

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Савченко Сергея Павловича «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Диссертационная работа С.П. Савченко посвящена теоретическому исследованию особенностей поведения спиновых волн, спектр которых имеет сложную структуру. Исследуется три физические системы. Во-первых, рассматриваются электронно-ядерные спиновые волны. Взаимодействие подсистем здесь приводит к появлению области магнитных полей, в которой часть собственных мод колебаний оказывается запрещенной, а также к вырождению собственных мод, когда при определенном магнитном поле различные собственные моды имеют совпадающие частоты. Во-вторых, рассматриваются ферро- и антиферромагнетики в рамках модели Гейзенберга с учетом влияния ближайшего и следующего за ближайшим окружением. Особенности дисперсии спиновых волн в таких системах обусловлены конкуренцией взаимодействия между первыми и вторыми соседями. В-третьих, изучаются магнитоупругие волны в упругоизотропном ферромагнетике. Для этих волн взаимодействие упругой и магнитной систем проявляется в существенной анизотропии спектра вблизи магнитоакустического резонанса.

Большая часть работы посвящена изучению каустики магнонов. Для исследования этого явления используется метод, разработанный достаточно давно для фокусировки фононов: вводится понятие коэффициента усиления спиновых волн; этот коэффициент может быть выражен через геометрическую характеристику поверхности постоянной частоты — ее гауссову кривизну; точкам, на которой гауссова кривизна обращается в нуль, соответствуют каустики магнонов. Идеологически, задача поиска направлений каустики магнонов эквивалентна исследованию каустики магнонов, но практическое решение этой задачи оказы-

вается намного более сложным: в случае фононов частота пропорциональна волновому числу, и задача сводится к исследованию фазовых скоростей, в случае магнонов и магнитоупругих волн частота зависит от волнового числа нелинейным образом, что приводит к намного более сложным аналитическим выкладкам, необходимости более широкого применения численных методов, и более сложной интерпретации полученных результатов.

**Актуальность и научная новизна** диссертационной работы связаны с тем, что полученные результаты — зависимости направлений каустики от частоты спиновых и магнитоупругих волн, и зависимости положения запрещенной для электронно-ядерных колебаний области магнитных полей от отношения полуосей ферромагнитного сфероида, могут быть на практике при разработке устройств, использующих спиновые волны для передачи информации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений, списка авторских работ по теме диссертации и списка цитированной литературы.

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, обозначены полученные в диссертации новые результаты, раскрыты научная и практическая значимость работы, описана структура диссертации.

**В первой главе** содержатся сведения об основных взаимодействиях в магнетиках. Материал первой главы не является оригинальным, однако эта глава оказалось удобной для практического использования: в ней собраны все необходимые для последующего изложения положения, формулы и приближения.

**Вторая глава** посвящена аналитическому решению задачи о связанных электронно-ядерных колебаниях в ферромагнетиках с анизотропией типа легкая ось и имеющих форму эллипсоида. Получены характеристические уравнения для собственных колебаний, причем оказалось, что уравнения для сжатого эллипсоида, сферы и вытянутого сфероида различны и не могут быть переведены одно в другое. Проанализирована трансформация собственных мод - решений характеристического уравнения, - при изменении внешних параметров: отно-

шения полуосей эллипсоида и величины внешнего магнитного поля. Проведена классификация решений, подробно исследованы особенности колебаний вблизи запрещенной зоны, и установлены условия, при которых собственные моды оказываются вырожденными.

**В третьей главе** исследуются ферромагнетики с кубической кристаллической решеткой (простой кубической, ГЦК и ОЦК), и антиферромагнетики с объемно-центрированной тетрагональной решеткой. Для описания спин-волновой динамики и ферро- и антиферромагнетиков используется модель Гейзенберга, учитывающая влияние первых и вторых соседей. Отношение величин обменных постоянных полагается параметром теории. Эффекты фокусировки изучаются с помощью коэффициента усиления, направления каустики определяются на основе анализа гауссовой кривизны поверхностей постоянной частоты. Проведенное исследование включает: (1) получение областей значений отношения обменных постоянных, при которых возможна каустика в каждой из рассматриваемых систем, (2) поиск условий, при которых реализуется одно направление каустики, и при которых возможно несколько направлений, (3) при заданном отношении обменных постоянных получение диапазона частот, в котором возможна каустика, (4) получение зависимости направления каустики в пространстве волновых числе и в пространстве групповых скоростей от частоты несущей волны.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования фокусировки магнитоупругих волн в упруго - изотропном ферромагнетике. В качестве модельной системы выбран железо - иттриевый гранат ввиду того, что анизотропия его упругой подсистемы довольно мала, и все характеристики ЖИГ известны с хорошей точностью. Кроме того, спиновые волны в ЖИГ являются слабо-затухающими, что позволяет в качестве простейшего приближения в уравнениях магнитной динамики пренебрегать релаксационным членом. Рассмотрены две ситуации: в первой образец полагается массивным, во второй представляет собой пленку толщиной порядка 100 мкм. Выбор такой толщины позволяет приближенно рассматривать волны как объемные и не учитывать граничных

условий, однако при этом необходимо учитывать влияние размагничивающих факторов, и внешнее поле становится сильно отличным от внутреннего. В главе 4 показано, что особенности спектра, приводящие к появлению каустики спиновых волн, возникают лишь в окрестности магнитоупругого резонанса. Для массивных образцов эта область узкая (в приведенных в диссертации расчетах ее ширина составляет 0.3 МГц в поле 1-2 кЭ) и направление каустики слабо зависит от частоты, тогда как в пленках при магнитных полях 2 кЭ ширина области каустики может составлять несколько десятков мегагерц, причем направление каустики при этом меняется в широких пределах и сильно зависит от частоты.

