

## Отзыв

официального оппонента кандидата физико-математических наук Лычагина Егора Валерьевича на диссертацию **Куприяновой Екатерины Александровны «Гравитационные состояния в ультрахолодных квантовых системах»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Диссертация Куприяновой Е. А. посвящена теоретическому исследованию поведения ультрахолодных атомов антиводорода в гравитационном поле Земли над материальной поверхностью. Проведенный теоретический анализ данной квантовой системы, включающий определение параметров квантовых состояний атома антиводорода (энергии уровней, времена их жизни) в системе, позволяет предложить эксперимент по наблюдению гравитационных квантовых состояний атомов антиводорода при помощи резонансного индуцирования переходов между ними. Далее в работе предлагается использовать измерение резонансных частот для определения величины гравитационной массы антиводорода с высокой точностью. Предложена принципиальная схема эксперимента, проведены расчёты систематических эффектов и оценена точность возможного измерения.

Данная проблема является весьма **актуальной**. В настоящее время изучение антиводорода стало возможным благодаря недавнему технологическому прогрессу по синтезу и хранению атомов антиводорода в ЦЕРНе. Проведенные в диссертации исследования являются составной частью планируемого в ЦЕРНе эксперимента GBAR/AD-7. Полученные в работе результаты, несомненно, будут востребованы при планировании эксперимента, создании экспериментальной установки, при интерпретации и анализе результатов измерений. Целями данного эксперимента являются изучение гравитационных свойств атомов антиводорода, получение величины гравитационной массы антиводорода с высокой точностью и, соответственно, проверка выполнения слабого принципа эквивалентности для антиводорода. Задача исследования гравитационных свойств антивещества на теоретическом уровне, как и любое исследование, затрагивающее самые фундаментальные законы природы (в данном случае речь идёт о проверке справедливости слабого принципа эквивалентности для антивещества), является актуальной сама по себе. Для антиатомов подобные эксперименты являются новыми, и они представляют особый интерес, так как позволяют проверить гравитационную эквивалентность частиц и античастиц.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и перечня цитируемой литературы, содержащего 76 источников. В диссертации содержится 16 рисунков и 6 таблиц. Общий объем диссертации составляет 102 страницы.

Во **введении** приведена общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы исследования. Здесь ставятся задачи и цели работы, описывается научная новизна и теоретическая и практическая значимость проведенного исследования. Также введение содержит краткое описание глав диссертации.

**Первая глава** содержит обзор литературы, посвященной гравитационным состояниям ультрахолодных атомов антиводорода в гравитационном поле Земли вблизи материальной поверхности. Рассматривается проблема взаимодействия ультрахолодного антиводорода с проводящей поверхностью, которое характеризуется явлением квантового надбарьерного отражения.

Во **второй главе** предлагаются способы возбуждения резонансных переходов между гравитационными состояниями антиводорода. Рассмотрены возбуждение переходов при помощи гармонического колебания поверхности вещества и гармонического изменения градиента внешнего магнитного поля. Предложена принципиальная схема эксперимента для измерения гравитационной массы атома антиводорода.

**Третья глава** посвящена исследованию эффекта сдвига резонансной частоты, обусловленного выбранным спектроскопическим методом. Вклад этого эффекта в точность определения гравитационной массы оказывается наиболее существенным.

В **четвертой главе** подбирается наилучшая отражающая поверхность, которая позволит повысить точность спектроскопических измерений и определения гравитационной массы. Оценивается влияние различных систематических эффектов (разрушения гравитационных квантовых состояний антиводорода под действием остаточных электрических зарядов на поверхности, разрушение состояний за счет индуцированной аннигиляции и за счет индуцированных переходов в возбужденные состояния) на точность определения гравитационной массы в эксперименте. Исследовано влияние шероховатостей реальной поверхности, на положение и ширину гравитационных уровней антиводорода над проводящей поверхностью. Описан эффект влияния взаимодействия с поверхностью на частоты переходов между квантовыми гравитационными состояниями антиводорода.

**Заключение** содержит основные результаты диссертации.

Хочется отметить, что прецизионные эксперименты с ультрахолодными квантовыми системами (ультрахолодные нейтроны, ультрахолодные атомы) являются уникальным источником информации о фундаментальных взаимодействиях и инструментом для поиска новых взаимодействий, предсказываемых теориями, выходящими за рамки Стандартной Модели. Предложение, использовать определение резонансных частот переходов между квантовыми состояниями антиводорода в гравитационном поле Земли, является чрезвычайно интересным и перспективным развитием этой области исследований

**Новизна результатов диссертации.**

Предложен новый подход к исследованию гравитационных свойств антиводорода, основанный на спектроскопии гравитационных квантовых состояний атомов антиводорода в гравитационном поле Земли над проводящей поверхностью с помощью индуцирования резонансных переходов между состояниями под действием переменного неоднородного магнитного поля или под действием вибрации поверхности.

В работе впервые изучается целый ряд эффектов, приводящих к погрешностям в определении гравитационной массы антиводорода в планируемом прецизионном эксперименте ЦЕРНа по исследованию поведения атомов антиводорода над материальной поверхностью в гравитационном поле Земли. Впервые проведена теоретическая оценка точности измерения гравитационной массы антиводорода в эксперименте.

Впервые проведено детальное исследование явления рассеяния ультрахолодного антиводорода на проводящей и других поверхностях с целью поиска оптимальной отражающей поверхности для эксперимента.

### **Теоретическая и практическая ценность диссертации.**

Полученные в диссертации результаты представляют ценность как с точки зрения исследования гравитационных свойств антивещества, которые имеют фундаментальный интерес, так и для проведения экспериментов с атомами ультрахолодного антиводорода, реализуемых в ЦЕРНе. Исследования, проведенные в работе, являются составной частью планируемого в ЦЕРНе эксперимента GBAR/AD-7.

