

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию **Глущенко Антона Вячеславовича**
**«Квантовые состояния и динамические процессы в магнетиках
со спином $S=1$ и $SU(3)$ симметрией обменного взаимодействия»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.04. 02 – «теоретическая физика»

Диссертация А.В.Глущенко посвящена очень важной и интересной проблеме современной физики конденсированного состояния: исследованию динамики квантовых магнетиков со сложной структурой и различной величиной узельного спина. Интерес к таким задачам, как со стороны теоретиков, так и экспериментаторов, связан со следующим обстоятельством. При теоретическом описании магнитоупорядоченных сред стандартным является использование классических уравнений Ландау-Лифшица, сформулированных (фактически – постулированных) в 1935 году, но прекрасно «работающих» во многих задачах физики магнетизма. В частности, при описании, например, железосодержащих магнетиков с основным магнитным ионом Fe^{+3} со спином $S=5/2$, его вполне можно считать «классическим» и использовать уравнения Ландау-Лифшица. Но явление магнетизма имеет квантовое происхождение, и всегда интересно сравнение классических результатов с квантовыми. Особенно, когда речь идет о магнетиках с небольшой величиной спина, которые являются существенно квантовыми. В этом сравнении возникают важные интригующие параллели. Так, классические уравнения Ландау-Лифшица (для формально бесконечного спина) для одномерного магнетика с изотропным обменом и одноионной анизотропией являются полностью интегрируемыми в смысле начальной задачи Коши (Склянин, Борисов). С другой стороны, квантовая задача об одномерной гайзенберговской цепочке со спинами $1/2$ и с обменной анизотропией также является полностью интегрируемой методом анзаца Бете (Бете, Янг и Янги). При этом спектры связанных состояний большого числа магнонов совпадают.

Сходство результатов нелинейной динамики квантового и классического подходов вызывало большой интерес теоретиков к этой проблеме. Естественно, возник вопрос об увеличении спина магнитных квантовых систем, поскольку при этом система приближается к классической. Квантовые системы с $S > 1/2$, как правило, являются неинтегрируемыми. Но какими будут соответствующие классические модели? В первую очередь, – какие уравнения будут играть роль уравнений Ландау-Лифшица в этом случае? Точно квантовая система, конечно, не сводится к классической, но, используя различные приближения, можно получать некие классические ее аналоги и соответствующие динамические уравнения. Впервые этот вопрос был поставлен, по-видимому, Островским, который показал, что классическим аналогом уравнений Ландау-Лифшица для квантовой системы со спином $S=1$ является система уравнений для величин магнитного и квадрупольного моментов. Позже другими методами (например, с использованием обобщенных когерентных состояний, концепции квазисредних) классические уравнения динамики выводились разными авторами (Боровик, Маханьков, Ковалевский, Андреев и Грищук, Колежук, Иванов и др.). Но, с разными вариациями результат сводится к выводу уравнений со структурой уравнений Ландау-Лифшица $\dot{A}_n = [A_n, \partial H / \partial A_n]$ для

достаточно большого числа параметров порядка A_n . Такой подход дал много интересных результатов: например, описание доменных границ с сокращенной величиной намагниченности в ней. Кроме того, учитывалось влияние магнитной анизотропии, внешнего поля, наличия многих подрешеток.

В последнее время появляется большое число и экспериментальных работ по наблюдению необычных квадрупольных и нематических фаз в твердом теле. Обилие публикаций по экспериментальному и теоретическому изучению систем со спином $S > 1/2$ особенно в последние годы указывает на несомненную **актуальность** данной диссертационной работы. Об актуальности исследований Глуценко А.В. говорит и то, что они были выполнены в Научно-производственном комплексе «Возобновляемые источники энергии и ресурсосберегающие технологии» в рамках тематических планов.

Во всех упомянутых выше примерах исследования магнитных квантовых систем со спином $S > 1/2$ исходным являлся тот или иной частный вид гамильтониана системы. В представленной диссертации используется несколько иной подход.

Его **новизна** связана с тем, что основным является не рассмотрение систем, описываемых тем или иным конкретным гамильтонианом, а учет симметрии рассматриваемой системы – конкретно, группы симметрии $SU(3)$ обменного взаимодействия. При этом приходится сузить круг возможных задач и отказаться, например, от рассмотрения систем с магнитной анизотропией. Но зато – удается более подробно и всесторонне, с учетом широкого класса возможных гамильтонианов исследовать структуру и динамику таких систем. В частности, удается полностью проклассифицировать спиновые, антиферромагнитные, квадрупольные и нематические состояния. В этом состоит **новизна** подхода автора к рассматриваемой проблеме.

