

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ИМ. П.Л. КАПИЦЫ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
СТЕНОГРАММА**

к протоколу № 160 заседания диссертационного совета 24.1.140.01 при Институте
физических проблем им. П.Л. Капицы РАН
от 26 октября 2022 г.

Присутствовали: 17 (10 очно и 7 удаленно, подключенных с аудио и видеосвязью через платформу Zoom) членов диссертационного совета из 21, из них по специальности 1.3.10 – “Физика низких температур” – 10 докторов наук и 1 кандидат наук:

- 1) доктор физико-математических наук, академик А.Ф. Андреев (председатель совета), 1.3.3 – очно,
- 2) доктор физико-математических наук, академик В.В. Дмитриев (зам. председателя совета), 1.3.10 – очно,
- 3) кандидат физико-математических наук А.Н. Юдин (ученый секретарь совета), 1.3.10 – очно,
- 4) доктор физико-математических наук А.Н. Васильев, 1.3.10 – очно,
- 5) доктор физико-математических наук Г.Е. Воловик, 1.3.3 – удаленно,
- 6) доктор физико-математических наук А.А. Гиппиус, 1.3.10 – очно,
- 7) доктор физико-математических наук – А.Д. Заикин, 1.3.3 – удаленно,
- 8) доктор физико-математических наук Е.И. Кац, 1.3.3 – удаленно,
- 9) доктор физико-математических наук Н.М. Крейнес, 1.3.10 – удаленно,
- 10) доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН В.М. Пудалов, 1.3.10 – очно,
- 11) доктор физико-математических наук Л.Е. Свистов, 1.3.10 – удаленно,
- 12) доктор физико-математических наук А.М. Тихонов, 1.3.10 – очно,
- 13) доктор физико-математических наук Л.С. Успенская, 1.3.10 – удаленно,
- 14) доктор физико-математических наук М.В. Фейгельман, 1.3.3 – удаленно,
- 15) доктор физико-математических наук, чл.-корр. РАН И.А. Фомин, 1.3.3 – очно,
- 16) доктор физико-математических наук А.А. Шашкин, 1.3.10 – очно,
- 17) доктор физико-математических наук В.С. Эдельман, 1.3.10 – очно.

Защита Готовко Софьей Климентовной диссертации «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 – “Физика низких температур”.

Официальные оппоненты:

- 1) доктор физико-математических наук, профессор РАН Пятаков Александр Павлович,
- 2) доктор физико-математических наук Демидов Виктор Владимирович.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический Институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук.

Перед открытием заседания диссертационного совета ученый секретарь совета А.Н. Юдин раздает членам совета проект заключения по диссертации **Готовко Софьи Климентовны**, подготовленный заранее.

Ученый секретарь совета в лице Юдина А.Н. проводит переключку членов совета и сообщает, что кворум набран, на заседании присутствуют 7 членов совета удаленно, подключенных с аудио и видеосвязью через платформу Zoom, и 10 членов совета присутствуют в зале заседания, всего присутствуют 17 членов совета из 21.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, прекрасно. Теперь я должен сообщить, что сегодня у нас защита диссертации Готовко Софьи Климентовны: кандидатской диссертации на тему «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках» по специальности «Физика низких температур». Два официальных оппонента: доктор физ.-мат. наук, профессор РАН, профессор МГУ – Пятаков Александр Павлович, и доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИРЭ им. Котельникова – Демидов Виктор Владимирович. Ведущая организация – ФИАН. И теперь я предоставляю слово учёному секретарю, для того, чтобы он нас познакомил с многими сведениями о диссертанте. Так, пожалуйста.

Председатель совета А.Ф. Андреев поручает ученому секретарю кратко изложить о содержании документов в соответствии с установленными требованиями.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин докладывает об основном содержании представленных соискателем документов и их соответствии установленным требованиям.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Предоставляю слово соискателю для доклада, двадцать минут.

Диссертант С.К. Готовко: излагает существо и основные положения диссертации, подробно останавливаясь на результатах экспериментов по магнитному резонансу в мультиферроиках CuCrO_2 , LiCuVO_4 в присутствии внешнего электрического поля, экспериментах по изучению магнитной структуры мультиферроика $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ методом ЭСР (линарит), а также результатах симметричного анализа магнитной структуры LiCuVO_4 .

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, спасибо. Теперь можно задавать вопросы диссертанту в устной или письменной форме. Пожалуйста.

Д.ф.-м.н. А.Н. Васильев: Можно задать вопрос? У меня вопрос по поводу линарита, если это мультиферроик, значит, у него есть две температуры упорядочения – магнитного и ферроэлектрического. Как обстоят дела в линарите? Эти температуры совпадают, или они разнесены, и какие это температуры? Магнитного 2.3, а ферроэлектрического какая температура?

Диссертант С.К. Готовко: Измерения электрической поляризации в мультиферроике линарит показали, что уже при 2.8 К там появляется электрическая поляризация. Но проблема с такими веществами заключается ещё и в том, что температура магнитного упорядочения сама по себе очень низкая, поэтому добиться такой точности, то есть, определить, разнесены ли эти переходы на доли кельвин довольно сложно. Я могу говорить только о тех экспериментах, о которых я, собственно, читала.

