

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель директора ИЯИ РАН по науке

д.ф.м.н. Тибанов М.В.



### Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук на диссертацию  
Воронина Алексея Юрьевича «Физика взаимодействия ультрахолодного  
антиводорода с веществом», представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических по специальности 01.04.16- физика атомного  
ядра и элементарных частиц.

Диссертация «Физика взаимодействия ультрахолодного антиводорода с  
веществом» выполнена в Федеральном государственном бюджетном  
учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской  
академии наук, в Секторе теоретической ядерной физики Отделения ядерной  
физики и астрофизики.

Диссертационная работа Воронина А.Ю. посвящена исследованию эффектов  
взаимодействия ультрахолодного антиводорода с веществом, в которых  
существенную роль играют долгоживущие состояния систем антиводород-  
вещество. В работе развит квантово-механический формализм, необходимый  
для исследования таких систем, вычислены соответствующие сечения и  
времена жизни. Полученные результаты важны для формулировки программы  
экспериментального исследования антиводорода, в частности для  
прецизионных измерений гравитационной массы антиводорода.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста,  
заключения, списка цитируемой литературы и пяти приложений.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, указана цель работы, описаны развитые в литературе подходы. Обсуждается научная новизна полученных результатов, описана апробация работы на международных конференциях, приведено количество опубликованных работ (42) по тематике защищаемой диссертации в журналах из списка ВАК.

**В первой главе** рассматривается проблема взаимодействия ультрахолодного атомарного антиводорода с водородом, включая расчет сечений реакции образования протония и позитрония в различных состояниях, упругого сечения, сечения передачи спина при столкновении поляризованных атомов и антиатомов, положение и ширины квазисвязанных и виртуальных состояний молекулярной системы  $\$H\bar{H}\$$ . Глава посвящена как качественному анализу основных физических особенностей процесса взаимодействия антиводорода и водорода, так и развитию формализма, позволяющего получить точные значения амплитуд переходов. В центре внимания оказываются узкие вблизипороговые состояния водород-антиводород, исследуется их роль в энергетическом поведении вблизипороговых реакций, показана связь таких состояний с явлением надбарьерного отражения.

**Глава 2** посвящена проблеме взаимодействия ультрахолодного антиводорода с материальной поверхностью, обусловленному эффектом квантового отражения. В этой главе приводится метод вычисления потенциала взаимодействия атомарного антиводорода с различными материальными поверхностями, включая идеально проводящую гладкую полуплоскость, пористые тела, тонкие пленки. Рассматривается динамика эффекта надбарьерного отражения, получена эффективная комплексная длина рассеяния антиводорода на материальной поверхности, отношение которой к де-Бройлевской длине волны играет роль параметра малости в развиваемом формализме, вычислен коэффициент отражения антиводорода от различных

поверхностей в широком диапазоне энергий. Рассмотрены квазистационарные состояния антиводорода в материальном волноводе, обусловленные надбарьерным (квантовым) отражением. Существование таких состояний определяет квантовые свойства коэффициента прохождения антиводорода через волновод.

**Глава 3** посвящена исследованию гравитационных состояний антиводорода вблизи материальной поверхности в гравитационном поле Земли и методам измерения гравитационной массы антиводорода. Главным результатом этой главы является предсказание существования долгоживущих состояний антиводорода вблизи материальной поверхности в гравитационном поле Земли. Получен спектр таких состояний и времена жизни. Предложены методы спектроскопического и интерференционного исследования таких состояний, и определения, с помощью указанных методов, гравитационной массы антиводорода.

**В главе 4** исследуется эффект шепчущей галереи при отражении ультрахолодного антиводорода от искривленной поверхности. Указанный эффект связан с существованием вблизипороговых квазистационарных состояний радиального движения антиатомов, обусловленных суперпозицией центробежного потенциала и эффекта надбарьерного отражения. В рамках формализма комплексного углового момента решена общая задача о состояниях шепчущей галереи в рассеянии квантовых частиц на цилиндре, вычислен спектр и время жизни состояний шепчущей галереи антиводорода, рассмотрены методы интерференционного исследования таких состояний и возможность построения новых типов прецизионных приборов- резонаторов шепчущей галереи для антиатомов.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1) расчет величин упругого и неупругого сечения ультрахолодного антиводорода на водороде при энергиях столкновений менее  $10^{-5}$  eV, расчет комплексной длины рассеяния водород-антиводород, положение вблизипороговых особенностей S-матрицы и вычисление энергий и ширин метастабильных состояний ;

2) расчет сечений передачи спина в столкновениях поляризованного атомарного антиводорода на атомарном водороде при энергиях столкновений менее  $10^{-5}$  eV;