**В заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы работы.

К результатам исследования, представляющих, по мнению оппонента, наибольший интерес, относятся:

1. Разработан и отлажен набор программ, позволяющих определить границы запрещенной для собственных электронно-ядерных колебаний в ферромагнетиках в форме эллипсоида. То, что взаимодействие электронной и ядерной подсистем может привести к появлению диапазона магнитных полей, в котором колебания оказываются невозможными — явление известное, но то, что Савченко С.П. получил ответ: если отношение полуосей эллипсоида равно  $A$ , то мода с индексами  $(n,m)$  существует в полях, меньших  $H_1$  или больших  $H_2$ , и не существует в области от  $H_1$  до  $H_2$ , - представляет интерес для практического использования.

2. Проведенный в третьей главе диссертации анализ возможности каустики магнонов в различных ферро- и антиферромагнетиках может послужить базой для экспериментальных исследований фокусировки магнонов. Несмотря на то, что некоторые модели в главе 3 можно расценивать как фантазии: пока не известно ферромагнетиков с простой кубической кристаллической решеткой, и автор не приводит примеров антиферромагнетиков с отрицательным отношением обменных постоянных, - глава содержит практические рекомендации: если

имеется магнетик с одной из исследованных типов кристаллических решеток, и отношение обменных постоянных отрицательно, то известно, где искать каустику, т. е. какие должны быть магнитные поля, какие частоты волн, и каким окажется направление каустики.

3. В главе 4 диссертации С.П. Савченко рассматривает эффекты фокусировки магнитоупругих волн, имеющих частоты вблизи магнитоупругого резонанса. Выяснилось, что направление наибольшей фокусировки (каустика) не совпадает с симметричными направлениями ( $[100]$ ,  $[001]$ ,  $[101]$ ,  $[111]$ ). В этих системах обычно изучаются лишь волны, распространяющиеся в симметричных направлениях. То, что самые интересные эффекты оказываются за рамками традиционного рассмотрения задачи о магнитоупругих волнах, является интересным результатом, и требует экспериментальной проверки.

В целом, диссертационная работа производит хорошее впечатление. Она выполнена на высоком теоретическом уровне, в ней активно используются как аналитические, так и численные методы. Полученные Савченко С.П. результаты стимулируют дальнейшее развитие теории магнитного транспорта и постановку новых экспериментов.

При прочтении диссертации возникли следующие вопросы и замечания:

1. В главе 2 изучаются электронно-ядерные колебания в  $MnFe_2O_4$ . Обычно, если идет речь о коррелированном движении ядерных спинов, то предполагается, что изучаемые эффекты наблюдаются при низких или сверхнизких температурах. В диссертации же отсутствуют какие-либо рассуждения о температурном диапазоне, в котором могут наблюдаться рассматриваемые эффекты.
2. При выводе характеристического уравнения электронно-ядерных колебаний активно используется аппарат специальных функций, и некоторые моменты работы с ними изложены недостаточно подробно. Например, в уравнении (2.17) потенциал вне эллипсоида выражен явно через функции Лежандра, а потенциал внутри эллипсоида (2.18) - через интеграл от полинома Лежандра. Из этих выражений совсем неясно, как получены выражения для постоянных (2.20) и характеристическое уравнение (2.22).

3. В диссертации исследуются спиновые волны в сложных режимах: электронно-ядерные колебания вблизи запрещенной зоны, спиновые волны вблизи зоны Брюллиэна, магнитоупругие волны вблизи магнитоакустического резонанса. В этих условиях, как правило, начинают проявляться нелинейные свойства спиновых волн. В диссертации все уравнения записаны в линеаризованном виде. На мой взгляд, в работе не хватает обсуждения применимости линейной модели и оценок, для какой амплитуды волн представленные выводы будут справедливы.

4. В диссертации определены лишь направления фокусировки спиновых волн (для магнитоупругих волн определена еще и их поляризация). Хотелось бы в дополнение к этому увидеть обсуждение того, как эффекты фокусировки могут проявляться на эксперименте: например, как можно использовать каустику для передачи информации при помощи спиновых волн, оказывают ли эффекты фокусировки влияние на теплоемкость или теплопроводность, и, если оказывают, то при каких температурах?

Сделанные замечания не носят принципиального характера, носят характер пожелания для дальнейшего исследования, не относятся к основным результатам диссертационной работы и не влияют на общую положительную оценку диссертации, как вполне законченной и актуальной.

