

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор  
Объединенного института  
ядерных исследований  
академик РАН В.А. Матвеев

---

«\_\_15\_\_» \_\_ноября\_\_ 2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации "Объединенный институт ядерных исследований" (ОИЯИ) на диссертационную работу 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.

Изучение простейших водородоподобных (ВП) атомных систем играло и играет важнейшую роль в построении современной теории фундаментальных взаимодействий. Так открытие лэмбовского сдвига между  $2S_{1/2}$  и  $2P_{1/2}$  уровнями атома водорода в 40-х годах 20-го века было определяющим для создания современной релятивистской квантовой электродинамики (КЭД), основополагающей теории современных моделей фундаментальных взаимодействий. Лэмбовский сдвиг возникает за счет взаимодействия вакуумных флуктуаций электромагнитного поля и электронами, находящимися на разных орбиталях. Сразу после экспериментального открытия (W. Lamb and R. Retherford (1947), Колумбийский Университет, США), Н. Bethe показал, что Лэмбовский сдвиг связан с радиационными поправками к потенциалу водорода, т.е. существованием виртуальных фотонов, предсказанных в КЭД.

Современная эпоха измерения Лэмбовского сдвига в ВП началась после публикаций в 2010-2013 годах наиболее точных измерений тонкой и сверхтонкой структуры спектра энергии мюонного водорода коллаборацией CREMA (Charge Radius Experiment with Muonic Atoms) в (PSI, Швейцария). Мюонный эксперимент, благодаря более тяжелой массе мюона, гораздо более чувствителен к извлечению значений радиуса и других структурных параметров протона. В результате было получено значение зарядового радиуса протона на порядок точнее, чем было известно из спектра водорода и данных по электрон-протонному рассеянию. Что более удивительно, это значение отличается от значения радиуса, полученного из электронных данных, на 7 стандартных отклонений и до настоящего времени это различие не имеет разумного объяснения. В 2016 году CREMA опубликовала данные по мюонному дейтерию.

Было показано, что сохраняются те же проблемы и в этом случае. Поэтому интрига в экспериментальном и теоретическом изучении спектроскопии ВП сохраняется.

Таким образом можно сказать, что теоретическое изучение спектров простейших ВП атомов является фундаментальной проблемой в КЭД, стандартной модели (СМ) и одним из инструментов поиска новых взаимодействий вне СМ. Актуальность диссертации В.В. Сорокина связана именно с оригинальными, наиболее точными расчетами уровней мюонного дейтерия в КЭД и поэтому должны учитываться при сравнении экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов в КЭД.

Основу диссертации В.В. Сорокина составляют результаты теоретических работ, выполненных в соавторстве с профессором А.П. Мартыненко, одним из мировых лидеров по проведению такого рода расчетов.

Основным методом получения результатов, представленных в диссертации, является хорошо известный специалистам квазипотенциальный подход, применяемый для описания связанных состояний в КЭД.

Целью диссертационной работы В.В. Сорокина является прецизионный аналитический и численный расчет тонкой и сверхтонкой структуры спектра мюонного дейтерия в КЭД, возможный благодаря малости константы взаимодействия.

Диссертация изложена на 141 странице, состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений. Список литературы содержит 151 наименование.

Во **введении** обсуждается актуальность экспериментального и теоретического изучения спектроскопии легких ВП для проверки КЭД и СМ. Приведены цель работы, научная новизна и ее практическая значимость. Очерчен личный вклад автора, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведен список публикаций, на которых основана диссертация. Кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** изложены основы квазипотенциального подхода в КЭД, подробно представлены история и современное состояние теоретического и экспериментального изучения спектроскопии легких мюонных атомов.

Параграфы 1.3-1.5 содержат оригинальные новые результаты, полученные автором. В частности, вычислены поправки порядка  $\alpha^5$  и  $\alpha^6$  для сверхтонкой структуры S-состояний в мюонном дейтерии на поляризацию вакуума, структуру ядра и отдачу, радиационные поправки в первом, втором и третьем порядках теории возмущений.

