

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Воронина Алексея Юрьевича “ Физика взаимодействия ультрахолодного антиводорода с веществом”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Диссертационная работа А.Ю.Воронина посвящена теоретическому исследованию ключевых вопросов физики антиводорода ( $\bar{H}$ ): взаимодействию антиводорода в водородом и с материальной поверхностью, уровням антиводорода в гравитационном поле, измерению гравитационной массы антиводорода.

### **Актуальность темы диссертации.**

В последние годы в ЦЕРНе удалось решить сложнейшую задачу формирования и хранения ультрахолодных атомов антиводорода. Достигнутый экспериментальный прогресс потребовал корректной формулировки и решения целого спектра теоретических задач. Прежде всего, необходимо было понять и количественно описать процесс взаимодействия антиводорода с поверхностью. В диссертации получен нетривиальный ответ, состоящий в том, что в пределе нулевых энергий антиводород полностью отражается от поверхности. Другой сложной актуальной задачей было исследование взаимодействия водорода с антиводородом ( $H - \bar{H}$ ) с учетом сильного ядерного взаимодействия и возможности образования позитрония ( $Ps$ ). Проведенные автором диссертации исследования являются существенной составной частью проводимых и планируемых исследований физики антиводорода.

### **Новизна результатов диссертации.**

Разработанный автором подход к физике антиводорода, включающий одновременно три типа взаимодействия – электромагнитное, ядерное и гравитационное является принципиально новым. В диссертации предсказан и рассчитан новый тип кватовых состояний – гравитационные уровни ( $\bar{H}$ ) вблизи поверхности. Впервые речь идет об уровнях, сформированных двумя типами взаимодействия, а именно гравитационными силами и потенциалом ван-дер-Ваальса–Казимира–Полдера. Предложен новый метод проверки принципа эквивалентности в секторе антиматерии путем возбуждения резонансных переходов между гравитационными уровнями ( $\bar{H}$ ) переменным магнитным полем. Впервые исследован эффект шепчущей галереи для антиводорода.

### **Достоверность результатов диссертации.**

Ряд расчетов и предсказаний, представленных в диссертации имеют аналогию в физике ультрахолодных нейтронов, где они уже получили экспериментальную проверку. Речь идет, прежде всего, о нейтронных гравитационных уровнях, которые впервые наблюдались в ILL группой В.В.Несвижевского. Расчеты величин упругого и неупругого сечения

рассеяния ультрахолодного антиводорода на водороде при сверхнизких энергиях выполнен строго согласно принципам квантовой механики и не вызывает сомнений. Предсказание эффекта шепчущей галереи для антиводорода имеет аналогию в физике ультрахолодных нейтронов.

### **Общая характеристика диссертации.**

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, пяти Приложений и списка литературы. Во Введении сформулированы цели работы и ее актуальность.

**Глава 1** посвящена детальному исследованию взаимодействия водорода и антиводорода при ультра-низких ( $E < 10^{-5}$  eV) энергиях. Описана кинематика упругих и неупругих процессов, включая образование позитрония при сближении  $H$  и  $\bar{H}$ . Определены значения квантовых чисел протония (системы  $p\bar{p}$ ) и позитрония, образующихся при адиабатическом сближении  $H$  и  $\bar{H}$ . Дана оценка характерных времен соответствующих реакций. С точки зрения адиабатического приближения проанализировано исчезновение связанного состояния лептона в поле  $p$ , либо  $\bar{p}$ , при сближении тяжелых центров (явление, предсказанное Ферми и Теллером). Необходимо подчеркнуть, что даже с точки зрения кинематики, четырехчастичная задача является достаточно сложной. Автору удалось определить характерные расстояния, на которых доминируют соответствующие типы взаимодействия.

Далее автор исследует вопрос о чувствительности предложенной картины взаимодействия  $H\bar{H}$  к значениям характерных параметров таких, как комплексная длина рассеяния, точнее мнимая часть фазы. Показано, что сечения упругого и неупругого  $H - \bar{H}$  рассеяния чувствительны к данному параметру. От мнимой части фазы зависит также спектр вблизипороговых состояний  $H - \bar{H}$  системы. Тем самым, сформулирована задача для предполагаемых экспериментов по исследованию  $H - \bar{H}$  взаимодействия.

На малых расстояниях  $\sim 10^{-5}r_B$  существенную роль во взаимодействии  $H - \bar{H}$  играет сильное взаимодействие, включая аннигиляцию, в системе  $p\bar{p}$ . Проведены расчеты всех ключевых величин (длины рассеяния, сечения, энергии связи) с учетом этого обстоятельства. Наконец, в Главе 1 исследован изотопический эффект, возникающий при замене водорода на дейтерий. Также рассмотрен процесс передачи спина в  $H - \bar{H}$  системе.

**Глава 2**, возможно центральная в диссертации, посвящена проблеме взаимодействия ультрахолодного водорода с материальной поверхностью. В основе процесса лежит хорошо известный квантовый эффект надбарьерного отражения. Важным и неожиданным является вывод автора о том, что при энергии  $\bar{H}$  меньше  $10^{-9}$ eV (скорость меньше 1 м/сек) отражение от поверхности является практически упругим, антиводород не аннигилирует на поверхности. Данный результат имеет огромную важность для манипулирования и хранения антиводорода. Условием для квантового отражения является большая величина де-бройлевской волны частицы по сравнению с характерным масштабом изменения потенциала. Именно это условие определяет интервал энергий  $\bar{H}$ , при которых антиводород упруго отражается от поверхности. На малых расстояниях происходят неупругие

процессы – перестройка атома и аннигиляция. Однако на расстояниях  $r > r_B$  доминирует взаимодействие диполь-диполь с поверхностью (потенциал Казимира–Полдера) и в итоге антиводород отражается, не достигнув поверхности. Неупругие процессы, а именно захват позитрона, либо антипротона средой учтены посредством граничного условия. Вычислена новая важная характеристика – комплексная длина рассеяния в условиях полного поглощения на поверхности. Результаты, полученные в этой главе используются для рассмотрения гравитационных уровней антиводорода в следующей главе. В конце главы проведен расчет отражения антиводорода от стенок волновода и от тонких пленок.