Д.ф.-м.н. Г.Е. Воловик: Можно задать вопрос? Так, вот, вы говорили о фрустрированных системах, но насколько я помню, сам термин «фрустрация» был введён где-то лет сорок назад, если не раньше, Виллэйном, и это имело отношение к спиновым стёклам. Вот у вас на фазовой диаграмме есть какая-нибудь область, где видно было бы спиновое стекло, или такое не бывает у вас?

Диссертант С.К. Готовко: Нет, в данных веществах в области полей и температур в которых проводились наши исследования, такой фазы точно нет. В основном измерения

проводились в малых полях, в которых реализуется именно несоизмеримая спиральная планарная структура.

Д.ф.-м.н. Г.Е. Воловик: А где их можно ожидать, спиновые стёкла? Ну в близких системах.

Диссертант С.К. Готовко: К сожалению, я затрудняюсь ответить на этот вопрос, поскольку имела дело именно с этими конкретными системами.

Д.ф.-м.н. Г.Е. Воловик: спасибо.

Д.ф.-м.н. В.С. Эдельман: У меня такой вопрос: линарит это природный материал или выращенный искусственно?

Диссертант С.К. Готовко: Линарит это природный минерал, к сожалению, искусственно выращенных образцов пока не наблюдалось и их нет, и получить высококачественный минерал в природе довольно сложно. Он исключительно природный.

Д.ф.-м.н. В.С. Эдельман: Вопрос в том, какие там примеси, влияют ли они как-то на результаты?

Диссертант С.К. Готовко: Мы проводили также дополнительные исследования, которые здесь не включены, на кристалле линарита, полученного из другого месторождения, в Казахстане, и там есть проблема в этих кристаллах, что от чистого кристалла вот такие кристаллы могут отличаться тем, что там, например, наблюдается двойникование. Это видно на частотно-полевых зависимостях, что примешиваются зависимости от других ориентаций. Вот такая проблема там есть. Но вот этот кристалл рентгеном был исследован, и он относительно однородный, то есть это монокристалл, тот кристалл о котором я говорила... в котором проводились данные исследования.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, ещё вопросы?

Д.ф.-м.н. В.М. Пудалов: Вы рассказали про исследования, очень большого объёма, и в публикациях у вас присутствует очень много соавторов. Сформулируйте, пожалуйста, ваш личный вклад.

Диссертант С.К. Готовко: Так, ну начнём по порядку. Мой личный вклад в CuCrO_2 заключался в том, что я готовила образцы к эксперименту, то есть, занималась монтажом этого процесса, также я проводила измерения, как в электрическом поле, так и без него, и занималась обработкой результатов. В LiCuVO_4 я делала то же самое, и также под руководством Владимира Ивановича я проводила симметричный анализ для описания наблюдаемых свойств в этом материале и для вычисления спектра. В образце линарит я проводила измерения электронного спинового резонанса на низких частотах, также занималась обработкой результатов, а высокочастотные измерения я проводила совместно с коллегами из группы Андрея Пименова, то есть там было также участие других коллег.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, ещё вопросы? Теперь, если вопросов больше нет, я предоставляю слово научному руководителю, ведущему научному сотруднику Института физпроблем, Свистову Леониду Евгеньевичу.

Д.ф.-м.н. Л.Е.Свистов дает краткую положительную характеристику работы Готовко Софьи Климентовны. За время работы в институте выросла до самостоятельного исследователя. Сделана большая хорошая работа, Софья Климентовна безусловно заслуживает присуждения степени кандидата наук.

Председатель совета А.Ф. Андреев предоставляет слово учёному секретарю для зачисления заключения организаций, где была выполнена работа.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин:

Заключение Института физических проблем: так, диссертационная работа «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках» была выполнена в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН и на базовой кафедре физики низких температур ИФП РАН физического факультета НИУ ВШЭ. В период подготовки диссертации соискатель Готовко Софья Климентовна работала в ИФП РАН в должности младшего научного сотрудника. По результатам рассмотрения выполненной в ИФП РАН работы Готовко Софьи Климентовны «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках» принято

следующее заключение: диссертационная работа является самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, посвящённой решению актуальных задач физики мультиферроиков: изучению влияния электрического поля на магнитные свойства мультиферроиков CuCrO_2 и LiCuVO_4 и исследованию магнитной структуры квазиодномерного мультиферроика $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$. Основные результаты работы докладывались на семинарах ИФП РАН, российских и международных конференциях по физике низких температур и магнетизму, опубликованы в международных рецензируемых журналах. Достоверность представленных результатов не вызывает сомнений, поскольку они получены различными надёжными экспериментальными методами. Экспериментально обнаружен и измерен сдвиг спектра электронного спинового резонанса в мультиферроиках CuCrO_2 и LiCuVO_4 в присутствии внешнего электрического поля. Измерены спектры ЭСР и определены параметры анизотропии в мультиферроике $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$, идентифицирована реализующаяся в высоких магнитных полях магнитная фаза. Все полученные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств квазинизкоразмерных мультиферроиков. Наиболее существенными результатами являются: обнаружение сдвига спектра ЭСР в мультиферроиках CuCrO_2 и LiCuVO_4 , описание связи магнитного параметра порядка и спонтанной электрической поляризации в LiCuVO_4 , определение параметров анизотропии в $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$. Диссертационная работа выполнена на высоком уровне и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автору рекомендовано предоставить её на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика низких температур».

Так, и заключение Высшей школы экономики: диссертация Готовко С.К. на тему «Электронный спиновый резонанс в мультиферроиках»..