Следует также отметить использование концепции квазисредних для работы с системами с вырожденным основным состоянием, усреднение рассматриваемых состояний с использованием статистического оператора Гиббса и разложение матрицы плотности по поляризационным операторам. Наконец, естественно, что все полученные диссертантом результаты являются **новыми и полученными впервые**.

Диссертация включает в себя широкий и полный список литературы по исследуемому предмету и очень подробную и хорошо написанную вводную часть, которая может служить прекрасным пособием по данному вопросу для теоретиков, работающих в других областях теоретической физики. Основные полученные оригинальные результаты подробно описаны в трех главах диссертации и **полностью соответствуют изложению в оригинальных статьях автора**.

В третьей главе изложены первые (по времени публикаций) научные результаты Глуценко для наиболее простой одноподрешеточной модели магнетика со спином $S=1$ и с $SU(3)$ симметрией обменного гамильтониана.

В главе сформулирован подход автора к проблеме, заключающийся в использовании поляризационной матрицы плотности и ее разложения по поляризационным операторам, естественным образом включающим в себя все магнитные параметры порядка: компоненты операторов спина и квадрупольного тензора. Структура возможных магнитных состояний продемонстрирована на примере чистых состояний. Это – (1) чисто квадрупольное симметричное состояние

с тензором квадрупольных моментов типа вытянутого симметричного эллипсоида $Q_{zz} > Q_{xx} = Q_{yy}$; (2) спиново-квадрупольное состояние с ненулевым магнитным моментом и соосным с ним симметричным квадрупольным моментом типа сплюснутого эллипсоида $Q_{zz} < Q_{xx} = Q_{yy}$ и (3) состояния общего вида с расположенными под углом магнитным моментом и квадрупольным моментом типа трехосного ассиметрического волчка.

Наиболее важным результатом этой главы представляется вывод уравнений динамики для полного набора динамических параметров порядка системы. Они имеют стандартный вид $\dot{g}_\alpha = i[g_\alpha, \partial H / \partial g_\alpha]$, представляя квантовый аналог классических уравнений Ландау-Лифшица для произвольного гамильтониана (но, удовлетворяющего симметричным свойствам SU(3)). Однако, вид этих уравнений вытекает из структуры плотности исходного Лагранжиана $L = F_\alpha(\varphi_\beta)\dot{\varphi}_\alpha$, которая фактически постулируется, но имеет вполне естественный вид. С помощью полученных динамических уравнений для некоторых модельных гамильтонианов, удовлетворяющих требованиям симметрии и построенными из операторов Казимира и операторов момента, динамическая задача решена до конца и в линейном приближении получены спектры спиновых, квадрупольных и спиново-квадрупольных волн. Правда, все они оказались вида закона дисперсии изотропного ферромагнетика $\omega \sim k^2$.

Четвертая глава мне показалась наиболее интересной. В ней весь материал третьей главы переносится на случай двух-подрешеточного магнетика со спином $S=1$. Этот вопрос принципиальный. В литературе много упоминаний о квадрупольном магнетике, нематическом магнетике или квадрупольном (нематическом) магнетиках. В некоторых работах предполагается, что это одно и то же. В других этот вопрос обходится стороной. В данной диссертации дан четкий ответ на этот вопрос (правда, для систем с SU(3) симметрией).

Напомню ситуацию в классических одноподрешеточных и двухподрешеточных магнетиках. Одноподрешеточный магнетик описывается вектором намагниченности, для которого справедливы уравнения Ландау-Лифшица. В двухподрешеточном магнетике уравнения Ландау-Лифшица пишутся для двух подрешеток. Из них можно составить одно уравнение Ландау-Лифшица для полного момента и уравнение для вектора (директора) антиферромагнетика (разность двух уравнений Ландау-Лифшица), которое представляет собой в некотором приближении Лоренц-инвариантное уравнение второго порядка по времени (уравнение Барьяхтара-Иванова и Микешки).

В квантовом случае выведенные в главе 3 уравнения записываются для двух подрешеток, т.е., число степеней свободы удваивается. Для каждой подрешетки к вектору намагниченности добавляется квадрупольный тензор. Как и в классике, складывая и вычитая эти уравнения для подрешеток, автор получает обобщенное уравнение для полного вектора намагниченности и суммарного квадрупольного тензора. Оно описывает квазиферромагнитную и квадрупольную динамику системы.

Но другое уравнение (типа классического уравнения для антиферромагнетика) описывает квазиантиферромагнитную динамику и дополнительную динамику

«разности» квадрупольных характеристик. (Такие состояния с Лоренц-инвариантным лагранжианом, названные нематическими, как раз и рассматривались Андреевым и Грищуком). Эта динамика совершенно другая, чем квадрупольная динамика, и ее естественно связать с нематическим магнетиком.