В этой же главе исследована сверхтонкая структура основного состояния мезомолекулярных ионов водорода ( $p\mu$ ,  $t\mu$ ,  $td\mu$ ). Вычисления выполнены с применением стохастического вариационного метода в квантовой механике с гауссовыми базисными функциями.

**Вторая глава** диссертации посвящена вычислениям аналогичных поправок для сверхтонкой структуры P- состояний в мюонном дейтерии. Вычислены поправки порядка  $\alpha^4$  и  $\alpha^5$  для P-состояний в мюонном дейтерии на поляризацию вакуума, структуру ядра и отдачу, квадрупольное взаимодействие, радиационные поправки в первом, втором и третьем порядках теории возмущений.

Большая часть вычислений выполнена аналитически, получены конкретные ито-

говые значения для сверхтонкой структуры  $2P$ -состояния мюонного дейтерия. Где это возможно, результаты сравнивались с результатами более ранних работ.

**Третья глава** диссертации посвящена вычислению радиационных поправок в лептонную линию к двухфотонным обменным амплитудам порядка  $\alpha(Z\alpha)^5$  в сверхтонкой структуре и лэмбовском сдвиге атома мюонного дейтерия.

В параграфах 3.1, 3.3 вычислены радиационные поправки в лептонную линию к двухфотонным обменным амплитудам порядка  $\alpha(Z\alpha)^5$  в сверхтонкой структуре атома мюонного дейтерия без учета и с учетом эффекта отдачи ядра.

В параграфе 3.2 представлен расчет радиационных поправок к двухфотонным обменным амплитудам порядка  $\alpha(Z\alpha)^5$  в лэмбовском сдвиге атома мюонного дейтерия.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В целом, полученные в диссертации результаты по точности превосходят теоретические результаты, полученные ранее. Достоверность результатов обеспечивается использованием строгих математических методов и хорошим согласием с результатами расчета отдельных поправок, полученных в других работах. Полученные результаты базируются на использовании квазипотенциального метода, который успешно применяется при описании связанных состояний в КЭД. Рассчитанная в данной работе величина сверхтонкой структуры  $2S$ -состояния мюонного дейтерия согласуется с экспериментальными результатами коллаборации CREMA. Новые результаты, полученные в работах, на которых основана диссертация, должны быть дополнительно учтены при сравнении с экспериментальными данными коллаборации CREMA и в новых планируемых экспериментах.

Представленная диссертация является плодом многолетней работы В.В. Сорокина в коллективе авторов, являющимся одним из лидеров в прецизионных вычислениях для связанных состояний в КЭД. Выполнено большое число сложных, рекордных по точности вычислений. Все новые результаты по расчету уровней энергии мюонного дейтерия, представленные в диссертации, получены лично автором или в неразделимом соавторстве. Результаты работ, на которых основана диссертация, неоднократно докладывались В.В. Сорокиным на международных конференциях.

В целом диссертация написана ясно и представляет хороший обзор как по текущему состоянию проблемы, так и по описанию оригинальных и эффективных теоретических методов расчетов.

В качестве критических замечаний можно отметить следующее:

- В работе В.В. Сорокина вычислены различные поправки по теории возмущений к уровням энергии мюонного дейтерия, но из текста диссертации не всегда понятно, какие поправки являются новыми, а какие уже вычислялись ранее другими авторами.
- В Главе 3 диссертации вычислялись радиационные поправки в тонкой и сверхтонкой структуре спектра энергии. При этом использовалась калибровка Фрида-Йенни для радиационных фотонов. В тексте диссертации не обсуждается, зависит ли конечный ответ от вида калибровки.

В то же время указанные замечания не влияют на общую высокую оценку работы, посвященной актуальным научным проблемам и выполненной на высоком научном уровне.

Текст автореферата диссертации правильно отражает ее содержание. Все результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных журналах с высоким импакт-фактором. Материалы диссертации многократно докладывались автором на международных конференциях по физике высоких энергий. Работы, на основании которых написана диссертация, широко цитируются в научной литературе. Результаты диссертации могут быть использованы при анализе ведущихся и планировании будущих экспериментов в ведущих научных центрах (PSI, Швейцария) и других.