Председатель совета А.Ф. Андреев: Может, как-то ограничиться оценочной частью?

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин: Да, согласен с Вами. По итогам обсуждения принято следующее заключение. Актуальность темы: особенностями квазинизкоразмерных фрустрированных магнетиков-мультиферроиков являются уникальные фазовые диаграммы и возникновение в упорядоченном состоянии спонтанной электрической поляризации, на величину и направление которой можно влиять с помощью внешнего магнитного поля. Изучение соединений CuCrO_2 и LiCuVO_4 было мотивировано возможностью обнаружения в них противоположного эффекта: влияния внешнего электрического поля на магнитные свойства этих веществ. Изучение магнитной структуры мультиферроика $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ было мотивировано тем, что в данном веществе представлена уникальная фазовая диаграмма, а также возможностью обнаружения в данном соединении экзотических магнитных фаз, которые были теоретически предсказаны для фрустрированных квантовых цепочек со спином $1/2$. Фазовая диаграмма $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ была исследована в полях вплоть до поля насыщения. Обоснованность научных положений: результаты, изложенные в диссертации, прошли научное рецензирование и апробацию. Личное участие соискателя учёной степени в получении результатов, изложенных в диссертации: все результаты, изложенные в диссертации, были получены лично соискателем, за исключением случаев, оговоренных отдельно. Степень достоверности результатов проведённых соискателем учёной степени исследований: достоверность представленных результатов не вызывает сомнений, поскольку они получены различными надёжными экспериментальными методами. Новизна: результаты диссертации получены впервые и опубликованы в ведущих научных журналах. Теоретическая значимость: полученные в диссертации научные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств квазинизкоразмерных фрустрированных мультиферроиков. Наиболее важными результатами являются обнаружение сдвига спектра ЭСР в мультиферроиках CuCrO_2 и LiCuVO_4 , описание связи магнитного параметра порядка в LiCuVO_4 и спонтанной электрической поляризации, определение параметров анизотропии в $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$.

Представленные результаты могут использоваться при дальнейшем изучении квазинизкоразмерных фрустрированных мультиферроиков. Практическая значимость: с практической точки зрения результаты данной работы могут найти применение в области разработок энергоэффективной магнитной памяти. Полученные результаты расширяют возможности метода ЭСР. Далее приводятся конференции, апробация работы, публикации. Публикации полностью соответствуют теме диссертационного исследования и раскрывают её основные положения. Ценность научных работ соискателя подтверждается публикациями в ведущих научных журналах. Результаты расширяют понимание физики мультиферроиков. Диссертация Готовко – это законченная научно-квалификационная работа, которая соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а также Паспорту научной специальности «физика низких температур». Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика низких температур».

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, теперь отзыв ведущей организации – Физического института имени Лебедева.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин: В последнее время наблюдается рост интереса к магнитным материалам, в которых реализуются спиральные магнитные структуры, поскольку такое спиральное упорядочение может индуцировать спонтанную электрическую поляризацию в этих материалах. Связь между магнитным и электрическим упорядочением в таких материалах, называемых мультиферроиками, даёт возможность управлять их магнитной структурой с помощью электрического поля. Научные исследования мультиферроиков, а именно изучение влияния электрического поля на их магнитные свойства, открывают широкие перспективы в области практических приложений, таких как устройства магнитной памяти, СВЧ-техники, магнитофотоники и магноники. Актуальность темы: диссертационная работа Готовко посвящена экспериментальному изучению магнитной структуры квазинизкоразмерных фрустрированных мультиферроиков CuCrO_2 , LiCuVO_4 и $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит), в которых в связи с фрустрацией обменных взаимодействий при магнитоупорядочении реализуются уникальные фазовые диаграммы. Данные соединения являются мультиферроиками: в области магнитных полей, при которых в данных соединениях реализуется планарная спиральная несоизмеримая структура, в них возникает спонтанная электрическая поляризация, направление и величину которой можно контролировать с помощью внешнего магнитного поля. Целью работы С.К. Готовко было изучить обратный эффект, а именно влияние электрического поля на магнитную структуру. Для этого были проведены исследования электронного спинового резонанса в данных веществах в присутствии электрического поля. Такие исследования актуальны как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения возможных практических применений, например, в элементах памяти. Вторая часть диссертации посвящена исследованию магнитной структуры квазиодномерного цепочечного магнетика со спином $1/2$ $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит), который представляет исключительный интерес с точки зрения возможности реализации в нём экзотических фаз, таких как фазы с мультипольными параметрами порядка и фазы волны спиновой плотности. Мультичастотные ЭСР-исследования линарита позволили определить необходимые для адекватного описания магнитных свойств параметры анизотропии, а также идентифицировать магнитную фазу, реализующуюся в высоких магнитных полях. В связи с этим, проведённые С.К. Готовко исследования мультиферроиков являются значительными как в фундаментальном, так и в возможном прикладном аспектах. Далее приводится структура диссертации. Наиболее значимыми диссертационной работы С.К. Готовко являются следующие:

1. Обнаружено влияние электрического поля на частоты магнитного резонанса в квазидвумерном антиферромагнетике CuCrO_2 . Экспериментальные результаты подтверждают предсказания теоретического анализа, проведённого в рамках феноменологического макроскопического подхода.

