

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Чубукова Дмитрия Валерьевича на тему: «Нарушение фундаментальных симметрий в атомах и молекулах:  $P, T$ -нечетный эффект Фарадея и  $P$ -нечетная оптическая активность», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02. —

Теоретическая физика

Исследования фундаментальных взаимодействий и нарушений дискретных симметрий в “настоельных” низкоэнергетических экспериментах с использованием атомной и молекулярной спектроскопии сверхвысокого разрешения в настоящее время успешно конкурируют с традиционными для физики частиц дорогостоящими высокоэнергетическими экспериментами на ускорителях. Однако как выбор объектов для спектроскопических экспериментов и их постановка, так и извлечение информации о  $P$ - и  $P, T$ -нечетных взаимодействиях из результатов измерений требуют предварительных теоретических данных или данных численных экспериментов как о наиболее перспективных объектах, так и о некоторых параметрах молекулярных систем, измерение которых затруднительно или практически невозможно. Это обстоятельство обуславливает **актуальность** темы диссертационного исследования Д.В. Чубукова - теоретического анализа эффектов нарушения как пространственной четности, так и инвариантности относительно обращения времени в атомных и простых молекулярных системах, в том числе эффектов слабого электрон-электронного взаимодействия, слабого электрон-ядерного взаимодействия за счет нейтральных слабых токов, зависящего от спина ядра, а также  $P, T$ -нечетного эффекта Фарадея.

Во введении, предпосланном основному содержанию работы, необходимо отметить исключительный по сжатости и информативности раздел “Степень разработанности темы исследования”, имеющий, на мой взгляд, самостоятельную ценность.  $P$ -нечетные эффекты в молекулах, не зависящие от ядерного спина, изучаются **в первой главе** диссертации. При помощи релятивистских расчетов электронной структуры установлено, что для молекулы кислорода слабое электрон-электронное взаимодействие мало по сравнению со слабым электрон-ядерным взаимодействием и его экспериментальное наблюдение затруднительно. Напротив, показана перспективность молекулы параводорода как кандидата для наблюдения  $P$ -нечетного электрон-электронного взаимодействия в области низких энергий. Отмечена возможность высокоточного определения угла Вайнберга на основании измерения характеристик  $P$ -нечетных эффектов в этой системе. Представленный во **второй главе** анализ эффекта несохранения пространственной четности электрон-ядерного взаимодействия, зависящего от спина ядра, в двухатомной молекуле ортоводорода, позволил диссертанту сделать вывод о возможности его экспериментального наблюдения. **Третья глава** посвящена возможному использованию измерения оптического вращения для поиска  $P, T$ -нечетных взаимодействий в атомах Cs, Tl, Pb, Ra, Xe и Hg. Определены коэффициенты усиления электрического дипольного момента электрона ( $eEDM$ ), амплитуды  $E1$  и  $M1$  переходов, выполнено теоретическое моделирование  $P, T$ -нечетного фарадеевского эксперимента с этими атомами с использованием внутриволостной лазерной абсорбционной спектроскопии (ICAS). Наконец, **в четвертой главе** теоретически обоснована целесообразность постановки эксперимента по измерению  $eEDM$ , основанного на наблюдении  $P, T$ -нечетного эффекта Фарадея при помощи ICAS и молекулярного пучка PbF.

Представленное диссертантом исследование является полностью *оригинальным*. Им получен большой объем *новой научной информации*, к которой следует отнести установление перспектив использования молекул пара- и ортоводорода для регистрации нарушающих четность взаимодействий, независимых от спина ядра / зависящих от спина ядра соответственно, новый подход к измерению  $eEDM$  посредством наблюдения  $P, T$ -нечетного эффекта Фарадея для молекул или атомов во внешнем электрическом поле с использованием техники ICAS, демонстрацию возможности значительного уточнения верхних границ характеристик интенсивности  $P, T$ -нечетных эффектов, включая величину  $eEDM$ , в ICAS-экспериментах с пучком молекул  $PbF$ .

*Практическая ценность и научная значимость* результатов диссертации для дальнейших, в первую очередь экспериментальных, исследований фундаментальных взаимодействий и поисков физики за пределами Стандартной модели заключается в рекомендациях по выбору объектов и детальной проработке параметров возможных экспериментов, разработке высокочувствительного и надежного подхода к определению  $eEDM$ , оценке возможности экспериментального наблюдения эффекта слабого электрон-электронного и слабого электрон-ядерного взаимодействия в легких двухатомных гомоядерных молекулах. Отмечу также самостоятельную ценность разработанного соискателем программного кода для расчета матричных элементов  $P$ -нечетного электрон-электронного взаимодействия. Следует ожидать, что полученные диссертантом результаты будут способствовать запуску новой серии экспериментальных исследований эффектов нарушения дискретных симметрий и, в частности, установлению новых ограничений на значение  $eEDM$ .

*Достоверность* полученных в диссертации результатов и сделанных на их основании выводов достигнута благодаря логичности и внутренней непротиворечивости теоретических построений автора, использованию наиболее надежных и продвинутых релятивистских технологий компьютерного моделирования атомных и молекулярных систем, сопоставлением промежуточных данных, получаемых в ходе исследования, с наиболее достоверными экспериментальными и теоретическими оценками соответствующих величин. Не преувеличивая эффективности современного института рецензирования рукописей научными журналами, я все же считаю дополнительным подтверждением достоверности результатов успешное прохождение этой процедуры многочисленными статьями по тематике представленной работы в наиболее авторитетных изданиях.

