

**ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Смольникова Алексея Геннадьевича
«Сверхтонкие взаимодействия и магнитный порядок в
мультиферроике CuCrO₂ по данным ядерного магнитного резонанса»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных
явлений.

Соединение CuCrO₂, является примером квазидвумерного фрустрированного антиферромагнетика с треугольной решеткой. Основным состоянием такого рода систем в рамках модели Гейзенберга и XY-модели, является неколлинеарная 120-градусная спиновая структура. Ориентация спиновой плоскости определяется релятивистскими взаимодействиями с кристаллической решеткой и внешним статическим полем. Внутриплоскостное антиферромагнитное взаимодействие в CuCrO₂ много больше релятивистских взаимодействий, так поле насыщения в этом веществе ~400 Т. Такая иерархия взаимодействий определяет тот факт, что приложение внешнего магнитного поля может менять ориентацию спиновой плоскости в пространстве, при этом практически не деформируя магнитную структуру. Кристаллическая структура CuCrO₂ согласно симметрийному анализу допускает появление электрической поляризации при переходе в магнитоупорядоченное состояние. Экспериментально такая поляризация была найдена. В соответствии с теорией поляризация в CuCrO₂ перпендикулярна спиновой плоскости. Возможность поворота спиновой плоскости при приложении внешнего магнитного поля приводит к повороту электрической поляризации образца. Это свойство приводит к возможности управлять электрической поляризацией с помощью магнитного поля. Дальнейшие исследования показали, что приложение электрического поля эффективно воздействует на магнитную структуру. Оказалось, что с помощью внешнего электрического поля можно управлять направлением "закрутки" спинов или другими словами направлением вектора нормали к спиновой плоскости (часто называемым вектором киральности). Перечисленные свойства делают CuCrO₂ привлекательным для возможных применений. В обсуждаемой работе диссертант исследовал CuCrO₂ методами ЯМР спектроскопии на ядрах всех трех ионов составляющих этот магнетик. Отметим, что метод ЯМР дает информацию о локальных свойствах, что особенно важно для описания микроскопических механизмов магнитоэлектрических свойств магнетиков. Таким образом, описанные в диссертации исследования являются **важными и актуальными** как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения перспектив использования CuCrO₂ в практике.

Диссертация состоит из введения, главы с описанием научной проблемы, методической главы, двух экспериментальных глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, четко формулируются цели и задачи, указываются личный вклад автора, научная и практическая значимость.

В первой главе анализируются имеющиеся в литературе сведения об электронных и магнитных свойствах CuCrO₂. Акцентируется внимание на проблеме определения типа

магнитного упорядочения. Уделено внимание имеющимся в открытой печати данным ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$.

Вопросы и замечания к главе диссертации:

- На втором рисунке вид спектров кажется странным. Почему со стороны крыльев (в больших и малых полях) отсутствует точка перегиба?

Во второй главе предоставляются сведения о синтезе образцов, их аттестации, использовавшемся экспериментальном оборудовании. Следует отметить, что исследование проводилось с использованием методов ЯМР с разверткой по частоте и по полю, ядерного квадрупольного резонанса и ядерного магнитного резонанса в локальном поле. Этот факт производит большое впечатление и свидетельствует о **высокой научной квалификации автора**.

Вопросы и замечания к главе диссертации:

- Зависимости поляризации от температуры приведенная на рис. 2.1.1 существенно отличаются от зависимостей, полученных в [2] (рис.1.2.3). Так зависимости, приведенные в диссертации демонстрируют особенность в 15 К. Если она есть, это очень интересно. Также, абсолютная величина поляризации при низкой температуре превосходит литературные значения. Есть ли объяснению этим особенностям?
- На рис. 2.1.2 приведены зависимости магнитной восприимчивости от температуры. Эти зависимости автор приводит в тексте, чтобы продемонстрировать, что образцы соответствуют образцам свойства которых описаны в литературе. К сожалению, сравнить их с 1.2.3 затруднительно, поскольку шкалы по оси x на рисунках разные. Так, например, рис. 2.1.2 серии магнитных переходов вблизи TN не видно вовсе. Абсолютные значения восприимчивостей вблизи переходов различаются на 6%. Находится ли это различие в пределах ошибки эксперимента?

