

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Ромодиной Марии Николаевны**

**на тему: «Микромеханика магнитных частиц в лазерных ловушках и  
магнитооптические эффекты при возбуждении блоховских  
поверхностных волн»**

**по специальности 01.04.21 – «лазерная физика»**

На изучении микрочастиц – природных и искусственных – фокусируются и переплетаются интересы многих наук. Трудно перечислить варианты, классы, типы объектов, подпадающих под это определение, сюда входит всё: от минеральных дисперсий в промышленных стоках до суспензий живых клеток и бактерий. Этим частицам присущи различные геометрические формы, они имеют разнообразные механические, тепловые, электрические и магнитные свойства, обладают совершенно различным химизмом и демонстрируют множество вариантов взаимодействия с своим окружением.

Однако все микрообъекты имеют универсальные черты поведения, которые накладывает на них малость размера – это броуновское движение, вызывающее хаотическое поступательное перемещение и вращение отдельной частицы или диффузионное расплывание их роя. В условиях межчастичного взаимодействия и трансляционная и ориентационная диффузия – это сложные концентрационно-зависимые процессы.

Очевидно, что знание характеристик броуновского движения реальных микрочастиц, в том числе взаимодействующих – фундаментальный вопрос, с которого начинается решение любой технологической задачи.

Большая часть работы М. Н. Ромодиной посвящена детальному изучению свойств броуновского движения интереснейшего класса смарт-объектов – магнитных микросфер (ММС). Наличие магнитной сердцевины сообщает ММС дистанционную управляемость, а химическая нейтральность оболочки, гарантируя высокую биосовместимость, что

позволяет пришивать к поверхности макромолекулы самых различных типов: белки, ферменты, нуклеиновые кислоты, антитела и т.д. По этой причине у ММС уже имеют широкое применения, в первую очередь, в медицине, как диагностической, так и терапевтической (тераностика). Тем самым, **актуальность темы работы** не вызывает сомнений.

Фундаментальным моментом, обеспечившим успех исследования ММС, является использование лазерного пинцета. Как показано М.Н. Ромодиной в Главах 2 и 3 диссертации, с помощью этой экспериментальной техники можно с высокой точностью удерживать на месте или перемещать микросферу в жидкости, при этом отслеживая её флуктуации в широкой спектральной полосе. Ещё более информативен эксперимент, в котором задействована пара идентичных ММС и каждой управляет свой лазерный пинцет. Здесь в полной мере удаётся использовать возможности корреляционной спектроскопии.

Магнитное поле служит внешним параметром, изменение которого по величине и направлению, позволяет варьировать условия эксперимента, прикладывая к частице и измерять малые (единицы пиконьютонов) силы. Всё это Автор проделала экспериментально, объяснила качественно и подтвердила теоретическим расчётом. В диссертации и автореферате соответствующее положение, выносимое на защиту представлено в формулировке: «Кросс-корреляционная функция броуновских смещений микрочастиц вдоль линии, соединяющей их положения, зависит от производной силы их магнитного взаимодействия...». Я нахожу его вполне **обоснованным** и обладающим **новизной**.

Важный момент, который хочу отметить отдельно. «Большой вопрос» использования ММС – хоть лабораторного изготовления, хоть коммерческих – степень сходства/различия магнитных свойств экземпляров из одной и той же партии. На первый взгляд, поскольку наполнителем ММС являются частицы феррита (в данном случае, магнетита) с размером порядка 10 нм, то вследствие их суперпарамагнетизма микросфера должна обладать

высокой магнитной восприимчивостью, но не должна иметь остаточной намагниченности.

Однако, если, что в реальных ММС наночастицы (1) неоднородно распределены по объёму и (2) полидисперсны, то приходим к выводу, что наличие у микросферы постоянного магнитного момента следует предполагать всегда, речь может идти лишь о его величине. Другая особенность, которая может значительно влиять на динамику ММС в переменном поле – это геометрическая несферичность. Даже при полном отсутствии постоянного магнитного момента, такая ММС обладает «врождённой» анизотропией магнитной восприимчивости.

Хочу заметить, что разработанная техника, очень подходит, а, скорее, является единственным способом обнаружения и измерения указанных индивидуальных особенностей ММС. Легко понять, например, что во вращающемся поле моменты сил, действующие на ММС с постоянным намагниченностью или с анизотропной восприимчивостью, по-разному зависят от амплитуды поля. Всё это может быть проверено и установлено при манипуляциях с ММС посредством лазерного пинцета.