2. Экспериментально изучено влияние электрического поля на спектр ЭСР и магнитную структуру в LiCuVO_4 в спиральной фазе. В области малых полей обнаружен сдвиг линий резонансного поглощения. В полях выше поля спин-переориентационного перехода, в которых ожидается отсутствие электрической поляризации, обнаружен сдвиг спектра ЭСР, что свидетельствует о значительном влиянии электрического поля на характер спин-переориентационного перехода.

3. Проведён симметричный анализ магнитной структуры в мультиферроике LiCuVO_4 в рамках макроскопической модели. Описана связь между спонтанной электрической поляризацией в данном веществе и магнитным параметром порядка. Теоретически описан поворот структуры и рассчитан спектр ЭСР в присутствии внешних электрического и магнитного полей.

4. Изучена связанная динамика магнитной системы и электрической поляризации в присутствии внешнего электрического поля для мультиферроиков CuCrO_2 и LiCuVO_4 .

5. Экспериментально показано, что с помощью магнитного поля можно управлять ориентацией спиновой плоскости в соединениях CuCrO_2 и LiCuVO_4 , а с помощью электрического поля можно контролировать направление вращения спинов в спиновой плоскости.

6. Проведено мультичастотное исследование спектра ЭСР в квазиодномерном магнетике $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$ (линарит) в области полей вплоть до поля насыщения. Получены основные макроскопические и микроскопические параметры анизотропии. Полученные спектры ЭСР подтверждают, что в низких полях реализуется планарная спиральная структура, а в промежуточных полях при ориентациях полей, близких к направлению вдоль спиновой цепочки, реализуется соизмеримая антиферромагнитная фаза. Спектры ЭСР в высоких полях могут быть интерпретированы в рамках реализации веерной фазы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы достигнуты использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами в области исследований сложных магнитных систем и мультиферроиков ЭСР и другими экспериментальными методами. Материалы диссертации прошли широкую апробацию на международных и российских конференциях и опубликованы в ряде статей в высокорейтинговом рецензируемом научном журнале «Physical Review B». Научная и практическая значимость работы: Полученные в диссертации научные результаты являются новыми и вносят существенный вклад в понимание физических свойств квазинизкоразмерных мультиферроиков. Наиболее существенными результатами являются: обнаружение сдвига спектра ЭСР в мультиферроиках CuCrO_2 и LiCuVO_4 , описание связи магнитного параметра порядка и спонтанной электрической поляризации в LiCuVO_4 ; определение параметров анизотропии в $\text{PbCuSO}_4(\text{OH})_2$. Представленные результаты могут использоваться при дальнейшем изучении квазинизкоразмерных мультиферроиков, расширяют возможности методики ЭСР. С практической точки зрения данные результаты работы могут найти применение в области разработок энергоэффективной магнитной памяти.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в исследованиях геликоидальных магнитных систем и мультиферроиков. Приводится ряд институтов, где это можно применять.

Необходимо отметить следующие замечания:

1. В разделе 3.3 диссертации приведены детали эксперимента в LiCuVO_4 , однако не указана частота модуляции переменного электрического поля. Оставлен открытым вопрос зависимости результатов эксперимента от выбранной частоты модуляции переменного электрического поля.

2. В тексте не содержатся описание и анализ микроскопического механизма возникновения поляризации в исследованных веществах.

3. В тексте не отмечается, является ли несоизмеримость магнитной структуры обязательным условием возникновения спонтанной электрической поляризации. Представленные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В целом, диссертационная работа Готовко С.К. является законченным научным исследованием, содержит новые результаты, имеющие большую научную значимость и практическую ценность. Основные результаты работы опубликованы в виде 3 статей в ведущих рецензируемых журналах (входящих в список журналов ВАК), а также неоднократно докладывались на российских и международных конференциях. Автореферат достоверно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Работа С.К. Готовко удовлетворяет требованиям пункта № 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней. С.К. Готовко заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика низких температур».

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, теперь я должен спросить, нет ли других отзывов.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин: Других отзывов нет.

Председатель совета А.Ф. Андреев предоставляет слово соискателю для ответа на замечания в отзывах.

Диссертант С.К. Готовко: Ответ на первый вопрос: результаты эксперимента не зависели от выбранной частоты модуляции электрического поля в диапазоне частот от 10 до 3000 Гц, при этом рабочая частота составляла 300 Гц. Ответ на второй вопрос: действительно, в тексте используется макроскопический подход к описанию свойств данных мультиферроиков. Микроскопический механизм в этих соединениях, к сожалению, в моей работе не обсуждается, частично по той причине, что однозначно в некоторых из этих веществ механизмы микроскопические пока не определены и наши эксперименты не позволили выделить какой-то конкретный микроскопический механизм. Третий вопрос: Действительно, в трёх исследованных в диссертации мультиферроиках реализуется несоизмеримая планарная структура, однако в разделе 3.5 Симметричный анализ магнитной структуры LiCuVO_4 было показано, что спонтанная электрическая поляризация в таком мультиферроике должна возникнуть при наличии неколлинеарности, то есть в таком случае несоизмеримость – это исключительно следствие наличия инварианта Лифшица.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, спасибо. Теперь мы переходим к выступлениям официальных оппонентов. Я предоставляю слово Пятакову Александру Павловичу.