Диссертация В.В. Сорокина "Уровни энергии мюонного дейтерия в квантовой электродинамике" представляет собой законченное научное исследование по весьма актуальной теме, отвечает всем требованиям Высшей аттестационной комиссии, установленным в п.9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней утвержденной постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335, в части, касающейся кандидатских диссертаций, а ее автор Вячеслав Вадимович Сорокин, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02–Теоретическая физика.

Материалы диссертации заслушаны и одобрены на заседании тематического научного семинара "Физика адронов" в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (ЛТФ ОИЯИ) 11 июня 2019 года.

Директор ЛТФ ОИЯИ  
член-корреспондент РАН

Д.И. Казаков

Отзыв составил:

ведущий научный сотрудник ЛТФ ОИЯИ  
доктор физико-математических наук  
Тел.: +7(49621) 6-27-30  
e-mail: dorokhov@theor.jinr.ru

А.Е. Дорохов

Сведения о ведущей организации:

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований

Адрес организации:

141980, Российская Федерация, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

Тел.: +7 (49621) 6-50-59

e-mail: post@jinr.ru

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

- A.E. Dorokhov, A.P. Martynenko, F.A. Martynenko, A.E. Radzhabov *The Contribution of the Sigma-Meson to the Lamb Shift of Muonic Hydrogen* Phys.Part.Nucl.Lett. 16, 520-523 (2019)
- D.T. Aznabaev, A.K. Bekbaev, V.I. Korobov *Nonrelativistic energy levels of helium atom* Phys.Rev. A 98, 012510 (2018)
- D.T. Aznabayev, A.K. Bekbaev, V.I. Korobov *The Hyperfine Structure of the Ground State in the Muonic Helium Atoms* Phys.Part.Nucl.Lett. 15, 236-239 (2018)
- S.G. Karshenboim, V.G. Ivanov, V.I. Korobov *Low energy levels in neutral muonic helium within a nonrelativistic approach* Phys.Rev. A 97, 022504 (2018)
- A.E. Dorokhov, A.A. Krutov, A.P. Martynenko, F.A. Martynenko, O.S. Sukhorukova *Hyperfine structure of S-states in muonic ions of lithium, beryllium and boron* Phys.Rev. A 98, 042501 (2018)
- A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev, A.P. Martynenko, F.A. Martynenko, A.E. Radzhabov *The contribution of axial-vector mesons to hyperfine structure of muonic hydrogen* Phys.Lett. B 776, 105-110 (2018)
- A.E. Dorokhov, N.I. Kochelev, A.P. Martynenko, F.A. Martynenko, R.N. Faustov *The contribution of pseudoscalar mesons to hyperfine structure of muonic hydrogen* Phys.Part.Nucl.Lett. 14, 857-864 (2017)
- D. Bardin, Ya Dydyska, L. Kalinovskaya, L. Romyantsev, A. Arbuzov, R. Sadykov, S. Bondarenko *One-loop electroweak radiative corrections to polarized Bhabha scattering* Phys.Rev. D 98, 013001 (2018)
- L.T. Hue, A.B. Arbuzov, T.T. Hong, T. Phong Nguyen, D.T. Si, H.N. Long *General one-loop formulas for decay  $h \rightarrow Z\gamma$*  Eur.Phys.J. C 78, 885 (2018)
- V.I. Korobov, A.K. Bekbaev, D.T. Aznabayev, S.A. Zhaugash *Polarizability of the pionic helium atom* J.Phys. B 48, 245006 (2015)
- D.T. Aznabayev, A.K. Bekbaev, I.S. Ishmukhamedov, V.I. Korobov *Energy levels of a helium atom* Phys.Part.Nucl.Lett. 12, 689-694 (2015)
- A.B. Arbuzov, T.V. Kopylova *On higher order radiative corrections to elastic electron-proton scattering* Eur.Phys.J. C 75, 603 (2015)