Тщательно выполнено исследование вращательного движения ММС. Частица фиксируется лазерным пинцетом, а вращение возбуждается индуктором с переменным направлением магнитного поля. С помощью этой техники удаётся полностью проследить переход (с повышением круговой частоты поля) от синхронного режима вращения частицы к асинхронному, буквально прописать всю траекторию. При этом точности измерений с запасом хватает на то, чтобы увидеть и «размазку» кроссовера режимов, обусловленного броуновской вращательной диффузией частиц.

Важным достижением, **обладающим всеми признаками новизны**, является обнаружение и количественное исследование эффекта бокового сноса вращаемой полем ММС в случае, когда удерживающий её лазерный пинцет совершает прямолинейное движение. Хотя возникающую силу не нужно было называть силой Магнуса, физическое объяснение её природы правильно – это термофорез. Более того, М.Н. Ромодина как раз и доказала,

что в области размеров и скоростей, где она проводила эксперименты, термофоретический поперечный дрейф ММС на порядок-полтора мощнее, чем совпадающая с ним по функциональной зависимости ( $\propto (\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega})$ ) сила Магнуса.

Глава 4 посвящена объяснению идеи, постановке и решению теоретической задачи, а также – что очень важно – экспериментальному доказательству возможности магнитооптического переключения блоховской поверхностной волны в магнитофотонном кристалле. Этот сложный и объёмный «полный цикл» работ выполнен полностью и с высокой квалификацией, эффект представлен исчерпывающе. То, что эксперимент дал лишь качественный результат, и в нём не удалось достичь теоретически предсказанных значений параметров переключения, никак не умаляют **достоверности** проделанного исследования. (Я с позицией автора – дело в качестве образца и никак не в недостатке квалификации.) В целом, результаты Главы 4 **обладают новизной в области лазерной физики**, а выводы, сделанные диссертантом я считаю вполне **обоснованными**.

Отмечу как сугубо положительный момент развёрнутое представление результатов работы – видно, что это делалось последовательно, в процессе её выполнения – и в журнальных статьях в изданиях, входящих в базу Web of Science, и на авторитетных профильных конференциях.

#### Сущностные замечания по содержанию диссертации.

1. Терминология. Как уже упомянуто выше, термофоретический дрейф не следует называть силой Магнуса. Последняя является изотермическим эффектом, одним из следствий закона Бернулли; в то время как обнаруженное и изученное в диссертации явление обусловлено неоднородным нагревом частицы. Другое дело, что обнаруженный эффект по своим параметрическим зависимостям имеет сходство с формулой Магнуса.
2. Вопрос о природе магнитного момента микросферы в присутствии поля разъяснён, с моей точки зрения, недостаточно. В принципе, нужно подозревать существование трёх составляющих: постоянный момент

(имеет неизменные величину и направление внутри ММС), индуцированный полем магнитный момент в предположении об изотропном распределении наночастиц (определяется величиной восприимчивости) и индуцированный полем в частице с анизотропной восприимчивостью (определяется величина последней и направлением главных осей соответствующего тензора внутри ММС). Адекватная теоретическая модель должна учитывать все три вклада. Фитирование экспериментальных зависимостей, измеренных при нескольких значениях поля, должно дать способ разделить указанные вклады. А это, в свою очередь, позволит оптимизировать схемы и протоколы магнитных измерений над микросферами. Я уверен, что такой результат был бы очень востребован среди тех, кто занимается этой темой.

Из малых замечаний.

1. В формуле (35)  $k'$  – это не вектор, как сказано в тексте, а набор диагональных компонент матрицы тензорного градиента.
2. В формуле (34) для пондеромоторной силы должен стоять оператор градиента, а не оператор Лапласа. Ну, это, понятно, опечатка, не более.
3. Название уравнения (50) следует уточнить: это «уравнение **плоского** углового движения магнитной частицы».
4. Каким методом или с помощью каких пакетов решались стохастические уравнения в Главах 2 и 3 нигде не уточнено.
5. Рис. 48 и аналогичные ему. Цвет соответствует величине коэффициента отражения. Однако для того, чтобы сопоставлять цвету числовые значения нужна цветовая шкала. На рисунке она отсутствует, но, очевидно, она есть, иначе нельзя было бы построить картинку.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.21 – «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1-

2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Ромодина Мария Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией физики и механики мягкого вещества,  
Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Райхер Юрий Львович

подпись

21.02.2018 Дата

Контактные данные:

тел.: +7(342) 237 83 23, e-mail: raikher@icmm.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.07 – Физика твёрдого тела

Адрес места работы:

614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, д. 1,  
ИМСС УрО РАН

Тел.: +7 (342) 237-84-61; e-mail: mvp@icmm.ru

Подпись Райхера Юрия Львовича удостоверяю:

Учёный секретарь ИМСС УрО РАН  
канд. физ.-мат. наук



Н. А. Юрлова