Официальный оппонент д.ф.-м.н. А.П. Пятаков даёт краткую характеристику работы, подчёркивая её актуальность и новизну, кратко описывает результаты. Приводит общую положительную характеристику полученных результатов. Структура диссертации немножко отличается от традиционной, то есть там литературные данные не выделены в отдельную главу литобзора, а распределены по главам с оригинальными результатами. Ну и вот мне немножко не хватило как раз вот этой полноты обзора литературных данных; вот, скажем, во второй главе природа магнитоэлектрического эффекта мне показалась неосвещённой, также симметрия CuCrO_2 , и потом, некоторые термины – «гидродинамическая теория», например – для меня было неожиданно встретить в таком контексте, тоже требовали бы пояснений. Ну ещё по структуре: хорошим тоном является предпослать аббревиатуры перед основным текстом, ну и также обозначений. По обозначениям, например: в одном месте поле обозначается как H_c , в другом месте как H_{sf} . Вообще у меня там около десятка замечаний, не буду все их зачитывать, они, в основном, носят коррекционный характер, а точнее: нет терминов. Ну или пожеланий: тут явно не хватило магнитоэлектричества в последней главе – линарит. То есть, там интересно про существование фазы, но поскольку «мультиферроики» звучат, хотелось бы что-то и про магнитоэлектричество. Но я так понял, что это просто уже не вошло в диссертацию, а это намечается, то есть это как пожелание на будущее. Ну и опечатки, их немного, кстати, англицизмы («ферроэлектрический»), ну этим все грешат. Ну а так можно сказать, что

очень хорошая диссертация, про новизну и актуальность я говорил, апробацию прошла, три работы в Phys. Rev. – уважаемый журнал, и достоверность не вызывает сомнений. Так что содержание диссертации соответствует паспорту специальности, удовлетворяет требованиям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, а сама соискатель – Готовко Софья Климентовна – заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «физика низких температур». Спасибо.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Спасибо. Теперь слово официальному оппоненту – Демидову Виктору Владимировичу, пожалуйста.

Официальный оппонент д.ф.-м.н. В.В. Демидов: Обязательно в микрофон? Я громко говорю.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Это надо для видеозаписи.

Официальный оппонент д.ф.-м.н. В.В. Демидов: благодарит членов диссертационного совета за приглашение выступить оппонентом работы. Отмечает оригинальность экспериментального подхода к изучению поставленной задачи, новизну и актуальность полученных результатов. Первое замечание: Исследования проводились в широком диапазоне СВЧ-излучения: от 20 ГГц до 140 ГГц. При этом, в диссертации написано, что используется объёмный прямоугольный резонатор. Однако ничего не сказано, использовался ли в работе набор различных резонаторов или был только один резонатор. Хотелось бы, во-первых, чётко представлять геометрические параметры резонаторов, а во-вторых, понимать, как проводилась их настройка. Второе замечание: У меня осталось недопонимание относительно выражения для магнитной энергии (формула 2.7). Там есть слагаемое, учитывающее анизотропию магнитной восприимчивости, но это слагаемое почему-то выпадает, если поле будет направлено перпендикулярно к нормали? И как следствие этой формулы, там получается линейная асимптотика с наклоном, пропорциональным, как там написано, $(\chi_{\parallel}/\chi_{\perp} - 1)^{1/2}$. То есть, подкоренное выражение в принципе может быть отрицательным. Во всяком случае, ничего не оговорено, как тогда быть в случае, когда выражение отрицательно? Третье замечание: на рисунке 2.4 изображены спектр поглощения в случае прямого детектирования, а также этот спектр при модуляции электрического поля в случае синхронного детектирования. В принципе, синхронное детектирование должно давать при малой амплитуде модуляции, а вся работа проводилась в этих пределах (амплитуда модуляции электрического поля была значительно меньше ширины линии электронного резонанса) – должна фиксироваться производная. Но почему-то сигнал не соответствовал производной. Там, конечно, какие-то вещи к этому приводили, но надо такие расхождения оговаривать. Четвёртое замечание: Осталось непонятным, почему никак не прокомментированы разные наклоны у прямых на нижней панели рисунка 3.5. Из выводов, сделанных в диссертационной работе, следует, что наклоны должны быть одинаковыми. Пятое замечание: следовало пояснить, почему формы кривых на средней и нижней панелях рисунка 3.6 не соответствуют производной от сигнала поглощения, показанного на верхней панели, в то время как при другой ориентации внешнего поля (см. рис. 3.7) синхронное детектирование действительно даёт форму. Шестое замечание: На мой взгляд следует более осторожно говорить о величинах масштабирующего коэффициента. Вот это действительно, на мой взгляд, проблема, потому что, я уже говорил, что используется многомодовый резонатор, а там же как пересчитывалось: брался сигнал прямого детектирования линии поглощения, брался сигнал потом синхронного детектирования, то есть, сигнал производной, ну и коэффициент усиления всей системы регистрации вычислялся, бралось их отношение (амплитуды сигналов), ну и получался переводной коэффициент. Всё это хорошо, если вы гарантируете, что у вас все эти коэффициенты усиления регистрирующей системы не меняются при переходе от прямого детектирования к модуляции, а что гораздо сложнее обеспечить, это одинаковость магнитной составляющей СВЧ-поля, и вот как в многомодовом резонаторе всё это настраивается – это надо было оговорить. Ну и последнее замечание: в тексте диссертации несколько раз встречается, что в работе имеет место

управление доменной структурой образца. Но при этом демонстрируется просто подавление доменной структуры. Всё-таки это две разные вещи – управление и подавление.

