

# ОТЗЫВ

официального оппонента Катаева Андрея Львовича на диссертацию

Сорокина Вячеслава Вадимовича

«Уровни энергии мюонного дейтерия в квантовой электродинамике», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Диссертация Сорокина В.В. посвящена исследованию тонкой и сверхтонкой структуры спектра атома мюонного дейтерия в рамках квазипотенциального подхода в квантовой электродинамике. **Актуальность** темы диссертации, в первую очередь, связана с большим экспериментальным интересом к мюонным и электронным водородоподобным атомам. Эксперимент по лазерной спектроскопии атома мюонного водорода, выполненный в Paul Scherrer Institute (Швейцария) международной коллаборацией CREMA (Charge Radius Experiments with Muonic Atoms) в 2010 году, позволил получить новое, на порядок более точное значение зарядового радиуса протона  $r_p = 0.84087(39)$  фм. Однако новое значение зарядового радиуса оказалось на 7 стандартных отклонений меньше значения CODATA, представляющего собой усреднение данных по спектроскопии электронного водорода и электрон-протонному рассеянию. Выполненный коллаборацией CREMA в 2016 году эксперимент по спектроскопии мюонного дейтерия также показал расхождение со значением CODATA в 7.5 стандартных отклонений. После обнаружения данного расхождения различными научными группами были выполнены новые эксперименты по спектроскопии электронного водорода, которые дали противоречивые результаты по зарядовому радиусу протона. В связи с этим встает важный вопрос корректности трактовки данных новых экспериментов и оценки неопределенностей, а также точного теоретического расчета тонкой и сверхтонкой структуры легких мюонных атомов. В работе В.В. Сорокина теоретические значения сверхтонкой структуры атома мюонного дейтерия получены на уровне точности, предъявляемой

коллорацией CREMA. Ряд важных вкладов в тонкую и сверхтонкую структуру мюонного дейтерия вычислен в диссертации впервые, что подчеркивает **новизну** работы.

Диссертация Сорокина В.В. состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, который содержит 151 наименование, и трех приложений.

**Введение** содержит обоснование актуальности работы, краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов по изучению легких мюонных атомов, цели исследования, обоснование научной новизны работы, положения, выносимые на защиту, описание апробации полученных результатов и их практической значимости.

**Первая глава** диссертации посвящена расчету сверхтонкой структуры  $S$ -состояний атома мюонного дейтерия. Представлено краткое изложение основных положений квазипотенциального подхода в квантовой электродинамике, дан подробный анализ современных экспериментальных результатов по легким мюонным атомам. Выполнен расчет эффектов однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума в первом, втором и третьем порядках теории возмущений для  $S$ -состояний с использованием явного вида редуцированной кулоновской функции Грина. Представлены поправки на структуру и отдачу ядра в однофотонном и двухфотонном взаимодействии. Также в данной главе на основе стохастического вариационного метода с коррелированным гауссовым базисом выполнен новый расчет сверхтонкой структуры мезомолекулярных ионов водорода, которые представляют собой трехчастичные связанные состояния двух ядер изотопов водорода и отрицательно-заряженного мюона.

Во **второй главе** представлен детальный расчет сверхтонкой структуры  $2P$ -состояния атома мюонного дейтерия. Учтены эффекты поляризации вакуума, вклад квадрупольного взаимодействия, релятивистские поправки в первом, втором и третьем порядках теории возмущений. Впервые вычислена поправка на поляризацию вакуума в квадрупольном взаимодействии. Расчеты

сверхтонкой структуры P-состояний мюонного дейтерия, представленные в работе, на порядок превосходят точность предыдущих расчетов других авторов.

**Третья глава** посвящена расчету радиационных поправок в тонкой и сверхтонкой структуре спектра мюонного дейтерия с учетом структуры ядра. Учтена поправка на собственную энергию, вершинная поправка и поправка с охватывающим фотоном. Для радиационных фотонов была выбрана калибровка Фрида-Йенни, что позволило получить инфракрасно-конечные выражения для каждой из поправок в отдельности, а не только для их суммы. При построении квазипотенциала по амплитуде взаимодействия использован метод проекционных операторов.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

**Достоверность** обеспечивается хорошим согласием с результатами расчета отдельных поправок, полученных в других работах, а также согласием полученной в диссертации величины сверхтонкого расщепления 2S-состояния мюонного дейтерия с экспериментальными результатами коллаборации CREMA. Диссертационная работа В.В. Сорокина показывает, что развитие квазипотенциального подхода, проводившееся на протяжении почти что 20-летнего периода XX века в первую очередь в ЛТФ ОИИЯИ (г. Дубна), позволяет проводить крайне актуальные в настоящее время высокоточные расчеты характеристик связанных состояний в КЭД. Надежность квазипотенциального подхода подтверждается рядом недавних работ теоретиков из Испании, в которых в рамках эффективной теории поля – нерелятивистской квантовой электродинамики – независимо воспроизводятся некоторые результаты квазипотенциального метода.