Такой нематический магнетик принципиально отличается от квадрупольного. Это в диссертации очень четко показано, и является важным результатом. Таким образом, общее число магнитных величин удваивается и равно 16. Для них, как и в предыдущем случае получены уравнения типа Ландау-Лифшица, но имеющие более сложную структуру и не обладающей полной симметрией относительно спиновых, квадрупольных и «квазиантиферромагнитных» переменных.

Полученные уравнения динамики использованы для описания на первом шаге простого примера с гамильтонианом обменного взаимодействия, содержащего квадраты градиентов вектора намагниченности и нематической характеристики (типа классического гамильтониана вида $J(\nabla m)^2 + \bar{J}(\nabla l)^2$). Для этого примера подробно рассмотрены все возможные магнито-упорядоченные состояния и спектры линейных волн над ними. Кроме спектров ферромагнитного типа появляются спектры с активацией, вызванной наличием средней намагниченности, относительно которой происходят колебания, и спектры боголюбовского типа (как в легкоплоскостном магнетике).

В более сложном примере с модельным обменным гамильтонианом, содержащем как спиновые характеристики, так и градиенты квадрупольного и нематического тензора, вводимые через инварианты Казимира, ответы более интересные. Такой гамильтониан допускает уже состояния квадрупольного нематика, квадрупольного антиферромагнетика и антиферромагнитного нематика. Все эти состояния исследованы в диссертации, и для них найдены спектры магнитных возбуждений. Интересно появление спектров, характерных для двухосных магнетиков.

Вторая глава посвящена нахождению возможных термодинамически равновесных состояний конденсированных сред со спином $S=1$ и спонтанно нарушенной $SU(3)$ симметрией. Рассмотрение проводится в рамках концепции квазисредних.

В главе определен необходимый набор параметров порядка системы (компонент спинового и квадрупольного моментов) и получены уравнения, решения которых дают весь возможный набор равновесных состояний таких сред.

Интересным представляется то, что кроме пространственно однородных состояний типа ферро-, антиферромагнетика, квадрупольного и нематического магнетиков, разобраны возможные пространственно неоднородные решения типа антиферромагнитных спиралей и нематических плоских пространственно-периодических структур. Это может быть важным для физики магнитных явлений в твердых телах, поскольку эксперименты последнего времени связаны с исследованием большого числа веществ с такой магнитной структурой.

Часть этой главы посвящена также исследованию сверхтекучих магнитных систем со спином $S=1$. Этот раздел очень важен в связи с интенсивным экспериментальным и теоретическим изучением различных бозе-конденсатов в последнее время. Вклад диссертанта заключается в подробном изучении конкретной

системы сверхтекучего нематика, поскольку именно такое состояние было подробно определено и исследовано в четвертой главе диссертации. Поэтому вторая глава имеет важное значение в связи с физическими приложениями развиваемой в диссертации теории.

Таким образом, в диссертационной работе А.В. Глущенко **решена актуальная и важная задача теоретической физики** конденсированного состояния, а именно: сформулирована модель квантовой магнитной системы со спином $S=1$ и $SU(3)$ симметрией обменного взаимодействия, в рамках метода квазисредних предьявлен полный необходимый набор параметров порядка для описания таких систем, для них получены динамические уравнения, обобщающие на случай единичного спина уравнения Ландау-Лифшица, для большого набора постулированных гамильтонианов найден широкий круг возможных состояний равновесия, описывающих ферро- и антиферромагнетики, квадрупольные и нематические среды и комбинации таких состояний, исследованы спектры спиновых и квадрупольных волн над найденными основными состояниями. Обсуждена возможная связь полученных теоретических результатов с экспериментально исследуемыми квадрупольными и нематическими фазами, а также бозе-конденсатами.

Достоверность научных результатов и **обоснованность выводов** не вызывает сомнений, поскольку фундаментом предложенного микроскопического подхода является общепринятая концепция квазисредних и представление об остаточной симметрии. При выводе уравнений динамики используется феноменологический лагранжиан, структура которого также общепринята и не вызывает сомнений. Полученные результаты по классификации возможных состояний системы согласуются с некоторыми данными других авторов и с общими представлениями о ферро-, антиферромагнитном упорядочении и упорядочении квадрупольных и нематических магнетиков. Вычисленные спектры линейных возбуждений также имеют достаточно стандартный вид известных спектров магнитоупорядоченных сред и также не вызывают сомнений.