3) выяснение роли сильных взаимодействий во взаимодействии ультрахолодного антиводорода и водорода;

4) расчет коэффициента отражения ультрахолодного антиводорода от материальных поверхностей, включая тонкие пленки и пористые структуры;

5) предсказание существования нового явления - локализации антиводорода в долгоживущих вблизиповерхностных состояниях в гравитационном поле Земли;

6) расчет энергетического спектра и ширин гравитационных состояний антиводорода;

7) разработка спектроскопического метода измерения гравитационной массы антиводорода, включающая расчет вероятностей переходов между гравитационными состояниями под действием периодического неоднородного магнитного поля, расчет сдвига уровней в следствии динамического Штарк-эффекта, оценка точности измерения гравитационной массы;

8) разработка квантового баллистического метода измерения гравитационной массы антиводорода, включающая расчет вероятности временных событий падений антиатомов из заданного квантового состояния и определение по этим данным гравитационной массы антиводорода;

9) метод расчета рассеяния ультрахолодного антиводорода на искривленной поверхности, расчет энергий и ширин состояний шепчущей галереи антиводорода, исследование эффекта интерференции состояний шепчущей галереи и использование этого метода для выяснения измерения гравитационной массы антиводорода.

В приложениях приведены детали численных расчетов и выводов важных аналитических выражений.

Приведенный список литературы включает важнейшие результаты, полученные в исследуемой области.

Основные результаты работы представляются верными, оригинальными и обоснованными. Результаты работ интересны специалистам в области атомных столкновений, физики ультрахолодных газов, физики фундаментальных взаимодействий, и, в особенности, физики прецизионных экспериментов с ультрахолодным антиводородом. Весьма актуальным представляется то, что теоретические результаты диссертации стали обоснованием экспериментальной программы исследований антиводорода в реализуемом в настоящий момент проекте Gbar в Европейском Центре Ядерных Исследований (ЦЕРН). Проблематика данного эксперимента, так же как эксперимента AEGIS (ЦЕРН), в котором принимают участие сотрудники ИЯИ РАН, связана с исследованием свойств антивещества, проводимого на Большом Адронном Коллайдере.

Список публикаций автора по теме диссертации включает 42 работы, опубликованных в ведущих международных реферируемых журналах, а также сделаны доклады на 14-ти международных конференциях. Автореферат детально отражает содержание диссертации.

Диссертация «Физика взаимодействия ультрахолодного антиводорода с веществом» А.Ю. Воронина соответствует требованиям Постановления правительства РФ от 24 сентября 2013 г № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор безусловно заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составил доктор физ.-мат. наук Катаев А.Л.,

Данный отзыв составлен по итогам обсуждения доклада А.Ю. Воронина на семинаре Отдела Теоретической Физики ИЯИ РАН 02 июля 2015 г.

Ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН,

д. ф.-м. н.



Катаев Андрей Львович

ФГБУН Институт ядерных исследований Российской академии наук,

Тел. +7 (495) 133-65-33, e-mail: [kataev@ms2.jinr.ac.ru](mailto:kataev@ms2.jinr.ac.ru)

117312, Россия, г. Москва, пр-т 60-летия Октября, д. 7а, ИЯИ РАН

Подпись А. Л. Катаева

Зам. директора ИЯИ



(М.В. Мидонов)

1. A.L. Kataev (INR RAS) and V.S.Molokoedov (Moscow,MIPT) "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. D92 (2015) 054008.
2. S. N. Gninenko (INR RAS) N. V. Krasnikov (INR RAS) , V. A. Matveev (INR RAS) and A. Rubbia (ETH, Zurich, Switzerland) "Some aspects of positronium physics,"  
Phys. Part. Nucl. **37** (2006) 321.
3. N. V. Krasnikov, "C, P, T, CP, CPT and positronium,"  
Int. J. Mod. Phys. A **19** (2004) 3849.
4. S. N. Gninenko (INR RAS), N. V. Krasnikov (INR RAS) and A. Rubbia (ETH Zurich, Swizerland) "Positronium physics beyond the standard model,"  
Mod. Phys. Lett. A **17** (2002) 1713.
5. S. Mariazzi (Stefan-Meyer-Institut fr subatomare Physik, Boltzmanngasse 3, 1090, Vienna, Austria ) and 69 coauthors (among them A.S. Belov (INR RAS), S. N. Gninenko (INR RAS) and V.A. Matveev )(INR RAS and JINR, Dunba)) "AEgIS experiment: Towards antihydrogen beam production for antimatter gravity measurements,"  
Eur. Phys. J. D **68** (2014) 41.