В рецензируемой диссертации замечены следующие **недостатки**:

- В разделе 1.1 на странице 12 при упоминании соотношения Гелл-Мана-Лоу отсутствует ссылка на статью М. Гелл-Мана и его ученика Ф. Лоу «Bound states in quantum field theory», Phys. Rev. **84**, 350 (1951);

- В разделе 1.3 на странице 28 при обсуждении теоретических вкладов КЭД в аномальный магнитный момент мюона отсутствует обсуждение результатов важной работы T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio Complete Tenth-Order QED Contribution to the Muon  $g-2$ , Phys. Rev. Lett. **109**, 111808 (2012), в которой суммированы результаты длительных численных компьютерных расчетов вкладов 8-го и 10-го порядков теории возмущений КЭД в эту фундаментальную величину.
- Из текста диссертации трудно понять, как определяется теоретическая погрешность полученных автором результатов вычисления сверхтонкой структуры атома мюонного дейтерия;

К достоинствам диссертации можно отнести детальный обзор и понимание диссертантом экспериментальной ситуации, использованием современных компьютерных методов аналитических вычислений, к сожалению, без создания собственных пакетов. Также необходимо отметить впервые полученное в диссертации в разделе 1.5 аналитическое выражение для поправки на поляризацию вакуума в случае мезо-молекулярных ионов водорода, записанное через редко встречающиеся в аналогичных вычислениях по теории возмущений в КЭД и КХД  $G$ -функции Мейера, что может подтолкнуть математиков к более детальному изучению свойств таких функций. Важно подчеркнуть, что результаты, полученные В.В. Сорокиным, уже использовались в работах коллаборации CREMA для сравнения с полученными этой коллаборацией конкретными новыми экспериментальными данными и цитируются различными теоретическими и экспериментальными группами.

Диссертация Сорокина В.В. представляет собой законченное исследование. Приведенные замечания не снижают общую высокую оценку основательной работы. Результаты диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах и многократно докладывались на

всероссийских и международных конференциях. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Основные выводы диссертации, результаты и методы работы могут быть использованы и уже используются коллаборацией CREMA, сотрудниками научных групп, работающих в ОИЯИ, СПбГУ, ВНИИМ имени Д.И. Менделеева, ПИЯФ имени Б.П. Константинова, Пулковской обсерватории г. Санкт-Петербурга и в ряде ведущих зарубежных научных центрах Польши, Швейцарии, Германии, США и Канады.

Диссертация Сорокина В.В. «Уровни энергии мюонного дейтерия в квантовой электродинамике» полностью соответствует требованиям пункта 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней». Ее автор, Сорокин Вячеслав Вадимович, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Дата: 31.10.2019 г.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

ведущий научный сотрудник

отдела теоретической физики

А.Л. Катаев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук,

117312 Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

тел.: (499) 783-92-91 ; e-mail: [kataev@ms2.inr.ac.ru](mailto:kataev@ms2.inr.ac.ru)

Подпись Катаева Андрея Львовича удостоверяю.

Зам. директора ИЯИ РАН

д.ф.-м.н., профессор РАН

Рубцов Г. И.

**Катаев Андрей Львович**, доктор физико-математических наук.

Специальность – 01.04.02 теоретическая физика.

Список основных публикаций по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.L. Kataev, A.E. Kazantsev, K.V. Stepanyantz On-shell renormalization scheme for N=1 SQED and the NSVZ relation, Eur.Phys.J. C **79**, 477 (2019)
2. A.L. Kataev, V.S. Molokoedov Dependence of Five- and Six-Loop Estimated QCD Corrections to the Relation between Pole and Running Masses of Heavy Quarks on the Number of Light Flavors, JETP Lett. **108**, 777 (2018)
3. I.O. Goriachuk, A.L. Kataev, K.V. Stepanyantz A class of the NSVZ renormalization schemes for N=1 SQED, Phys.Lett. B **785**, 561 (2018)
4. A.L. Kataev, V.S. Molokoed From perturbative calculations of the QCD static potential towards four-loop pole-running heavy quarks masses relation, J.Phys.Conf.Ser. **762**, 012078 (2016)
5. S.S. Aleshin, A.L. Kataev, K.V. Stepanyant Structure of three-loop contributions to the  $\beta$ -function of N=1 supersymmetric QED with  $N_f$  flavors regularized by the dimensional reduction, JETP Lett. **103**, 77 (2016)
6. A.L. Kataev, V.S. Molokoedov Fourth-order QCD renormalization group quantities in the V scheme and the relation of the  $\beta$  function to the Gell-Mann–Low function in QED, Phys.Rev. D **92**, 054008 (2015)