Некоторые замечания, которые можно сделать по диссертационной работе, состоят в следующем:

Во введении автор, рассказывая об экспериментах, посвящённых гравитационным свойствам квантомеханических объектов и, в частности, нейтронов, не упомянул работы дубненской группы с ультрахолодными нейтронами. Хотя результаты этих работ и уступают по точности процитированным работам, в них предложен оригинальный метод измерения. Предполагаю, что их стоило упомянуть для полноты картины.

Решая задачу о возбуждении резонансных переходов при помощи вибрации поверхности, автор не упоминает о работах группы исследователей из Австрии (эксперимент Q-bounce) которые посвящены аналогичной задаче и её экспериментальной реализации для ультрахолодных нейтронов. Думаю, что сравнение этих задач было бы интересным.

В параграфе, посвящённом выбору оптимального материала поверхности для эксперимента с атомами антиводорода, делается утверждение о том, что таким материалом является жидкий гелий. Отсутствует объяснение (или ссылки на изложенный материал), благодаря каким свойствам гелия его выбор является предпочтительным. Какие ещё материалы рассматривались/не рассматривались и почему.

Было бы интересно сравнить рассмотренную систему, хотя бы качественно, с системой: ультрахолодный атом водорода над поверхностью.

Диссертация написана достаточно лаконично и грамотно. Небольшое количество опечаток в тексте, неудачное расположение рисунков 4.3-4.5 в тексте, носят явно технический характер и не влияют на общее хорошее впечатление от четкого изложения постановки задачи, описания методов ее решения, результатов и их интерпретации.

Несмотря на указанные замечания, можно отметить, что диссертация Куприяновой Е. А. является законченным научным трудом и выполнена на высоком научном уровне. Результаты, полученные в диссертации, являются новыми и оригинальными. Они были опубликованы в четырех реферируемых научных журналах, апробировались на трех международных и одной всероссийской конференциях. Содержание диссертации соответствует опубликованным работам. Автореферат верно отражает содержание диссертации.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается строгостью математических выводов и проверяется сравнением результатов, полученных различными способами.

Считаю, что по своему научному уровню, объему, полученным результатам и содержанию диссертационная работа Куприяновой Екатерины Александровны полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а Е.А. Куприянова безусловно заслуживает присвоения ей этой степени.

Отзыв составил:

Заместитель директора по научной работе  
Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М. Франка  
Объединенного института ядерных исследований,  
кандидат физико-математических наук,

Лычагин Егор Валерьевич

141980 Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6,  
Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований,  
Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка  
тел. +7 (49621) 6-24-28  
e-mail: lychag@nf.jinr.ru

Подпись Лычагина Е. В. заверяю  
Учёный секретарь ЛНФ ОИЯИ

Дата 28.04.2018



Д.М.Худоба

Список основных работ официального оппонента Лычагина Е. В. по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, V.V. Nesvizhevsky "Nano-Structured Reflectors for Slow Neutrons" in New Developments in Low-Energy Physics Research Editors: Tao Zoeng and Meng Ngai NOVA Publishers 2013
2. В. В. Несвижевский, А. Ю. Воронин, А. Ламбрехт, С. Рейно, Е. В. Лычагин, А. Ю. Муzychka, А. В. Стрелков "Наблюдение квантовой левитации наночастиц методом ультрахолодных нейтронов" // Кристаллография, 2013, том 58, № 5, с. 730–736
3. E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, G.V. Nekhaev, V.V. Nesvizhevsky, E.I. Sharapov and A.V. Strelkov "UCN Source at an External Beam of Thermal Neutrons" // Hindawi Publishing Corporation Advances in High Energy Physics Volume 2015, Article ID 547620, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/547620>
4. E.V. Lychagin, V.A. Mityukhlyaev, A.Yu. Muzychka, G.V. Nekhaev, V.V. Nesvizhevsky, M.S. Onegin, E.I. Sharapov, and A.V. Strelkov, "UCN sources at external beams of thermal neutrons. An example of PIK reactor," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 823, pp. 47–55, 2016.
5. Е. В. Лычагин, Д. П. Козленко, П. В. Седышев, В. Н. Швецов, "Нейтронная физика в ОИЯИ — 60 лет Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка", УФН, 186:3 (2016), 265–274
6. V.V. Nesvizhevsky, A.Yu. Voronin, A. Lambrecht, S. Reynaud, E.V. Lychagin, A.Yu. Muzychka, G.V. Nekhaev, A.V. Strelkov, "The method of UCN "small heating" measurement in the big gravitational spectrometer (BGS) and studies of this effect on Fomblin oil Y-HVAC 18/8"//Review of Scientific Instruments, 89 (2), (2018) 023501
7. V.V. Nesvizhevsky, M. Dubois, Ph. Gutfreund, E.V. Lychagin, A.Yu. Nezvanov, and K.N. Zhernenkov, "Effect of nanodiamond fluorination on the efficiency of quasispecular reflection of cold neutrons", Physical Review A 97 023629

Заместитель директора по научной работе Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М. Франка Объединенный институт ядерных исследований, кандидат физико-математических наук,  
Лычагин Егор Валерьевич

141980 Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6,  
Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований,  
Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка  
тел. +7 (49621) 6-24-28  
e-mail: [lychag@nf.jinr.ru](mailto:lychag@nf.jinr.ru)

Подпись Лычагина Е.В. заверяю

Учёный секретарь ЛНФ ОИЯИ

Дата 28.04.2018



Д.М.Худоба