Работа не вызывает у меня сколько-нибудь серьезных *замечаний*, за исключением следующего. Матричные элементы  $P, T$ -нечетных взаимодействий обычно чувствительны к качеству описания многоэлектронной волновой функции в окрестностях и в пределах атомного ядра. В работе указывается, что для такового описания использовался код DIRAC, известный отсутствием реализации физически осмысленных моделей зарядового распределения ядер (имеется только гауссова модель), что сказывается на прогнозируемом поведении электронной волновой функции в указанной области. Осталось неясным, повлияло ли это обстоятельство на полученные результаты. Я не считаю возможным приводить в отзыве замечания филологического толка, поскольку ни один из неудачных оборотов не искажает смысл текста.

Текст диссертации компактен, логично построен, удобен для восприятия и самодостаточен. Материалы работы послужили основой серии публикаций в журналах высокого уровня.

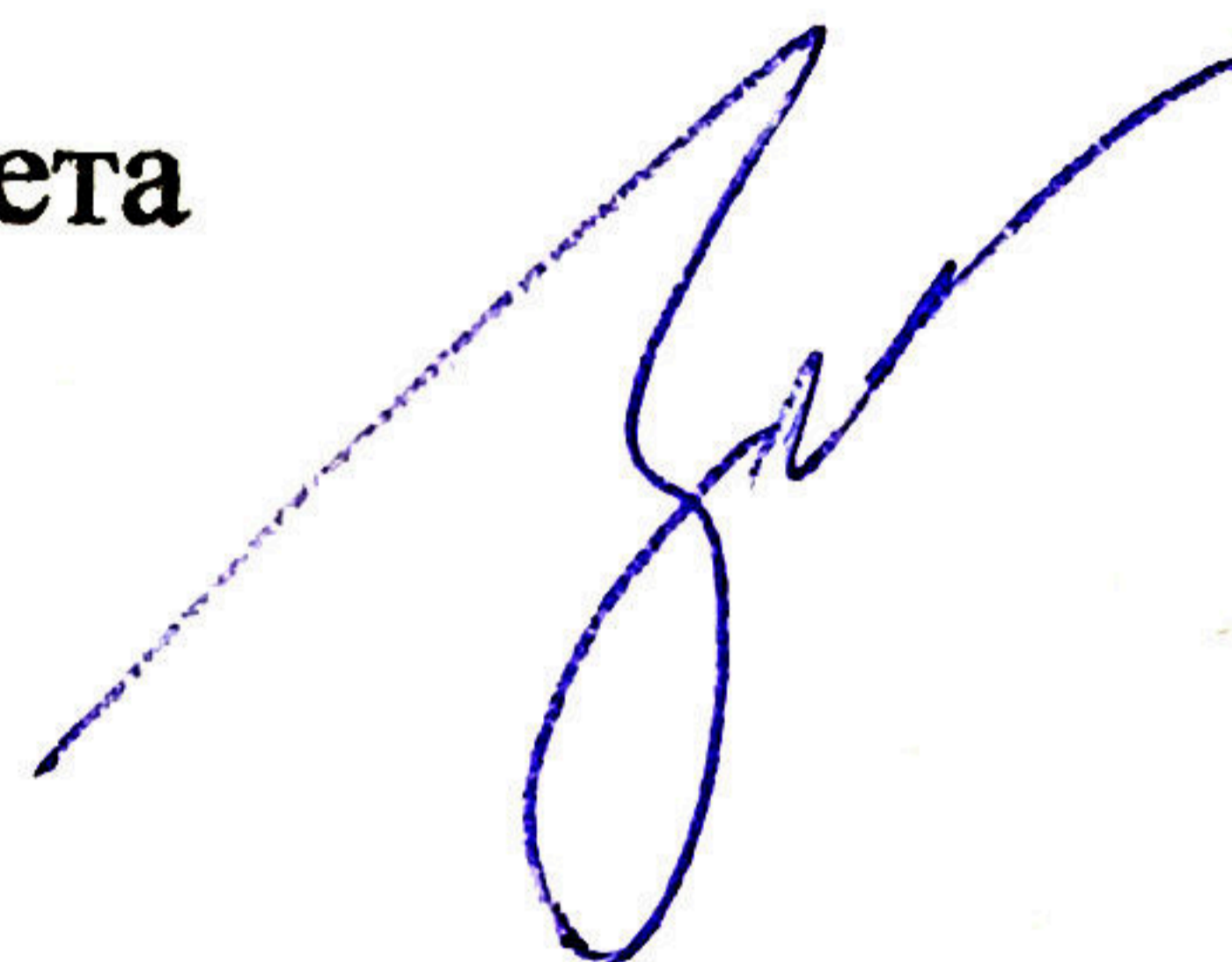
Диссертация Чубукова Дмитрия Валерьевича на тему: «Нарушение фундаментальных симметрий в атомах и молекулах:  $P,T$ -нечетный эффект Фарадея и  $P$ -нечетная оптическая активность» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Чубуков Дмитрий Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - Теоретическая физика. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник

кафедры лазерной химии химического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова



А.В. Зайцевский

1 июня 2020 года