спинов Mn^{2+} в легкоосном "треугольном" АФ в нулевом магнитном поле ($T \rightarrow 0$).

Показано, что в легкоплоскостном АФ $CsMnBr_3$ спектр ЯМР расщепляется на три ветви и наглядно продемонстрирован процесс разрушения неколлинеарной "треугольной" спиновой решетки магнитным полем при переходе в квазиколлинеарную структуру. В легкоосном АФ $CsMnI_3$ обнаружено шесть ветвей ЯМР, соответствующих шести спинам в элементарной магнитной ячейке. При исследовании спин-флор перехода в этом АФ обнаружен новый спиновый переориентационный фазовый переход.

В $CsMnBr_3$ и $CsMnI_3$ обнаружен сильный динамический сдвиг частот ЯМР, из-за взаимодействия с низкочастотными модами АФМР. Произведен расчет совместных электронно-ядерных колебаний в $CsMnBr_3$ на основе лагранжевого формализма макроскопической динамики магнетиков [16].

Апробация работы

Результаты, изложенные в диссертации, были доложены автором на:

1. XV Всероссийской школе-семинаре Новые Магнитные Материалы Микроэлектроники, Москва, 1996.
2. Семинар по спиновым волнам, Санкт-Петербург, 1996.
3. Зимней школе-семинаре, "Коуровка'98", Кыштым, 1998.
4. Семинарах в Институте физических проблем РАН в Москве.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, шести глав и Заключения. Общий объем работы составляет 114 страниц и включает в себя основной текст, 62 рисунка и список литературы из 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ рассмотрена актуальность темы, сформулированы основные задачи исследования, проведено краткое содержание работы по главам.

ГЛАВА 1 - обзорная. Она посвящена описанию кристаллографических и магнитных свойств гексагональных АФ $CsMnBr_3$, $RbMnBr_3$ и $CsMnI_3$.

Сделан краткий обзор работ по дифракции нейтронов, исследованию резонансных и статических свойств по каждому магнетику отдельно. В частности, описан процесс разрушения не коллинеарной спиновой решетки CsMnBr₃ в магнитном поле в рамках теории среднего поля. Описаны *H-T* фазовые диаграммы этих неколлинеарных антиферромагнетиков.

В ГЛАВЕ 2 рассмотрена проблема основного состояния АФ и связанный с этим вопрос о редукции спина в антиферромагнетиках из-за квантовых флуктуаций («нулевых колебаний»). Сделан обзор литературы по теоретическому исследованию основного состояния гексагональных квазиодномерных АФ.

В ГЛАВЕ 3 перечислены основные особенности наблюдения ЯМР в антиферромагнетиках с сильным сверхтонким взаимодействием, рассмотрен Динамический сдвиг частоты (ДСЧ) ЯМР в одноосном двухподрешеточном АФ. Приведен подробный расчет спектра ЯМР с учетом ДСЧ в неколлинеарном АФ CsMnBr₃ на основе лагранжевого формализма, разработанного для магнетиков А.Ф.Андреевым и В.И.Марченко [16]. Пренебрегая членами квадратичными по отношению H/H_{hf} , спектр совместных электронно-ядерных колебания в CsMnBr₃ ($\mathbf{H} \perp C_6$) имеет вид:

$$\omega^2 - \omega_{e0}^2 = \frac{1}{3} \omega_T^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_{ni0}^2}, \quad (1)$$

где ω_T - частота связи или температурно-зависящая щель в голдстоуновской моде АФМР $\omega_{e0} \propto H^3$ [14]. ω_{ni0} - несмещенный спектр ЯМР ($\omega_{ni0} = \gamma_n |(\mathbf{H}_{hf})_i + \mathbf{H}|$), где i - индекс ориентации спина иона Mn²⁺ к приложенному полю пробегает значения от 1 до 3.

В этой главе также обсуждается вид спектра ЯМР в CsMnI₃ с учетом динамического взаимодействия в различных геометриях эксперимента. В ГЛАВЕ 4 описывается принцип работы широкополосного спектрометра непрерывного действия дециметрового диапазона длин волн с высокодобротным резонатором. Этот спектрометр был специально сконструирован для изучения ядерного резонанса в сильных магнитных полях в условиях малого усиления ЯМР (как правило, в магнитоупорядоченных веществах интенсивность ЯМР $I \sim H^{-2}$). Представлена блок-схема спектрометр ЯМР, конструкция высокодобротного рабочего контура и принципиальная электронная схема системы автоподстройки частоты с кратким описанием принципа работы. Разобран вопрос о влиянии аппаратурных факторов на наблюдаемый сигнал ЯМР, а также основные детали методики эксперимента.