Диссертационная работа С.П. Савченко является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задач, имеющих значение для развития физики магнитных явлений. Все положения и выводы диссертации четко сформулированы и строго обоснованы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 9 научных публикациях в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Полученные автором результаты докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях.

Перечисленные аргументы позволяют сделать вывод, что диссертационная работа С.П. Савченко «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах», отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Сергей Павлович Савченко, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,

доктор физ.-мат. наук, профессор

13.09.2021

И.В. Бычков

454001, г. Челябинск,

ул. Братьев Кашириных, 129,

тел.: +7 (351) 799-71-81

e-mail: [bychkov@csu.ru](mailto:bychkov@csu.ru)

Подпись Быčkova И.В. заверяю



С отзывом ознакомлен 21.09.2021

Савченко С.П.

## Сведения об официальном оппоненте

по диссертации Савченко Сергея Павловича «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах» по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет»
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ФГБОУ ВО «ЧелГУ»
Ведомственная принадлежность и тип организации	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, высшее учебное заведение
Место нахождения	454001, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129
Почтовый адрес	454001, Уральский федеральный округ, Челябинская область, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129
Телефон	+7 (351) 799-71-04, 799-71-81
Email	bychkov@csu.ru
Web-сайт	<a href="https://www.csu.ru/">https://www.csu.ru/</a>
Фамилия, Имя, Отчество	Бычков Игорь Валерьевич,
Ученая степень, ученое звание	Доктор физико-математических наук, профессор
Научная специальность	01.04.07 – физика конденсированного состояния
Должность	Проректор по научной работе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет»

## Список публикаций в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Vladimir S. Vlasov Magnetization switching in bistable nanomagnets by picosecond pulses of surface acoustic waves/ Vladimir S. Vlasov, Alexey M. Lomonosov, Anton V. Golov, Leonid N. Kotov, Valentin Besse, Alexandr Alekhin, Dmitry A. Kuzmin, Igor V. Bychkov, and Vasily V. Temnov //Physical Review B 101, 024425 (2020)



2. V. Besse Generation of exchange magnons in thin ferromagnetic films by ultrashort acoustic pulses/ V. Besse, A.V. Golov, V.S. Vlasov, A. Alekhin, D. Kuzmin, I.V. Bychkov, L.N. Kotov, V.V. Temnov // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 502 (2020) 166320
3. Leonid N. Butko Negative group velocity waves in rectilinear thin wires array / Leonid N. Butko, Anton P. Anzulevich<sup>1</sup>, Igor V. Bychkov, Dmitriy A. Pavlov and Sergey G. Moiseev // *J. Phys.: Conf. Ser.* 1092 012016 (2018)
4. Мальцев И.В. Распространение поверхностной магнитоупругой волны в ферромагнетике в области ориентационного фазового перехода / Мальцев И.В., Бычков И.В., Кузьмин Д.А., Шавров В.Г // *Физика твердого тела*, т. 62, с.851, (2020)
5. Бычков И.В. Дифракция плоской электромагнитной волны на микрошаре из VO<sub>2</sub> в области фазового перехода / Бычков И.В., Кузьмин Д.А., Толкачев В.А., Каманцев А.П., Коледов В.В., Шавров В.Г. // *Физика твердого тела*, т. 62, с.885, (2020)
6. Igor V. Bychkov Plasmon mediated inverse Faraday effect in a graphene–dielectric–metal structure / Igor V. Bychkov, Dmitry A. Kuzmin, Valentine A. Tolkachev, Pavel S. Plaksin, and Vladimir G. Shavrov // *Optics Letters* Vol. 43, Issue 1, pp. 26-29 (2018)
7. Svetlana N Anzulevich Theoretical evaluation of the thermostimulated intrinsic radiation in a dipole phase transition / Svetlana N Anzulevich, Anton P Anzulevich and Igor V Bychkov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 1092 012005 (2018)
8. Бычков И.В. Влияние взаимодействия подсистем на динамические свойства магнетиков / И.В.Бычков, Д.А.Кузьмин, В.Д.Бучельников, В.Г.Шавров. - М.: Физматлит, 2016. – С.174.
9. Шавров В.Г. Связанные волны в магнетиках / В.Г. Шавров , В.Д. Бучельников, И.В. Бычков. - М.:Физматлит, 2019. - С.476.
10. Dmitry A. Kuzmin Plasmonics of magnetic and topological graphene-based nanostructures / Dmitry A. Kuzmin, Igor V. Bychkov, Vladimir G. Shavrov and Vasily V. Temnov *Nanophotonics* 7(3):597 (2018)

11. Anton P. Anzulevich Simplified Core-Shell Model of Biochar - Iron Ore Mixture for Calculation of Effective Permittivity and Permeability / Anton P. Anzulevich, Igor V. Bychkov, Vasiliy D. Buchelnikov, Zhi Wei Peng, Zhu Cheng Huang, Bin Xu, Leonid Butko, Svetlana N. Anzulevich, Sergey G. Moiseev // Solid State Phenomena V. 279 p. 240-244 (2018)

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «ЧелГУ»,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

И.В. Бычков



*специальности по кафедре*