**Глава 3** посвящена изучению гравитационных состояний антиводорода над материальной поверхностью. В отличие от изученных ранее теоретически и обнаруженных экспериментально гравитационных уровней нейтрона, для уровней антиводорода существенную роль играет потенциал взаимодействия с поверхностью. Вычислено время жизни нижних уровней над поверхностью, которое оказалось равным 0.1 с. Характерные энергии гравитационных уровней крайне малы, порядка  $10^{-14}$  а.е., поэтому взаимодействие с поверхностью отвечает идеальному надбарьерному отражению. Предложен метод измерения гравитационной массы антиводорода путем измерения частоты индуцированных радиационных переходов между уровнями. Представлена схема соответствующего эксперимента. Другой обсуждаемый в диссертации способ измерения гравитационной массы состоит в измерении распределения времен падения с заданной высоты атомного уровня. Рассчитано число подскоков атома над поверхностью. За счет возможного проникновения атома через поверхность возникает интерференция между уровнями.

**Глава 4** посвящена эффекту шепчущей галереи когда атом отражается от стенок искривленной поверхности. При отражении образуются вблизиповерхностные уровни, спектр которых рассчитан в диссертации. Интерференция между уровнями приводит к биениям аннигиляционного сигнала.

**Заключение** суммирует результаты диссертационной работы.

В пяти приложениях автор приводит некоторые вспомогательные вычисления.

Список литературы насчитывает 152 наименования. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и удовлетворяет требованиям.

Некоторые замечания, которые можно сделать по диссертационной работе:

1. Хотелось бы увидеть в диссертации наглядное сравнение с результатами более грубых вариационных расчетов (ссылка [20] и Stegeby et al., *Central Eur. J.Phys.* **10** (2012) 1038).
2. Строго говоря, в магнитном поле с гамильтонианом коммутирует не импульс центра масс, а введенный Лэмбом, а также Горьковым и Дзялошинским (*ЖЭТФ*, **26** (1968) 449), оператор псевдоимпульса. Можно ожидать, что в достаточно слабых магнит-

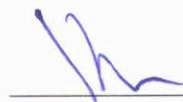
ных полях, рассмотренных в диссертации, соответствующие поправки крайне малы, однако желательно бы получить их оценку.

Эти замечания, однако, можно рассматривать скорее как пожелания для улучшения текста, который мог бы составить монографию. Диссертация вносит фундаментальный вклад в физику антиводорода, которая сейчас переживает период бурного развития. Результаты, полученные автором, окажут существенное влияние на планируемые, и уже осуществляемые эксперименты по антиводороду.

Результаты, на которых основана диссертация опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах.

Диссертационная работа А.Ю.Воронина “Физика взаимодействия ультрахолодного антиводорода с веществом”, несомненно, полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Ведущий научный сотрудник  
ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ  
доктор физико-математических наук



Кербиков Борис Олегович

Адрес: 117218, Москва, ул. Большая Черемуш-  
кинская, д. 25, Федеральное государственное бюд-  
жетное учреждение Научный Центр Российской  
Федерации Институт Теоретической и Экспери-  
ментальной Физики»  
e-mail: borisk@itep.ru

Подпись Кербикова Бориса Олеговича заверяю:

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ  
кандидат физико-математических наук



В.В. Васильев

В диссертационный совет Д002.023.04  
В Физическом Институте им. П.Н.Лебедева РАН  
от доктора физ.-мат. наук,  
ведущего научного сотрудника  
ФГБУ «Государственный научный центр –  
институт теоретической и  
экспериментальной физики»

**Кербикова Бориса Олеговича**

Я, Кербиков Борис Олегович, согласен оппонировать диссертацию Воронина Алексея Юрьевича «Физика взаимодействия ультрахолодного антиводорода с веществом» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 (физика атомного ядра и элементарных частиц).

Список основных работ по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. M.A.Andreichikov, B.O.Kerbikov, Yu.A.Simonov, Magnetic Field Focusing of Hyperfine Interaction in Hydrogen, J RTP. Lett. **99**, 246 (2014).
2. M.A.Andreichikov, B.O.Kerbikov, V.D.Orlovsky, Yu.A.Simonov, Neutron in strong Magnetic Field, Phys. Rev. D **89**, 074033 (2014).
3. M.A.Andreichikov, B.O.Kerbikov, V.D.Orlovsky, Yu.A.Simonov, Meson Spectrum in strong Magnetic Field, Phys. Rev. D **87**, 094029 (2013).
4. B.O.Kerbikov, M.A.Andreichikov, Electrical Conductivity of Dense Quark Matter with Fluctuations and Magnetic Field Included, Phys. Rev. D **91**, 074010 (2015).

  
Кербиков Борис Олегович 31.08.2015

*Подпись Б. О. Кербикова, галерею.*

*Ученый секретарь*

*ФГБУ ГИИ РАН ИТЭФ*

*ИИИ "Курчатовский институт"*



*В. В. Ващенко*