ГЛАВА 5 посвящена последовательному изложению основных экспериментальных результатов исследования ЯМР на ⁵⁵Mn в CsMnBr₃, RbMnBr₃ и CsMnI₃. Глава разбита на три части, соответственно числу изученных веществ. В пункте, посвященном легкоплоскостному неколлинеарному антиферромагнетику CsMnBr₃, сравнивается наблюдаемый спектр, состоящий из трех ветвей (изображен на рис. 1), с формулой (1) из расчетов в главе 3. Установлено значение несмещенной частоты ЯМР в CsMnBr₃ $\nu_{n0}=416$ МГц (T=1.3K) в нулевом внешнем магнитном поле и таким образом уточнено значение редукции спонтанного момента за счет квазиодномерности системы спинов Mn²⁺, которое по нашим данным составляет 28%. Проведено сравнение с данными дифракции нейтронов [2] и др. Также оказалось, что теория среднего поля [14] неплохо описывает процесс трансформации треугольной

спиновой решетки в коллинеарную структуру. Также обсуждаются две аномалии: необычная температурная зависимость низкочастотной ветви спектра ЯМР (см. рис. 2) и сильный рост частоты средней ветви спектра (на рис. 2 обозначена цифрой 1). Последняя аномалия приводит к тому, что в магнитных полях выше фазового перехода $H_c = 64$ кЭ в коллинеарную фазу наблюдаются две ветви ЯМР. Она связана с различным подавлением полем квантовых флуктуаций в магнитно неэквивалентных АФ цепочках Mn^{2+} . Обсуждаются результаты по зависимости от поля ширины и интенсивностей линий ЯМР.

Одним из основных результатов исследования $RbMnBr_3$ является, обнаруженное в коллинеарной фазе (поля выше $H_c \approx 40$ кЭ) расщепление спектра ЯМР ^{55}Mn на две ветви. Аналогичное явление наблюдается в $CsMnBr_3$.

В третьем, последнем разделе этой главы обсуждаются экспериментальные результаты ЯМР на ^{55}Mn для легкоосного треугольного квази-1D АФ $CsMnI_3$. При $T=1.3$ К и магнитных полях до ~ 40 кЭ обнаружено шесть ветвей ЯМР, соответствующих шести спином марганца в элементарной магнитной ячейке. Спектры ЯМР удовлетворительно соответствуют известной магнитной структуре $CsMnI_3$ с учетом ДСЧ из-за взаимодействия с низкочастотными модами АФМР. Из результатов экспериментов в сильных магнитных полях следует, что при $H \parallel C_6$ в $CsMnI_3$ между двумя известными низкотемпературными фазами в полях $H_{c1} < H < H_{sf}$ ($H_{c1}=39$ кЭ и $H_{sf}=52.5$ кЭ) существует промежуточная магнитная структура. В ней нормаль к спиновой плоскости перпендикулярна гексагональной оси, а спины образуют близкую к 120° -ой треугольную структуру так, что одна треть из них направлена перпендикулярно C_6 . Этот переориентационный переход существует

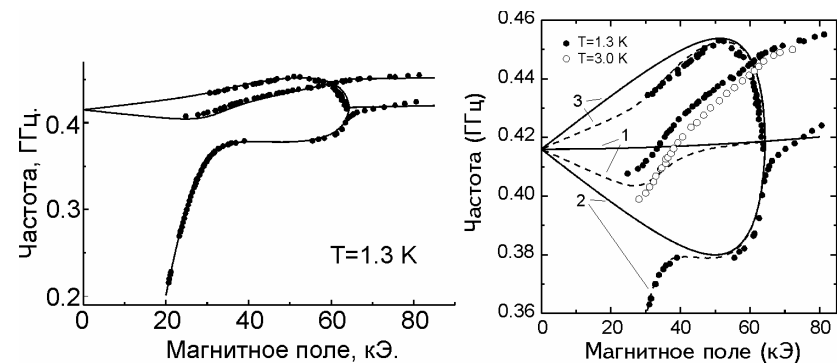


рис. 1

рис. 2

Рис 1. Спектр ЯМР $CsMnBr_3$ ($H \perp C_6$). Точки - экспериментальный спектр, сплошные линии результат расчета.