Конечно, все эти замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, диссертация Софьи Климентовны Готовко является самостоятельным законченным исследованием, выполненном на современном уровне и имеющим большое практическое и научное значение. Оформление диссертации соответствует предъявленным требованиям, автореферат, публикации по теме диссертации с достаточной полнотой отражают её содержание; текст диссертации и автореферата демонстрируют хороший грамматический уровень Софьи Готовко. Это, кстати, очень важно, на мой взгляд. Основные результаты проведённых исследований представлены в трёх печатных работах в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Министерства Образования Науки РФ, и индексируемых в WoS и Scopus, в докладах на 9 профессиональных конференциях, школах, симпозиумах и совещаниях. Диссертационная работа Готовко удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК, а её автор, Готовко Софья Климентовна, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.10 – «физика низких температур».

Председатель совета А.Ф. Андреев: Спасибо. Теперь соискатель отвечает на замечания.

Диссертант С.К. Готовко: Ответы на вопросы и замечания оппонента Александра Павловича Пятакова. Первое замечание касается списка сокращений: спасибо за замечание, указанные аббревиатуры расшифровываются в тексте при первом упоминании, возможно, указатель аббревиатур был бы более удобен. Второе замечание: комментарий касается литературных данных о симметричном анализе в CuCrO_2 , проведённом ранее другими авторами. В тексте диссертации оно не включено; теоретическое рассмотрение влияния электрического поля на магнитную структуру в образце CuCrO_2 в рамках теории Дзялошинского-Ландау было приведено в цитируемой в диссертации работе «Об антиферромагнитном переходе в CuCrO_2 » (2014 г., В.И. Марченко). Подробного обсуждения теоретического рассмотрения для CuCrO_2 в диссертации не приведено, поскольку в рамках той же теории мною совместно с В.И. Марченко были проведены теоретические исследования в соединении LiCuVO_4 , которые подробно описаны в диссертации далее. Краткая информация о результатах симметричного анализа в CuCrO_2 приведена в работе. Далее, замечания по поводу неточностей, с этим я согласна, это вопросы с третьего по восьмой, и *девятый вопрос: содержание диссертации было бы более весомым, если бы были проведены магнитоэлектрические измерения в линарите*. Я согласна с этим замечанием, но, к сожалению, образцов подходящего качества на момент проведения наших исследований не было. В будущем, если такие образцы будут найдены или выращены, конечно, такие исследования будет необходимо провести. *Десятое замечание:* это замечание по поводу англицизмов и опечаток. С замечанием согласна.

Ответы на вопросы и замечания оппонента Виктора Владимировича Демидова. *Первый вопрос:* все эксперименты по исследованию влияния электрического поля на частоты ЭСР в CuCrO_2 и LiCuVO_4 проводились в одном и том же прямоугольном резонаторе с параметрами 5.5x11x38 мм. Исследования в линарите проводились в основном в том же резонаторе в многомодовом режиме, а при низких температурах использовался цилиндрический резонатор. *Вопрос 2:* в формуле 2.7, а именно в формуле, которая определяет потенциальную энергию магнитной структуры, записана только анизотропная часть потенциальной энергии магнитной структуры. Такой вид формулы, который был приведён в диссертации, связан с тем, что слагаемое $\chi \cdot H^2$ изотропно. Такой вид был выбран в соответствии с работой «Симметрия и макроскопическая динамика магнетиков УФН 130, 39 (1980)» (А.Ф. Андреев и В.И. Марченко). *Ответ на третий вопрос:* это ответ на вопрос об асимптотике ветви с наклоном, пропорциональным корню из разности отношения восприимчивостей и единицы. В случае если восприимчивость при приложении магнитного поля в спиновой плоскости больше, чем восприимчивость при приложении магнитного поля вдоль вектора