Последние две главы диссертации содержат результаты **оригинальных** исследований.

Третья глава посвящена исследованию ЯМР в CuCrO_2 в парамагнитной области температур. Анализ спектров ЯМР позволил определить тензор градиента электрического поля на ядрах-зондах ионов Cu^+ , O^{2-} . Из анализа температурных зависимостей сдвига и магнитной восприимчивости автору удалось оценить наведенные сверхтонкие поля на ядрах-зондах от ближайших магнитных соседей. Эта информация является **новой и чрезвычайно полезной**. Представлены убедительные доводы, что основной вклад в наведенное сверхтонкое поле на ядрах меди связан со спиновой поляризацией s- орбиталей иона Cu^+ . Здесь же отмечу, что ЯМР эксперименты в парамагнитной фазе являлись не случайным, а последовательным этапом исследований необходимым для достоверных выводов о типе основного магнитного состояния.

В четвертой главе представлены данные ЯМР и ЯКР в магнитоупорядоченной фазе. Глубокий анализ этих данных позволил сделать автору, как я считаю, ряд **важных выводов**.

Хочется выделить следующие, на мой взгляд, очень интересные результаты.

1. Исследование ЯМР на ядрах немагнитных ионов в парамагнитной фазе

позволило автору определить, какое эффективное поле создает магнитный спин соседнего иона хрома. Эффективное магнитное поле может быть представлено, как сумма дипольного и контактного полей. Большая часть контактного поля изотропная, тем не менее, существует небольшая пятипроцентная поправка, определяющая его анизотропную часть. Несмотря на такую сильную разницу в величинах, малая анизотропная часть и также малый дипольный вклад оказываются определяющими при нахождении спектра ЯМР в магнитоупорядоченной фазе. Это связано с тем, что суммарный изотропный вклад от шести ближайших соседей оказывается практически скомпенсирован в магнитоупорядоченном состоянии. Предложенный набор констант, определяющий сверхтонкие поля позволил А.Г. Смольникову описать наблюдаемую в эксперименте форму линий ЯМР на ядрах меди и кислорода.

2. Обнаружен спектр ЯМР от ядер магнитных ионов хрома. Оценка магнитного момента на ионе хрома в магнитоупорядоченной фазе оказалась близкой к полученной в исследованиях методом рассеяния нейtronов. Обнаружена интересная структура линии, которая очень привлекательна для дальнейших исследований.

В приложении представлена алгоритмическая модель программы для расчета диполь-дипольных сверхтонких полей в $\text{CuBO}_2(B = \text{Fe}, \text{Cr})$, которая используется как для парамагнитной, так и для упорядоченной фазы. Контрольные расчеты спектров ЯМР, выполненные в Казанском Университете с помощью другой программы совпали с расчетами выполненными А.Г. Смольниковым.

Оснований для сомнений в достоверности полученных результатов и обоснованности основных выводов мною не обнаружено. Эксперименты выполнены в исследовательской группе, имеющей большой опыт в области ЯМР спектроскопии. Использованные образцы были синтезированы и надежно аттестованы. Выводы не противоречат физическим основам и имеющимся литературным данным. Отмечу, что благодаря совместному и самосогласованному анализу данных, полученных от всех исследуемых ядер-зондов, значительно уменьшается неоднозначность интерпретации результатов ЯМР измерений.

Перечисленные вопросы и замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, выполненной на высоком научном уровне. Результаты работы соответствуют теме, заявленной специальности, а также цели и задачам, поставленным в диссертации. Работа написана хорошим языком и грамотно оформлена. Личный вклад автора в диссертационную работу у оппонента не вызывает сомнений. Автореферат соответствует содержанию и основным научным положениям работы. Представленный в работе материал достаточно полно отражен в публикациях автора и прошел апробацию на международных и российских конференциях.