Рис 2. Спектр ЯМР $CsMnBr_3$ ($H \perp C_6$, высокие частоты). Точки - экспериментальный спектр при 1.3 К, кружки - при 3.0 К; сплошные линии - несмещенный спектр ЯМР, штриховые линии - учет ДСЧ.

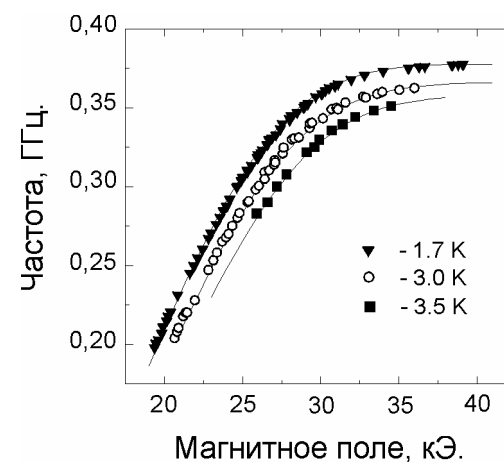


Рис. 3. Температурная зависимость низкочастотной ветви ЯМР.

и при значительном отклонении вектора \mathbf{H} от C_6 ($\varphi \approx 7^\circ$). Переход от новой фазы в высокополевую имеет характерные черты спин-флоп перехода.

Также была обнаружена анизотропия редукции спинов Mn^{2+} (магнитные ионы кристаллографически эквивалентны). Из измеренных величин сверхтонких полей определены средние спины магнитно неэквивалентных ионов Mn^{2+} в нулевом магнитном поле $\langle S_A \rangle = 1.86 \pm 0.05$, $\langle S_B \rangle = 1.74 \pm 0.05$ ($\langle S_B \rangle - \langle S_A \rangle = 0.12 \pm 0.02$). Этот результат качественно соответствует расчетам редукции спинов в квазиодномерных антиферромагнетиках [11]. Обнаруженная нами новая магнитная фаза также характеризуется анизотропией редукции спинов Mn^{2+} в магнитно неэквивалентных цепочках: $\langle S_D \rangle = 1.72 \pm 0.05$, $\langle S_C \rangle = 1.63 \pm 0.05$ ($\langle S_D \rangle - \langle S_C \rangle = 0.09 \pm 0.05$). После спин-флопа все ионы Mn^{2+} становятся магнитно эквивалентными ($\langle S \rangle$ (70 кЭ) = 1.72 ± 0.05). Это подтверждается тем, что спектр ЯМР состоит из одной ветви.

ГЛАВА 6 - итоговая. В ней подведен итог исследованию редукции спина Mn^{2+} в основном состоянии квазиодномерных АФ $CsMnBr_3$, $RbMnBr_3$ и $CsMnI_3$. Полученные значения средних спинов Mn^{2+} в нулевом магнитном поле для этих АФ представлены в Таблице 1. В этой главе также обсуждаются экспериментальных данных ЯМР в сильных магнитных полях, когда ДСЧ мал. В ней показано, что сильные зависимости частот ЯМР от внешнего магнитного поля связаны в основном с ростом средних спинов Mn^{2+} (см рис. 4), вследствие подавления магнитным полем квантовых флуктуаций («нулевых колебаний»).

Таблица 1. Средний спин иона Mn^{2+} в квази-1D АФ.

$\langle S \rangle$	дифракция нейтронов	ЯМР*	другие методы	теория
$CsMnBr_3$	1.65 [2]	1.8	1.7 [17]	1.82 [10]
$RbMnBr_3$	1.8 [3]	1.8		
$CsMnI_3$	1.85 [4]	1.74 - спины B 1.86 - спины A	1.8 [18]	2.0 - спины B [11] 1.8 - спины A

