

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Тельнова Дмитрия Александровича на диссертацию Волчковой Анны Михайловны на тему «Эффект Зеемана и сверхтонкое расщепление в бороподобных многозарядных ионах с ненулевым спином ядра», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертация А. М. Волчковой посвящена разработке методов расчёта и проведению вычислений квадратичного и кубического по магнитному полю вкладов в эффект Зеемана, а также вычислению константы ядерного магнитного экранирования для гелие-, литие- и бороподобных ионов. Тема диссертации, безусловно, актуальна на данном этапе развития атомной и ядерной физики, поскольку совместное теоретическое и экспериментальное изучение  $g$ -фактора является мощным инструментом для определения фундаментальных констант и параметров ядер, тестирования квантовой электродинамики и поисков новой физики.

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения, Списка сокращений и условных обозначений и Списка литературы. Объем диссертации вместе с английским переводом составляет 187 страниц. Во Введении формулируются цели и задачи работы, даётся краткий обзор современного состояния исследований по теме диссертации. Там же содержатся положения, выносимые на защиту. Главы с первой по пятую посвящены описанию физических явлений, изучаемых в работе, а также теоретических и вычислительных методов решения поставленных задач. Глава 6 содержит результаты расчётов нелинейных вкладов в  $g$ -фактор и константы ядерного магнитного экранирования для гелие-, литие- и бороподобных ионов и их обсуждение.

В диссертации А. М. Волчковой были получены с высокой точностью результаты для квадратичного и кубического вкладов в эффект Зеемана и константы ядерного магнитного экранирования для гелие-, литие- и бороподобных ионов. Все проведённые расчёты включали в себя межэлектронное взаимодействие в первом порядке теории возмущений с использованием экранирующего потенциала в нулевом приближении. Полученные результаты важны для интерпретации экспериментов по высокоточному определению  $g$ -фактора многозарядных ионов. Нелинейный эффект Зеемана важен в астрофизике, это связано с наличием сильного магнитного поля в звёздных объектах. Его учёт как источника систематических сдвигов также важен для атомных часов, магнитометров и других высокоточных приборов, которые используются в эксперименте. Важным результатом работы А. М. Волчковой является также развитие метода конечного поля на основе процедуры А-ДКБ для решения уравнения Дирака в аксиально симметричном внешнем поле.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. В работе используются два основных метода расчёта: теория возмущений и метод конечного поля на основе численной процедуры А-ДКБ. Согласие результатов, полученных разными методами, служит дополнительным подтверждением надёжности выполненных расчётов. В этой связи, однако, у меня возникло два вопроса:

33-06-489 от 17.04.2023

а) Если внешнее магнитное поле, представляющее интерес для расчётов, является настолько сильным, что существенную роль начинают играть высшие нелинейные поправки в эффект Зеемана, почему анализ результатов проводится в рамках методологии теории возмущений? Казалось бы, более естественным подходом в данном случае является сравнение просуммированного ряда теории возмущений с предсказаниями метода конечного поля, а не вычленение степенных вкладов из результатов метода конечного поля, которое связано с неизбежной погрешностью численного дифференцирования.

б) В чем преимущество использования подхода А-ДКБ по сравнению с традиционным разложением по базису сферических спиноров, если речь идёт об атомарных ионах и в любом случае используются сферические координаты?

2. На с. 29, где вводится специальная разность  $g$ -факторов разных зарядовых состояний одного изотопа, неплохо было бы пояснить, почему вычисление специальной разности позволяет уменьшить погрешность, связанную с ядерными эффектами.

3. На с. 36 формулы (4.24) и (4.25) оказываются неверными, если присутствующая в них величина  $\rho$  имеет смысл обычной электронной плотности, как это заявлено в тексте.

4. На с. 40 формула (5.8) вызывает недоумение. В случае комплексной матрицы гамильтониана эта формула просто ошибочна. Если же матрица вещественна, означает ли использование формулы (5.8), что эта матрица по каким-то причинам оказывается несимметричной и требуется искусственная симметризация?

5. На с. 42 формулы (5.13) и (5.14) не согласованы с видом оператора Гамильтона в формуле (5.2). По всей видимости, имеет место смешение разных систем единиц. Кроме того, знак перед первой производной в формуле (5.14) неверный.

6. На с. 43 идёт речь об операторе «полного орбитального момента». Термин явно неудачный. На самом деле это полный угловой момент, равный сумме орбитального и спинового моментов.

7. Выражение для оператора  $\Lambda$  на с. 44 не согласовано с видом оператора Гамильтона в формуле (5.2).

8. Небольшие расхождения между результатами теории возмущений и метода конечного поля в таблицах гл. 6 объясняются конечным размером базиса в процедуре А-ДКБ и погрешностью численного дифференцирования. Подразумевает ли подобное утверждение, что результаты теории возмущений более точны и являются предпочтительными?

9. В тексте встречаются опечатки (см., например, с. 3, 17, 29) и неудачные выражения вроде «кусочного многочлена» на с. 41.

Перечисленные выше замечания не снижают общий высокий уровень диссертационной работы А. М. Волчковой. Автор работы продемонстрировала глубокие знания предмета исследования и подтвердила высокую квалификацию физика-теоретика. Полученные А. М. Волчковой результаты соответствуют мировому уровню и вносят существенный

вклад в развитие атомной физики. Достоверность результатов и научная обоснованность выводов, представленных в диссертации, определяется применением апробированных теоретических подходов, а также согласием полученных результатов с результатами теоретических исследований и численных расчётов других авторов. Результаты диссертации нашли отражение в 6 публикациях в ведущих научных журналах, включая Physical Review Letters; они неоднократно докладывались на конференциях и семинарах и хорошо известны научной общественности.

Диссертация Волчковой Анны Михайловны на тему: «Эффект Зеемана и сверхтонкое расщепление в бороподобных многозарядных ионах с ненулевым спином ядра» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Волчкова Анна Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, доцент,  
профессор кафедры квантовой  
механики СПбГУ



Тельнов Д. А.

10.04.2023



10.04.2023