

**Отзыв** официального оппонента **Жуковского Владимира Чеславовича** 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.

Диссертационная работа Сорокина В.В. содержит подробный расчет *тонкой и сверхтонкой структуры атома мюонного дейтерия*, выполненный с использованием квазипотенциального метода в квантовой электродинамике, предложенного А.А. Логуновым и А.Н. Тавхелидзе. Тема диссертации является **актуальной**, в связи с результатами экспериментов коллаборации CREMA (Charge radius experiment with muonic atoms) при исследовании уровней энергии легких мюонных атомов методами лазерной спектроскопии. Эксперимент по спектроскопии атома мюонного водорода, выполненный коллаборацией CREMA в 2010 году, позволил получить новое, на порядок более точное значение зарядового радиуса протона, которое оказалось на семь стандартных отклонений меньше, чем полученное ранее значение CODATA (Committee on Data for Science and Technology). Дальнейшие измерения зарядового радиуса дейтрона также отличаются от значения CODATA на семь стандартных отклонений. Оценка величины зарядового радиуса ядра путем измерения лэмбовского сдвига уровней мюонного атома предполагает проведение прецизионных теоретических расчетов тонкой и сверхтонкой структуры спектра соответствующего атома. В этой связи крайне важным становится точный и последовательный теоретический расчет уровней энергии легких и мюонных атомов с учетом большого числа поправок. Теоретический расчет уровней энергии легких электронных и мюонных атомов, как и ионов оказывается чрезвычайно важной и актуальной задачей в связи с указанными, а также другими различиями в результатах измерения зарядового радиуса.

Таким образом, **новизна** диссертационной работы заключается в том, что целый ряд важных поправок в спектре энергии мюонного дейтерия вычислен в работе В.В. Сорокина впервые. **Достоверность** результатов обеспечивается

согласием величины отдельных поправок, полученных в диссертации, с результатами других работ, использованием надежного квазипотенциального подхода в квантовой электродинамике и хорошим согласием величины сверхтонкого расщепления 2S-состояния мюонного дейтерия с экспериментальным значением коллаборации CREMA.

Диссертация Сорокина В.В. состоит из Введения, трех Глав, Заключения, списка литературы, содержащего 151 наименование, и трех Приложений.

**Введение** посвящено обоснованию актуальности работы, раскрытию цели и задач исследования, научной новизны работы, положений, выносимых на защиту, описанию апробации результатов диссертации, их достоверности и практической значимости.

В **первой главе** диссертации подробно рассматривается вычисление сверхтонкой структуры 1S- и 2S-состояний мюонного дейтерия. Параграф 1.1 содержит основные положения квазипотенциального подхода в квантовой электродинамике, который используется автором работы для прецизионного расчета уровней энергии мюонного дейтерия. Важной особенностью диссертации является то, что в ней содержится развернутый анализ актуальных экспериментальных результатов по спектроскопии легких мюонных атомов (параграф 1.2). В параграфах 1.3, 1.4 представлен расчет поправок за счет *поляризации вакуума, релятивизма, структуры ядра и отдачи* в S-состояниях атома мюонного дейтерия. В диссертации учтены вклады пятого и шестого порядка по постоянной тонкой структуры в первом, втором и третьем порядках теории возмущений, что обеспечивает высокую точность расчета сверхтонкого расщепления. В параграфе 1.5 на основе стохастического вариационного метода выполнен расчет сверхтонкой структуры мезомолекулярных ионов водорода. При этом учтены поправки на *поляризацию вакуума, структуру ядра и релятивизм*. Заметим, кстати, что, как показано в ранних работах Брейта, Теллера и других авторов, *последовательный учет релятивистских членов* оказывается важным также и при *расчетах радиационных переходов в атоме*

водорода, когда дипольный переход  $2S \rightarrow 1S$  запрещен, а для магнитного излучения с учетом релятивизма он становится возможным.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена расчету *сверхтонкой структуры* P-состояний мюонного дейтерия. В параграфе 2.1 выполнен расчет эффектов *однопетлевой и двухпетлевой поляризации вакуума* в первом, втором и третьем порядках теории возмущений в диагональных и недиагональных матричных элементах. Параграфы 2.2 и 2.3 посвящены вычислению поправки на квадрупольное взаимодействие без учета и с учетом эффектов поляризации вакуума.