* результат данной работы

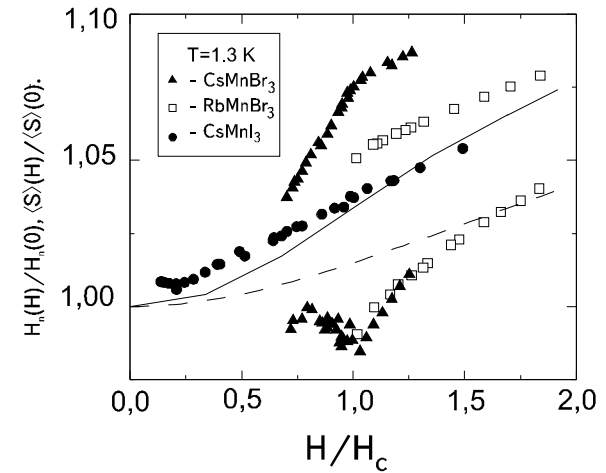


Рис 4. Полевые зависимости сверхтонкого поля на ядрах ^{55}Mn при $\mathbf{H} \perp C_6$ при $T = 1.3K$ в $CsMnBr_3$ (черные треугольники), $CsMnI_3$ (точки, $H_c \equiv H_{sf}$) и $RbMnBr_3$ (квадраты). Штриховая линия - зависимость $\langle S \rangle (H/H_c)$ для $CsMnBr_3$ $\mathbf{H} \parallel C_6$ из [10], сплошная линия - зависимость $\langle S \rangle (H/H_c)$ для $CsMnI_3$ при $\mathbf{H} \perp C_6$ из [9]

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными результатами, вошедшими в диссертационную работу, являются следующие:

1. Создан широкополосный ЯМР спектрометр непрерывного действия дециметрового диапазона длин волн с высокочастотным резонатором. Чувствительность спектрометра оказалась достаточной, чтобы наблюдать ЯМР в условиях малого усиления РЧ-поля.

2. Изучен ЯМР на ^{55}Mn в ЛП АФ CsMnBr_3 с треугольной спиновой решеткой. Показано, что спектр ядерного резонанса расщепляется на три ветви. Он наглядно демонстрирует процесс разрушения треугольной решетки при переходе в квазиколлинеарную структуру в поле $H_c = 64$ кЭ. Полевая зависимость угла между сходящимися подрешетками находится в согласии с расчетами, проведенными в рамках теории среднего поля.

3. Исследован ЯМР на ^{55}Mn в квазиодномерном неколлинеарном антиферромагнетике CsMnI_3 при $T=1.3$ К и магнитных полях до ~ 80 кЭ. Обнаружено шесть ветвей ЯМР, соответствующих шести спинам марганца в элементарной магнитной ячейке. Из измеренных величин сверхтонких полей определены средние спины магнитно неэквивалентных ионов Mn^{2+} $\langle S_A \rangle = 1.86$, $\langle S_B \rangle = 1.74$ в нулевом магнитном поле. Полученные результаты качественно соответствуют расчетам редукции спинов в основном состоянии квазиодномерных антиферромагнетиков.

4. Спектры ЯМР в CsMnI_3 при $T=1.3$ К в поле $H < 39$ кЭ удовлетворительно соответствуют известной магнитной структуре с учетом динамического сдвига частоты, из-за взаимодействия с низколежащими модами АФМР. В области малых углов Φ ($\Phi < 10^\circ$) между осью C_6 и

H обнаружен новый спиновый переориентационный фазовый переход в поле $H_{cl} \approx 39$ кЭ с сохранением шестиподрешеточной треугольной магнитной структуры. Из проведенного анализа спектра ЯМР определена структура и средние спины Mn^{2+} в магнитных подрешетках новой фазы $\langle S_C \rangle = 1.63$ и $\langle S_D \rangle = 1.72$.

5. Из полученных данных по сверхтонким полям в CsMnBr_3 , CsMnI_3 и RbMnBr_3 определены средние моменты магнитных подрешеток и их полевые зависимости, которые оказались сравнительно сильными и различными для магнитно неэквивалентных ионов Mn^{2+} . В результате величины намагниченностей отдельных подрешеток во внешнем магнитном поле ~ 80 кЭ различаются между собой более чем на 5%. Полученные результаты качественно соответствуют теории подавления квантовых флуктуаций магнитным полем.

6. В CsMnBr_3 обнаружен сильный динамический сдвиг частот ЯМР, связанный с взаимодействием с голдстоуновской модой АФМР. Предложена формула для описания ДСЧ в многоподрешеточных АФ. Показано, что эта формула хорошо описывает ДСЧ, как в CsMnBr_3 , так и CsMnI_3 .

