

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук, профессор



А.А. Федянин

«24» апреля 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына) о диссертации Куприяновой Екатерины Александровны «Гравитационные состояния в ультрахолодных квантовых системах», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Диссертационная работа Е.А. Куприяновой посвящена развитию метода исследования гравитационных свойств атомов антиводорода для измерения гравитационной массы антиводорода с высокой точностью. Предметом изучения являются долгоживущие квантовые состояния ультрахолодных атомов антиводорода в гравитационном поле Земли вблизи материальной поверхности. В диссертации предлагается способ индуцирования резонансных переходов между такими состояниями под воздействием градиента магнитного поля, осциллирующего с частотой, равной частоте перехода между состояниями, или под воздействием вибрации поверхности. Полученные результаты предлагается использовать в качестве основы для прецизионного эксперимента по наблюдению переходов между квантовыми состояниями антиводорода в гравитационном поле Земли. Это позволит измерить с высокой точностью его гравитационную массу и проверить слабый принцип эквивалентности для антивещества. В диссертации сделаны оценки точности измерения расстояния между квантовыми уровнями и на их основе вычислено значение гравитационной массы антиводорода в эксперименте с учетом различных источников ошибок.

Актуальность темы обусловлена недавними достижениями в получении и накоплении атомов антиводорода в ЦЕРНе, которые открывают широкие возможности для исследования антивещества. Изучение гравитационных свойств антивещества входит в программу нескольких научных групп в ЦЕРНе. До настоящего момента гравитационные свойства антиматерии не исследовались непосредственно, существуют лишь косвенные предположения относительно ее гравитационных свойств. Прецизионная проверка слабого принципа

эквивалентности для антиводорода и получение его гравитационной массы представляют фундаментальный интерес. Для антивещества подобная проверка не проводилась, эксперименты являются совершенно новыми, в отличие от случая макроскопических тел, для которых слабый принцип эквивалентности проверялся многократно и с высокой точностью. Эксперименты по изучению гравитационных свойств антиводорода позволят проверить гравитационную эквивалентность частиц и античастиц, что имеет большую значимость.

Результаты работы также могут быть использованы для изучения специфики взаимодействия антиатомов с поверхностью, что представляет практический интерес.

Научная новизна и теоретическая и практическая значимость. Следует отметить научную новизну результатов: новым является применение резонансной спектроскопии квантовых состояний атома антиводорода в гравитационном поле над проводящей поверхностью для исследования гравитационных свойств антиводорода.

Отдельное место в работе занимает исследование целого ряда различных эффектов, принципиальных для возможности измерения значения гравитационной массы антиводорода с высокой точностью в эксперименте, проведение которого планируется в ЦЕРНе. Эти эффекты исследуются впервые. Среди них можно выделить сдвиг резонансной частоты (частоты, при которой наблюдается максимум вероятности перехода из одного гравитационного состояния в другое) за счет динамического эффекта Штарка, который вносит наибольший вклад в погрешность определения гравитационной массы антиводорода. Новым является исследование воздействия остаточных электрических полей от электрических зарядов, случайно распределенных по поверхности зеркала, на квантовые состояния антиводорода и оценка возможности разрушения этих состояний. Детальное изучение эффекта влияния взаимодействия с проводящей поверхностью на частоты переходов между квантовыми состояниями антиводорода в гравитационном поле также является новым. Впервые проведено исследование рассеяния антиводорода на проводящей поверхности и на других поверхностях с целью поиска наилучшего варианта для проведения эксперимента, а также найдено численное значение эффективного радиуса рассеяния антиводорода на проводящей поверхности. Выбрана оптимальная отражающая поверхность – жидкий гелий, которая на порядок увеличивает время жизни квантовых состояний антиводорода в гравитационном поле по сравнению с проводящей поверхностью.

Полученные в работе результаты могут служить основой для прецизионного эксперимента GBAR в ЦЕРНе по определению частот переходов между квантовыми состояниями антиводорода в гравитационном поле, что даст возможность с высокой точностью определить величину гравитационной массы и протестировать слабый принцип эквивалентности применительно к антивеществу. Научную ценность опытов с антиводородом повышает тот факт, что описанные эксперименты крайне сложно ставить с антипротонами, поскольку силы,

вызванные случайными электрическими полями, намного превосходят гравитационную силу.

Исследование антиводорода представляет фундаментальный интерес и с точки зрения решения проблемы барионной асимметрии Вселенной.

Достоверность полученных результатов обеспечивается детальностью проведенного исследования и сравнением результатов, полученных различными методами. В частности, с помощью сравнения результатов аналитических расчетов и численного моделирования проверялась правильность полученных значений сдвига резонансной частоты за счет используемого спектроскопического метода. Полученные в диссертации результаты опубликованы в шести статьях, четыре из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, и апробированы в докладах на одной всероссийской и трех международных конференциях.