В качестве **заключения**. Считаю, что рассматриваемая диссертационная работа, «**Сверхтонкие взаимодействия и магнитный порядок в мультиферроике CuCrO₂ по данным ядерного магнитного резонанса**», несомненно, является оригинальным, законченным и практически значимым научным исследованием и полностью удовлетворяет всем требованиям п. 9 Положения «О присуждении ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Смольников Алексей Геннадьевич присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Ведущий научный сотрудник Института физических проблем им. П.Л.Капицы РАН,
доктор физико-математических наук Свистов Леонид Евгеньевич

«16» апреля 2019г

Почтовый адрес:

119334, Москва, ул. Косыгина 2,
тел. +7(499)1370998,
e-mail: svistov@kapitza.ras.ru

Ученый секретарь института,
кандидат физ.-мат. Наук



О.А. Андреева

С отечеством ознакомлен

29.04.2013

[Signature] / Смольников А.Г./

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Свистов Леонид Евгеньевич

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.09 – физика низких температур, профессор

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук.

Почтовый адрес:

119334, Москва, ул. Косыгина 2,
тел. +7(499)1370998,
e-mail: svistov@kapitza.ras.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. 1. Magnetic structure of the frustrated S=1/2 chain magnet LiCu₂O₂ doped with nonmagnetic Zn //A.A.Bush, N.Buettgen, A.A.Gippius, V.N.Glazkov, L.A.Prozorova, L.E.Svistov, W.Kraetschmer, A.M.Vasiliev, A.Zheludev/Phys.Rev.B88,104411(2013).
2. ESR of the quasi-two-dimensional antiferromagnet CuCrO₂ with a triangular lattice// A.M.Vasiliev, L.A.Prozorova, V.Tsurkan, L.E.Svistov, V.Dziom, A.Shubaev, A. Pimenov/ Phys.Rev.B88,144403(2013).
3. Magnetic structure and domain conversion of quasi-2D frustrated antiferromagnet CuCrO₂ probed by NMR // Yu.A.Sakhratov, L.E.Svistov, P.L.Kuhns, H.D.Zhou, A.P.Reyes/ ЖЭТФ 146, 1002(2014).
4. Magnetic phases of the quasi-two-dimensional antiferromagnet CuCrO₂ on a triangular lattice.// Yu.A.Sakhratov, L.E.Svistov, P.L.Kuhns, H.D.Zhou, and A.P.Reyes / Phys. Rev. B94, 094410 (2016).
5. Anisotropic exchange in LiCu₂O₂ // Z.Seidov, T.P.Gavrilova, R.M.Eremina, L.E.Svistov, A.A.Bush, A.Loidl, H.A.Krug von Nidda /Phys. Rev.B 95, 224411 (2017).
6. Exotic phases of frustrated antiferromagnet LiCu₂O₂// A.A.Bush, N.Büttgen, .A.Gippius, M.Horvatić, M.Jeong, W.Kraetschmer, V.I.Marchenko, Yu.A.Sakhratov, L.E.Svistov/ Phys.Rev.B97, 054428 (2018).
7. Search for a nematic phase in the quasi-two-dimensional antiferromagnet CuCrO₂ by NMR in an electric field// Yu.A.Sakhratov, J.J.Kweon, E.S.Choi, H.D.Zhou, L.E.Svistov, A.P.Reyes/ Phys.Rev.B97, (2018).
8. Multiferroicity of CuCrO₂ tested by electron spin resonance// S.K.Gotovko, T.A.Soldatov, L.E.Svistov and H.D.Zhou/ Phys. Rev.B97, 094425 (2018).

Ученый секретарь института,
кандидат физ.-мат. Наук



О.А. Андреева