Практическое значение полученных результатов. Полученные в диссертации динамические уравнения магнитоупорядоченных сред со спином $S=1$ могут быть использованы при решении широкого круга как теоретических, так и экспериментальных и прикладных задач. При этом возможен выход за рамки тех «демонстрационных» гамильтонианов, которые приводятся в диссертации. При решении возникающих конкретных задач исследователи, работающие в данной области, могут использовать полученные в диссертации данные для систем с тем или иным необходимым гамильтонианом (но, разумеется, оставаясь в рамках $SU(3)$ симметрии). Полученные А.В. Глущенко результаты также могут быть использованы для физической интерпретации новых экспериментально наблюдаемых фаз и полученных необычных фазовых диаграмм для мультиферроиков со сложной магнитной структурой, а также данных о квантовых фазовых превращениях (новое интересное направление физики магнитных явлений). Во многих случаях эти данные до сих пор не имеют полноценного физического истолкования. Это же относится и к теоретической интерпретации последних данных, касающихся периодических структур магнетиков и природы различных бозе-конденсатов. Подчеркну, что

перечисленные экспериментально исследуемые магнетики со сложной структурой являются многообещающими для новых технологий, в частности, в области спинтроники и передачи информации.

Результаты диссертационной работы А.В. Глущенко могут быть рекомендованы для ознакомления специалистам таких институтов НАН Украины и университетов МОН Украины, как Институт теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова НАН Украины (г. Киев), Институт магнетизма МОН и НАН Украины (г. Киев), Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко (г. Киев), Институт металлофизики им. Г.В. Кудрюмова НАН Украины (г. Киев), Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина МОН Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (г. Киев), Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины (г. Харьков), Институт радиофизики и электроники им. О.Я. Усикова НАН Украины (г. Харьков).

Замечания к работе:

По материалу диссертации у меня имеется только одно замечание, которое, однако, касается всей работы. Основное содержание диссертации связано с формулировкой физической модели, методов ее исследования, выводу уравнений динамики и изучению в их рамках возможных состояний равновесия систем со спином $S=1$ и законов дисперсии линейных волн над этими основными состояниями. Но при этом недостаточно внимания уделяется подробному обсуждению полученных результатов. При перечислении возможных состояний равновесия не обсуждается характер этих состояний (например, ориентация моментов спинов и квадруполь для большинства случаев). При получении пространственно неоднородных состояний ничего не говорится о направлениях и характере вращения векторов спина и квадруполь в этих состояниях (спиральное вращение и циклоидное плоское вращения). Наконец, приведено большое число разнообразных спектров линейных волн, и для некоторых состояний имеются одна, две или три ветви спектра. При этом ничего не говорится о характере колебания векторов параметров порядка в этих колебаниях: какие компоненты колеблются, какая ориентация колебаний и их симметрия и т.д. Диссертация выиграла - бы, если бы автор разобрал полностью и до конца хотя бы один из рассмотренных случаев. (Правда, при этом диссертация содержала бы результат, отсутствующий в текстах публикаций).

Однако эти замечания носят скорее субъективный характер, поскольку я, например, обычно уделяю большее внимание полному и всестороннему обсуждению результатов на уровне, который позволяет их использование не специалистами в данной области, в частности, экспериментаторами. Но возможны и другие подходы к изложению научных результатов. Сам вывод в данной диссертации динамических уравнений и предъявление их возможных основных состояний и малых возбуждений над ними уже достаточны для полноценной кандидатской диссертации. Поэтому приведенные замечания не влияют на общую позитивную оценку работы А.В. Глущенко.

В целом, диссертационная работа А.В. Глущенко выполнена на высоком научном уровне и использует современные методы теоретической физики. Она

является завершенным теоретическим исследованием и в ней получены новые результаты, которые имеют важное научное и практическое значение. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.02 – «теоретическая физика». Основные результаты диссертации полностью изложены в 8 статьях, опубликованных в ведущих научных журналах и докладывались на многих международных научных конференциях. Диссертация хорошо оформлена, материал работы изложен квалифицированно и ясно. Автореферат полностью отражает содержание и выводы диссертации.

По актуальности темы, новизне, научной значимости результатов, их достоверности и обоснованности выводов, диссертационная работа А.В. Глущенко «Квантовые состояния и динамические процессы в магнетиках со спином $S=1$ и $SU(3)$ симметрией обменного взаимодействия» полностью соответствует требованиям, которые предъявляются к кандидатским диссертациям, в частности пунктам 9, 11 и 12 Постановления МОН Украины, «Порядка присуждения научных степеней», а её автор Глущенко Антон Вячеславович, несомненно, заслуживает присуждения ему научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика».

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
отдела теоретической физики
Физико - технического института
низких температур им. Б.И. Веркина
НАН Украины

А.С. Ковалев

Подпись профессора Ковалева А.С. удостоверяю:
Ученый секретарь Физико-технического института
низких температур им. Б.И. Веркина
НАН Украины,
кандидат физико-математических наук



А.Н. Калиненко