Общая характеристика работы. Текст диссертации содержит введение, четыре главы, заключение, список цитируемой литературы, список рисунков, список таблиц и три приложения. Полный объем диссертации составляет 102 страницы текста с 16 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 76 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приводится обзор научной литературы по теме диссертационной работы, формулируются цели работы, ставятся задачи исследования. Показаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

Глава 1 посвящена рассмотрению долгоживущих квантовых состояний антиводорода над проводящей поверхностью в гравитационном поле Земли.

В главе 2 описывается способ наблюдения таких состояний при помощи возбуждения резонансных переходов между ними, которые имеют место при действии переменного неоднородного магнитного поля на систему. Также предлагается использовать для возбуждения таких переходов вибрацию поверхности. В главе 2 предлагаются принципиальные схемы возможных экспериментов, которые позволят получить значения частот переходов между квантовыми уровнями антиводорода в гравитационном поле. Описывается, как, получив частоту перехода из эксперимента, можно найти гравитационную массу антиводорода с высокой точностью.

В главе 3 найдена величина сдвига резонансной частоты, обусловленного выбранным спектроскопическим методом. Величина сдвига рассчитывается численно с помощью решения зависящего от времени уравнения Шредингера и аналитически в рамках формализма квазиэнергий. Оценивается вклад эффекта сдвига в точность нахождения гравитационной массы антиводорода в эксперименте.

Глава 4 посвящена оценкам различных эффектов, принципиальных для возможности определения гравитационной массы антиводорода из эксперимента. Оценивается критическая величина поверхностной плотности остаточных зарядов на реальной поверхности, существенно влияющая на проведение эксперимента,

оценивается влияние шероховатостей поверхности на положение и ширину гравитационных уровней. Проводится оценка влияния взаимодействия антиводорода с идеальной проводящей поверхностью на частоты переходов между квантовыми состояниями в гравитационном поле. Также рассматриваются различные типы отражающих поверхностей в рамках поиска оптимальной поверхности для повышения точности эксперимента.

В заключении приведены основные результаты работы.

У диссертации есть ряд недостатков. Например, в начале главы 1 обсуждается решение уравнения Шредингера для частицы в гравитационном поле над зеркалом при условии полного отражения на зеркале. Эта задача давно известна, и ее решение приведено, в частности, в задачнике З. Флюгге «Задачи по квантовой механике» 1974 года. Однако в диссертации при обсуждении данной задачи автор ссылается на работу 2005 года (статья [12] из списка литературы диссертационной работы).

Далее, в некоторых местах диссертации неудачно выбраны обозначения. Например, обозначение для относительной погрешности выглядит так, как будто это величина размерности массы, см., например, выражение (2.36).

Сразу после таблицы 3.4 написано, что «В пределах погрешности результаты для сдвигов резонансной частоты очень близки». Однако разница значений, представленных в первых строках таблиц 3.3 и 3.4, много больше, чем соответствующие погрешности.

Наиболее существенным недостатком представляется использование для анализа результатов выражения (2.34), получающегося из выражения (2.33) при условии равенства гравитационной и инертной массы. Конечно, отличие гравитационной массы от инертной может быть выявлено как нарушение выполнения равенства (2.34). Однако с учетом того, что значения инертных масс античастиц известны с высокой точностью, представляется более логичным исследовать отклонение гравитационной массы от инертной напрямую, используя исходное выражение для гравитационной массы (2.33).

Изложенные выше замечания не снижают общую высокую оценку проделанной работы и научной ценности полученных в диссертации результатов. Выводы и положения диссертации соответствуют представленным результатам. Настоящая работа является законченным научно-квалификационным исследованием, которое выполнено на высоком научном уровне. Автореферат диссертации достаточно полно отображает содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ, предъявляемыми к авторефератам диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертационное исследование Куприяновой Екатерины Александровны на тему «Гравитационные состояния в ультрахолодных квантовых системах» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г, № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор

заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – «Физика атомного ядра и элементарных частиц».

Диссертация обсуждена и одобрена на семинаре Отдела теоретической физики высоких энергий НИИЯФ МГУ 21 марта 2018 г. Отзыв составлен старшим научным сотрудником Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, кандидатом физико-математических наук Смоляковым Михаилом Николаевичем.