В **третьей главе** обсуждается важный класс поправок в тонкой и сверхтонкой структуре S-состояний легких мюонных атомов – радиационные поправки к двухфотонным амплитудам с учетом структуры ядра. При вычислении таких поправок в диссертации используется калибровка Фрида-Йенни для радиационных фотонов и техника проекционных операторов для удобства построения квазипотенциала по амплитуде взаимодействия. Параграфы 3.1, 3.3 содержат расчет радиационных поправок к сверхтонкой структуре S-состояний мюонного дейтерия как без учета, так и с учетом эффектов отдачи. Параграф 3.2 посвящен расчету *радиационных поправок к лэмбовскому сдвигу мюонного дейтерия*.

Как показано в **Заключении** основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В сверхтонкой структуре S-состояний мюонного дейтерия вычислены поправки порядка пятого и шестого порядков по постоянной тонкой структуры ( $\alpha^5$  и  $\alpha^6$ ). Учтены поправки на поляризацию вакуума, структуру ядра.

2. В сверхтонкой структуре P-состояний мюонного дейтерия вычислены поправки на поляризацию вакуума и квадрупольное взаимодействие. Здесь следует отметить, что в диссертации впервые вычислена поправка на поляризацию вакуума в квадрупольном взаимодействии. По сравнению с предыдущими вычислениями сверхтонкой структуры 2P-состояния мюонного дейтерия учтено также большое число новых поправок.

3. Радиационные поправки к двухфотонным обменным амплитудам порядка  $\alpha(Z\alpha)^5$  в сверхтонкой структуре и лэмбовском сдвиге атома мюонного дейтерия рассчитаны с учетом структуры ядра. При этом численный расчет проводится с использованием современной параметризации формфакторов дейтрона.

4. При исследовании сверхтонкой структуры основного состояния мезомолекулярных ионов водорода применяется стохастический вариационный метод.

В **Приложениях А, Б** подробно представлено получение релятивистских поправок к сверхтонкой структуре спектра мюонного дейтерия, неприводимые тензорные операторы и связанные с ними соотношения. **Приложение В** содержит явный вид редуцированной кулоновской функции Грина для S- и P-состояний.

К **достоинствам** диссертации следует отнести подробное изложение всех существенных промежуточных расчетов, а также использование компьютерных методов расчета фейнмановских амплитуд. Следует подчеркнуть, что результаты, полученные В.В. Сорокиным и представленные в его диссертации, использовались в работах коллаборации CREMA для сравнения с экспериментальными данными. Об этом говорит тот факт, что эти результаты цитируются теоретическими и экспериментальными группами, связанными с указанными исследованиями.

К **недостаткам** диссертационной работы можно отнести следующее:

- в работе на стр. 31 (формулы 1.44-1.46) подробно обсуждается поправка за счет поляризации вакуума к кулоновскому взаимодействию частиц в потенциале, однако в случае сверхтонкого взаимодействия детали расчетов, приведших к потенциалам (1.47), (1.50), не приводятся;
- поправка на адронную поляризацию вакуума в сверхтонкой структуре S-состояний, представленная в таблице 1, в тексте работы не обсуждается;
- на стр. 87 упоминаются работы [121,124,130,131], в которых также был проведен расчет радиационных поправок в лептонную линию, однако

детальное обсуждение результатов этих работ их сравнение с результатами рецензируемой диссертационной работы не проводится.

Подводя итоги, заметим, что диссертационная работа В.В. Сорокина представляет собой законченное исследование по важной современной тематике. Приведенные выше замечания несколько не снижают общую высокую оценку диссертации. Основные представленные к защите результаты являются новыми, их достоверность не вызывает сомнений. Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации докладывались на всероссийских и международных научных конференциях и опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах.