\mathbf{n} , знак под корнем действительно получается отрицательным. В этом случае при приведённой конфигурации полей спин-флоп переход не наблюдался бы. Поэтому эта формула неприменима, и ветвь асимптотически приближается к γH . Согласно с тем, что такую ситуацию следовало прокомментировать. *На рисунке 2.4 изображены спектр поглощения в случае прямого детектирования и этот же спектр при модуляции электрического поля в случае синхронного детектирования на частоте модуляции электрического поля (верхняя и средняя панели). Между амплитудой электрического поля и возникающей за счёт него добавкой к магнитному полю имеется линейная зависимость. Тогда почему сигнал поглощения от домена А на средней панели не является производной от соответствующего сигнала на верхней панели?* Этот экспериментальный результат, а именно несоответствие наблюдаемого сигнала ожидаемой производной, действительно был неожиданным. Как описано в разделе 2.6 Обсуждение экспериментальных результатов, наблюдаемый отклик на переменное электрическое поле состоит из двух частей: одна пропорциональна производной резонансной кривой, и связана со сдвигом резонансного поля, как и ожидается, а вторая часть пропорциональна величине поглощаемой образцом мощности, и связана с изменением поглощения при приложении переменного электрического поля. Изменение величины поглощения, вероятно, связано с тем, что электрическое поле меняет размер домена, находящегося в условиях резонанса. Такой эффект имел значительную величину в CuCrO_2 , где присутствует 6 магнитных доменов. *Четвёртый вопрос: Осталось непонятным, почему никак не прокомментированы разные наклоны у прямых.* Это относится к образцу LiCuVO_4 . Измерения величин откликов в данном образце имеют большую погрешность, порядка 15%, как указано с помощью планок погрешностей на этом же рисунке. Отличие наклонов прямых попадает в пределы этой погрешности. Однако я согласна, что этот факт заслуживал отдельного упоминания. *Следовало пояснить, почему формы кривых на средней и нижней панелях рисунка 3.6 не соответствуют производной от сигнала поглощения.* Причина существенного отличия формы отклика от производной на частоте 17.2 ГГц заключается в том, что в данном случае резонансное поглощение наблюдается в окрестности перехода типа спин-флоп. Этот факт, а именно несоответствие отклика производной, показывает, что электрическое поле в данном случае влияет на процесс поворота спиновой плоскости, поэтому вид отклика такой сложной формы и не имеет форму масштабированной производной резонансной кривой. *На мой взгляд следует более осторожно говорить о величинах масштабирующего коэффициента при сравнении сигналов прямого детектирования и синхронного детектирования.* Методика настоящего эксперимента заключается в том, что запись сигнала при прямом детектировании и запись величины осциллирующей части этого сигнала проводятся в рамках одного и того же эксперимента при неизменных условиях. Единственным отличием является опорный сигнал синхронного усилителя. Постоянство величин и направления магнитной компоненты СВЧ-поля в резонаторе обеспечивается стабильностью работы генератора и неизменностью условий проведения эксперимента. *В тексте диссертации несколько раз встречается, что в работе имеет место управление доменной структурой образца. При этом демонстрируется просто подавление доменной структуры.* Магнитная структура исследованных образцов допускает наличие 6 магнитных доменов в случае CuCrO_2 и 2 в случае LiCuVO_4 в отсутствие внешних полей. Приложение магнитного поля достаточной величины позволяет уменьшить число доменов в случае CuCrO_2 до 2, а при приложении электрического поля в образце реализуется домен с единственной ориентацией и направлением вектора \mathbf{n} . С помощью этих полей можно менять направление вектора \mathbf{n} в образцах. Эту возможность мы и называем управлением доменной структурой. Возможно, более определённо было бы заменить «доменной структуры» на «магнитной структуры» в тексте диссертации.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, как оппоненты, удовлетворены?

Официальный оппонент д.ф.-м.н. В.А.П Пятаков Да.

Официальный оппонент д.ф.-м.н. В.В. Демидов Я – да.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Прекрасно. Теперь я предоставляю возможность выступить тем, кто хочет. Так, Александр Иванович.

Д.ф.-м.-н., член-корр. РАН А. И. Смирнов: Ну, я вкратце отмечу только, что для Софьи характерна такая очень деловая и конструктивная манера доклада, поэтому, может быть, изящество этой работы до сих пор не было здесь на нашем сегодняшнем заседании обнаружено. В каждой диссертации – хорошей диссертации – должна быть «изюминка», ну вот у Софьи есть три «изюминки» на мой взгляд, которые следует отметить, которые характеризуют эту диссертацию с самой лучшей стороны. Во-первых, сами структуры антиферромагнитные, которые выбраны, это далеко не стандартные и очень любопытные структуры, их физическая сущность требует анализа той самой фрустрации, о которой речь шла, и спрашивали, и она здесь приводит не к спин-стекловому состоянию, а к вот этим замысловатым состояниям несоизмеримых и неколлинеарных структур, то фрустрация здесь полностью проявляется. И изучение спиновой динамики и вот таких магнитоэлектрических свойств таких структур, разумеется, весьма оригинально и вносит живую струю в некоторую зоологию, характерную для современного магнетизма. Во-вторых, что касается экспериментов, в основе которых лежит электронный спиновый резонанс: «изюминкой» Софьиных экспериментов является модификация электронного спинового резонанса, связанная с тем, что образец подвергается при этом воздействию довольно сильного электрического поля; то есть это сильное электрическое поле надо засунуть в СВЧ-резонатор; СВЧ-резонатор это элементарная, как всем известно, система, в которую завести высоковольтный кабель, намазать электроды на образец – вовсе не так элементарно, как может показаться на первый взгляд. Ну и сама постановка эксперимента: она весьма любопытна по результатам. Софье удалось на этом необычном пути получить ещё и необычный результат. То, что электрическое поле влияет на всё – это, конечно, «всё на всё влияет»: в физике всегда так устроено. Но обычное влияние на спектры частот каких-нибудь колебаний, эффект Штарка, грубо говоря, он квадратичный по электрическому полю. А вот здесь использование таких образцов, в которых задействовано взаимодействие магнитного порядка и электрической поляризации приводит к наличию линейного отклика, и этот линейный отклик был продемонстрирован в эксперименте весьма прямолинейно и, на мой взгляд, убедительно. Ну и третья «изюминка» – это применение теоретического описания этих спектров. Сбылась мечта Владимира Ивановича: ему удалось научить экспериментатора применять гидродинамическую теорию для таких сложных неколлинеарных структур, да ещё и в присутствии электрического поля. И пробиться в описании – я, честно говоря, испытывал абсолютный скепсис по поводу того, что теоретически удастся получить хоть сколько-нибудь применимую формулу для того, чтобы описать влияние электрического поля и связать его с основными параметрами. У них потрясающий результат. Всё выражается через один-единственный независимо измеряемый в других лабораториях параметр – спонтанную поляризацию, и сдвиг эффективный магнитного поля в несколько эрстед, который порождается внешним полем около киловольт, замечательным образом находится в соответствии с независимым образом измеренной электрической поляризацией. Поэтому вот эти три обстоятельства – я перечислил: оригинальный эксперимент, оригинальный результат в области спиновой динамики в присутствии электрического поля, весьма необычные объекты экспериментального исследования и прекрасный теоретический анализ, нацеленный именно на данный конкретный объект с данной симметрией, с данной структурой магнитного упорядочения при наличии электрического поля, – позволили получить весьма успешный результат. Вот, как говорится, от имени тех, кто хочет выступить.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Спасибо. Так, кто ещё хочет? Никто. Хорошо. Теперь я предоставляю слово соискателю для заключительного выступления.