Директор НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук,
профессор



М.И. Панасюк

И.о. заведующего ОТФВЭ НИИЯФ МГУ,
кандидат физико-математических наук,

А.Н. Крюков

Старший научный сотрудник ОТФВЭ НИИЯФ МГУ,
кандидат физико-математических наук

М.Н. Смоляков

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына)

Адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Телефон: (495) 939-35-72

E-mail: smolyakov@theory.sinp.msu.ru

Список некоторых публикаций сотрудников Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет:

1. Kamenshchik Alexander Yu., Pozdeeva Ekaterina O., Vernov Sergey Yu., Starobinsky Alexei A., Tronconi Alessandro, Venturi Giovanni, *Induced gravity and minimally and conformally coupled scalar fields in Bianchi-I cosmological models*, Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology, American Physical Society (United States), vol. 97, no. 2, p. 023536 (2018)
2. Kamenshchik Alexander Yu., Pozdeeva Ekaterina O., Vernov Sergey Yu., Tronconi Alessandro, Venturi Giovanni, *Transformations between Jordan and Einstein frames: Bounces, antigravity, and crossing singularities*, Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology, American Physical Society (United States), vol. 94, no. 6, p. 063510 (2016)
3. Grum-Grzhimailo A.N., Popov Yu.V., Gryzlova E.V., Solov'yov A.V., *Many particle spectroscopy of atoms, molecules, clusters and surfaces: international conference MPS-2016 (editorial)*, European Physical Journal D, Springer Verlag (Germany), vol. 71, no. 7, p. 201(1)-201(6) (2017)
4. Kraft-Bermuth S., Andrianov V., Bleile A., Echler A., Egelhof P., Grabitz P., Ilieva S., Kiselev O., Kilbourne C., McCammon D., Meier J.P., Scholz P., *Precise determination of the 1s Lamb shift in hydrogen-like lead and gold using microcalorimeters*, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Institute of Physics Publishing (United Kingdom), vol. 50, p. 055603-1-055603-10 (2017)
5. Bartschat K., Venzke J., Grum-Grzhimailo A.N., *Pulse-shape effects in ionization of atomic hydrogen by short-pulse XUV intense laser radiation: A sensitivity study*, Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, American Physical Society (United States), vol. 91 (2015)
6. Бережной А.В., Горелов И.В., Козачук А.Д., Лефлат А.К., Никитин Н.В., Саврина Д.В., Волков В.Ю., LHCb Collaboration, *Measurement of matter-*

- antimatter differences in beauty baryon decays*, Nature Physics, Nature Publishing Group (United Kingdom), vol. 13, p. 391-396 (2017)
7. Fedotov G., Golovatch E., Ishkhanov B.S., Mokeev V.I., CLAS Collaboration, *Towards a resolution of the proton form factor problem: new electron and positron scattering data*, Physical Review Letters, American Physical Society (United States), vol. 114, no. 6, p. 062003 (2015)
 8. Orlov Yu V., Irgaziev B.F., and Jameel-Un Nabi, *Algorithm for calculations of asymptotic nuclear coefficients using phase-shift data for charged-particle scattering*, Physical Review C - Nuclear Physics, American Physical Society (United States), vol. 96, no. 2, p. 025809-1-025809-8 (2017)
 9. Orlov Yu V., Irgaziev B.F., Nikitina L.I., *Asymptotic normalization coefficients of resonant and bound states from the phase shifts for $\alpha\alpha$ and α ^{12}C scattering*, Physical Review C - Nuclear Physics, American Physical Society (United States), vol. 93, p. 014612-1-014612-7 (2016)
 10. Irgaziev B.F., Orlov Yu V., *Resonance-state properties from a phase shift analysis with the S-matrix pole method and the effective-range method*, Physical Review C - Nuclear Physics, American Physical Society (United States), vol. 91, p. 024002-1-024002-7 (2015)
 11. Blokhintsev L.D., Kadyrov A.S., Mukhamedzhanov A.M., Savin D.A., *Extrapolation of scattering data to the negative-energy region*, Physical Review C - Nuclear Physics, American Physical Society (United States), vol. 95, no. 4, p. 044618-1-044618-7 (2017)
 12. Blokhintsev L.D., Kadyrov A.S., Mukhamedzhanov A.M., Savin D.A., *Extrapolation of scattering data to the negative-energy region. II. Applicability of effective range functions within an exactly solvable model*, Physical Review C - Nuclear Physics, American Physical Society (United States), vol. 97, no. 2, p. 024602-1-024602-11 (2018)
 13. Bezuglov M.A., Onishchenko A.I., *Radiative corrections to false vacuum decay in quantum mechanics*, Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology, American Physical Society (United States), vol. 96, no. 3, p. 036001 (2017)

14. Baskakov A., Belyaev A.V., Boos E., Dubinin M., Dudko L., Ershov A., Gribushin A., Katkov I., Klyukhin V., Kodolova O., Lokhtin I., Miagkov I., Obraztsov S., Petrushanko S., Popov A.A., Savrin V., Snigirev A., Zhukov V.Yu, CMS Collaboration, *Search for supersymmetry in events with one lepton and multiple jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV*, Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology, American Physical Society (United States), vol. 95, no. 1, p. 012011 (2017)