Результаты диссертационной работы В.В. Сорокина используются экспериментальной коллаборацией CREMA и могут быть использованы другими научными группами, работающими в ИЯИ РАН, ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, ФИАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, СПбГУ, ВНИИМ имени Д.И. Менделеева, ПИЯФ имени Б.П. Константинова и в других научных центрах.

Представленная диссертация «Уровни энергии мюонного дейтерия в квантовой электродинамике» отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Сорокин Вячеслав Вадимович, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Дата: 4.12.2019

Доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры теоретической физики

В.Ч. Жуковский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова», 119234 Москва, ул. Ленинские Горы, 1, стр. 2.

тел.: (495) 939-16-82 ; e-mail: vlchzh@gmail.com

Подпись профессора В.Ч. Жуковского заверяю:

Декан физического факультета МГУ, профессор

Н.Н. Сысоев

**Жуковский Владимир Чеславович**, доктор физико-математических наук,  
профессор. Специальность 01.04.02 — Теоретическая физика.

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

- 1) 2014 A pseudopotential model for Dirac electrons in graphene with line defects  
Ebert D., Zhukovsky V.Ch, Stepanov E.A.  
в журнале Journal of Physics Condensed Matter, издательство  
Institute of Physics Publishing (United Kingdom), том 26, №  
12, с. 125502-125509 2014
- 2) 2015 Interplay between superconductivity and chiral symmetry breaking in a (2+1)-dimensional model with a compactified spatial coordinate  
D. Ebert, T. G. Khunjua, K. G. Klimenko, V. Ch. Zhukovsky. Apr 11, 2015. 16 pp.  
Published in Phys.Rev. D91 (2015) 10, 1050242014
- 3) 2017 Inhomogeneous charged pion condensation in chiral asymmetric dense quark matter in the framework of a NJL<sub>2</sub> model  
Khunjua T.G., Klimenko K.G., Zhokhov R.N., Zhukovsky V.Ch  
в журнале Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology,  
издательство American Physical Society (United States), том 95, № 105010 DOI
- 4) 2017 Superconductivity in chiral-asymmetric matter within the (2  $\mathit{+}$  1)-dimensional four-fermion model  
Zhukovsky V.Ch, Klimenko K.G., Khunjua T.G.  
в журнале MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN, том 72, № 3, с. 250-256
- 5) 2017 Vacuum current induced by an axial-vector condensate and electron anomalous magnetic moment in a magnetic field  
Bubnov A. F, Gubina N. V, Zhukovsky V. Ch  
в журнале Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology, издательство American Physical Society (United States), том 96, с. 016011
- 6) 2018 В.Ч.Жуковский, Метафизика, 2018, N2, (28), стр. 49-54,  
Единство природы: объединение теоретических методов изучения физических явлений в микро- и макрофизике и космологии.  
Zhukovsky V.Ch., Unity of nature: unification of theoretical methods of study of physical effects in micro- and macrophysics and cosmology  
Метафизика, 2018, N2, (28), стр. 49-54

7) 2018 V.Ch. Zhukovskii, O.D. Pozdnyakova, V.D. Krevchik, M.B. Semenov, A.V. Shorokhov, Moscow University Physics Bulletin, 2018, Vol. 73, No. 2, pp. 211–215.  
© Allerton Press, Inc., 2018.

Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 3:

Fizika, Astronomiya, 2018

Влияние параметра Маккамбера на параметрическое усиление  
высокочастотного излучения контактами Джозефсона

В. Ч. Жуковский, О. Д. Позднякова, В. Д. Кревчик, М. Б. Семенов,  
А. В. Шорохов

Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2018. № 2. С. 89

8) 2019 Безмассовая квазичастица в графене в постоянном магнитном поле и  
поле электромагнитной волны, Дурандина И.С., Жуковский В.Ч.

в журнале Ученые записки физического факультета  
Московского Университета, том 6, 2019