Основные результаты работы опубликованы в следующих работах:

1. **Наблюдение ЯМР в квази-1D антиферромагнетике CsMnBr_3 .** А.С.Боровик-Романов, Б.С.Думеш, С.В.Петров, А.М.Тихонов, **НМММ Тезисы докладов XV всероссийской школы - семинара**, стр. 140 (1996).

2. **Исследование ЯМР в квазиодномерном антиферромагнетике CsMnBr_3 ,** А.С.Боровик-Романов, Б.С.Думеш, С.В.Петров, А.М.Тихонов, Письма в ЖЭТФ **64**, 208 (1996).

3. **Исследование подавления квантовых флуктуаций магнитным полем в квазиодномерных антиферромагнетиках методом ЯМР на ^{55}Mn** , А.С.Боровик-Романов, Б.С.Думеш, С.В.Петров, А.М.Тихонов, Письма в ЖЭТФ **66**, 724 (1997).

4. **ЯМР на ядрах $^{55}\text{Mn}^{2+}$ в квазиодномерном антиферромагнетике CsMnBr_3** , А.С.Боровик-Романов, Б.С.Думеш, С.В.Петров, А.М.Тихонов, ЖЭТФ **113**, 352 (1998).

5. **Investigation of NMR in a quasi-one-dimensional antiferromagnet CsMnBr_3** , A.S.Borovik-Romanov, B.S. Dumesh, S.V. Petrov, A.M. Tikhonov, *JMMM* **177-181**, 657 (1998).

6. **Наблюдение анизотропии редукции спинов в квазиодномерном антиферромагнетике CsMnI_3** , Б.С.Думеш, С.В.Петров, А.М.Тихонов, Письма в ЖЭТФ **67**, 661 (1998).

ЛИТЕРАТУРА

1. N.D. Mermin, Wagner H., Phys. Rev. Lett. **17**, 1133 (1966).
2. M.Eibischutz, R.C.Sherwood, F.S.L.Hsu, and D.E.Cox, Proc. of the 18-th Annual Conf. on Magnetism and Magnetic Matireals (Denever, 1972), AIP Conf. Proc. No. 10, AIP New York, 1973, 684
3. C. J. Glinka, V. J. Minkiewicz, D.E. Cox, and C. P. Khattak, Magnetism and Magnetic Materials, 1972 (Denver), edited by C. D. Graham and J. J. Rhyne, AIP Conf. Proc. No. 10 (AIP, New York,1973), p.659
4. H. W. Zandbergen, J. Sol. St. Chem. **35**, 367 (1980).
5. M. F. Collins, O. A. Petrenko, Can. J. Phys., **75**, 605 (1997).
6. P. W. Anderson, Phys. Rev. **83**, 1260 (1951).
7. P.W. Anderson, Phys. Rev. **86**, 694 (1952).
8. L.Pitaevskii, S. Stringari, JLTP **85**, 377 (1991).
9. T.Ohyama and Hiroyuki Shiba, J.Phys.Soc. Japan **63**, 3454 (1994).
10. M.E. Zhitomirsky, I.A. Zaliznyak Phys. Rev. B **53**, 3428 (1995).
11. Y.Watabe, T.Suzuki, Y.Natsume, Phys.Rev. B **52**, 3400 (1995).
12. A. G. Abanov, O. A. Petrenko, Pys. Rev. B **50**, 6271 (1994).

13. P.Santini, Z.Domanski, J.Dong, and P.Erdos, Phys.Rev. B **54**, 6327(1995), P.Santini, G.Fath, Z.Domanski, and P.Erdos, Phys.Rev. B **56**, 5373 (1997).

14. A.V.Chubukov, J. Phys. C.: Sol. St. Phys. **21**, 441 (1988).

15. Е.А.Туров, М.П.Петров, *ЯМР в ферро - и антиферромагнетиках*. М.: Наука, 1969.

16. А.Ф. Андреев, В.И.Марченко, УФН **133**, 39 (1980).

17. S.I.Abarzhi, A.N.Bazhan, L.A.Prozorova and I.A.Zaliznyak, J. Phys.: Condens. Matter **4**, 3307 (1992).

18. Л. А. Прозорова, С. С. Сосин, Д. В. Ефремов, С. В. Петров, ЖЭТФ **112**, 11 (1997).