Диссертант С.К. Готовко: Для меня было большим удовольствием проводить эти исследования, и в принципе работать в Институте физических проблем. За эти годы

работа была увлекательной и интересной. Я благодарю своего научного руководителя Леонида Евгеньевича Свистова за руководство, поддержку, наставления, полученные знания и бесценный опыт работы с низкими температурами и СВЧ-техникой. Также я благодарю Владимира Ивановича Марченко за руководство при выполнении теоретического анализа магнитной структуры LiCuVO_4 и поучительные обсуждения. Я признательна сотрудникам нашей группы спиновой динамики, а именно Александру Ивановичу Смирнову, Василию Николаевичу Глазкову, Сергею Сергеевичу Сосину и Тимофею Александровичу Солдатову за помощь и практические советы. Также я благодарна всем сотрудникам Института за бесценную помощь, образование и воспитание.

Председатель совета А.Ф. Андреев Так, спасибо. Теперь мы должны перейти к тайному электронному голосованию. Но, как это допускается нашим регламентом, я объявляю пятиминутный технический перерыв перед голосованием, а потом мы перейдём к голосованию. Пока пять минут перерыв.

К.ф.-м.н. В.Н. Глазков Предупреждает онлайн участников, не являющихся членами диссертационного совета о временном переводе их в электронный зал ожидания, для того, чтобы они не имели возможности участвовать в электронном голосовании. Уточняет, что присутствующие в зале, желающие проголосовать со своих приборов, должны войти в конференцию, те, кто не имеют такой возможности, смогут проголосовать с общего устройства.

Председатель совета А.Ф. Андреев: начинаем электронное голосование.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин: поручает к.ф.-м.н. С.С. Сосину дать инструкции по участию членов диссертационного совета в голосовании.

К.ф.-м.н. С.С. Сосин: даёт инструкции по голосованию для членов совета, находящихся удалённо, и для членов совета, находящихся в зале.

К.ф.-м.н. В.Н. Глазков уточняет, все ли желающие проголосовать с личного устройства, подключились к конференции, все остальные будут голосовать с общего устройства. Запускает голосование. Голосование открыто.

Председатель совета А.Ф. Андреев поручает учёному секретарю обеспечивать членам диссертационного совета доступ к электронному голосованию и следить за его ходом.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин обеспечивает членам диссертационного совета доступ к электронному голосованию и следит за его ходом.

К.ф.-м.н. В.Н. Глазков наблюдает за ходом голосования.

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин: Те, кто онлайн – вам удалось проголосовать? Есть ли кто-то, кто не проголосовал ещё? Хорошо. Тогда голосование завершаем.

Председатель совета А.Ф. Андреев: так, у меня написано следующим пунктом «Учёный секретарь оглашает результаты голосования».

Ученый секретарь совета А.Н. Юдин: 17 человек проголосовали. И 17 – «за». 17 присутствовало.

Председатель совета А.Ф. Андреев: Так, внимание. Теперь мы должны утвердить результаты голосования. Открытым голосованием. Кто за то, чтобы утвердить? Все «за». Дальше, диссертационный совет принимает положительное решение по вопросу о присуждении учёной степени кандидата физико-математических наук Готовко Софье Климентовне, если «за» голосовало не менее двух третей совета, участвовавших в голосовании. Поскольку больше двух третей «за», мы имеем право принять положительное решение. Кто за то, чтобы принять положительное решение? Все. Так. Теперь открытым голосованием мы должны принять заключение совета, которое всем раздали, по электронной почте было разослано всем. Замечаний по содержанию заключения нет ни у кого?

Д.ф.-м.н. А.А. Шашкин: В конце написано: «Соискатель принимал участие в постановке задач исследования», степень участия неясна.

Председатель совета А.Ф. Андреев: В рабочем порядке надо будет исправить. Никто не возражает? Никто не возражает. Принимаем, с одним замечанием, которое прозвучало. (обращается к членам диссертационного совета, участвующим удалённо) Вы должны поднять руки за принятие заключения совета.

Совет открытым голосованием простым большинством принимает текст заключения диссертационного совета по диссертации. На этом заседание совета считается законченным. Председатель предлагает поздравить Готовку Софью Климентовну.

Итог:

Состав диссертационного совета: 21 чел.

Присутствовало на заседании: 17 чел.

Результаты:

За: 17.

Против: нет.

Непроголосовавших: нет.

Председествовавший,
доктор физико-математических наук,
академик



А.Ф. Андреев

А.Ф. Андреев

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

А.Н. Юдин

А.Н. Юдин

« 09 » _____ 11 _____ 2022 г.