

## О Т З Ы В

**официального оппонента Саакяна Сергея Арамовича на диссертацию Сидорова Павла Леонидовича «Масштабирование квантового вычислителя на ионах иттербия-171 с использованием кудитов и быстрых квантовых вентиляей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 "Лазерная физика"**

Диссертационная работа П.Л. Сидорова посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию масштабирования квантового вычислителя на ионах иттербия с использованием кудитов и неадиабатических квантовых операций. Рекордные уровни достоверности квантовых операций и времена когерентности ионных кубитов наряду со сложностью увеличения количества кубитов определяют актуальность рассматриваемой в диссертации темы.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

В первой главе рассматривается квантово-механическая теория взаимодействия захваченных в ловушку Пауля ионов с лазерным излучением. Также приводится теория лазерного охлаждения иона до основного колебательного состояния и предлагается метод оптимизации стратегии охлаждения для достижения основного колебательного состояния. Отличительной особенностью предложенного метода является возможность настройки как длительности импульсов, так и их частотных отстроек от резонанса. Приводятся результаты численного моделирования, демонстрирующие охлаждение иона магния-25 с температуры 1 мК до 2.5 мкК.

Вторая глава диссертации посвящена масштабированию ионного квантового вычислителя с помощью перехода к системе куквартов. Для создания куквартов предлагается использовать зеэмановские подуровни состояния  $D^{3/2}$  ионов иттербия-171 для хранения квантовой информации и дипольно-запрещённые оптические переходы  $D^{3/2} \leftrightarrow S^{1/2}$  для проведения квантовых операций. В главе представлено описание созданного кудитного квантового процессора на двух ионах иттербия и результаты экспериментов по проведению универсального набора квантовых операций.

Третья глава диссертации посвящена масштабированию ионного квантового вычислителя с использованием неадиабатических квантовых операций. Описывается механизм запутывания ионных кубитов с помощью серии спин-зависимых толчков, формируемых ультракороткими лазерными импульсами. Показывается возникновение когерентных эффектов в такой двухкубитной операции, то есть зависимости

достоверности операции от периода повторений спин-зависимых толчков. Исследуется возможность масштабирования вычислителя с использованием неадиабатического запутывания и демонстрируется, что увеличение числа ионов не приводит к снижению достоверности ниже 90 %. Приводятся результаты исследования для конфигурации ионов, находящихся в массиве отдельных ловушек в одномерных и двумерном случаях. Для двумерного массива  $3 \times 3$  исследование выполнено с учётом флуктуаций интенсивности лазерных пучков.

Диссертация содержит важные теоретические и экспериментальные результаты, имеющие принципиальное значение для дальнейшего развития квантовых технологий на основе ультрахолодных ионов, включая создание масштабируемых ионных квантовых вычислителей. Результаты работы опубликованы в 3-х статьях в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные базы данных WOS и Scopus, прошли апробацию на научных конференциях.

В то же время, имеются замечания:

1) На стр. 71 диссертации допущена неточность во фразе «для возбуждения микроволнового перехода ... используются резонансные рамановские импульсы». Импульсы действительно являются рамановскими, но один импульс не может быть резонансным, так как ширина спектра такого импульса в разы больше, чем частота возбуждаемого перехода.

2) В диссертации подробно описан процесс охлаждения иона до основного колебательного состояния на боковых колебательных частотах, однако не даётся информации о том, как осуществляется охлаждение при наличии нескольких ионов.

3) На стр. 66 в формуле 3.31 присутствует опечатка: вместо вектора-состояния  $e_1$  должен быть указан вектор-состояние  $e_3$ .

Указанные замечания никак не уменьшают ценности результатов, полученных в диссертации.

Практическая значимость заключается в возможном использовании полученных результатов для увеличения достоверности квантовых операций ионного вычислителя и количества кубитов.

#### Заключение

Тема диссертации является актуальной, научные положения и выводы диссертации научно обоснованы. Результаты диссертации обладают практической и фундаментальной значимостью, научной новизной, прошли апробацию и представлены в научных



публикациях автора. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и согласованностью теоретических моделей с экспериментальными данными.

Диссертация П.Л. Сидорова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на хорошем научном уровне, что подтверждает высокую квалификацию соискателя в своей области. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Сидоров Павел Леонидович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – "Лазерная физика".


Официальный оппонент:

Саакян Сергей Арамович, кандидат физико-математических наук (по специальности 01.04.08 – Физика плазмы), старший научный сотрудник лаборатории лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН).

Российская федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д.13

тел.: +7(495) 362-07-78

e-mail: saakyan@jiht.ru

 / Саакян Сергей Арамович /  
29.07.2024

Подпись Саакяна Сергея Арамовича заверяю:

Иванова Н.Н.

Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН),

Российская федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д.13

ОИВТ РАН

тел.: 8(495) 485-96-63

e-mail: ivanova-n@ihed.ras.ru





/ Иванова Нина Николаевна /

Список основных работ официального оппонента Саакяна Сергея Арамовича по тематике диссертации Сидорова Павла Леонидовича «Масштабирование квантового вычислителя на ионах иттербия-171 с использованием кудитов и быстрых квантовых вентиляей» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Saakyan, S., Morozov, N., Sautenkov, V., & Zelener, B. B. (2023). Rydberg Interaction-Induced Distortion of the Autler-Townes Spectra in Cold Lithium Atoms. *Atoms*, 11 ( 4 ), 73.
2. Saakyan, S. A., Sautenkov, V. A., Morozov, N. V., Bobrov, A. A. , & Zelener, B. B. (2021, February). Increasing the trapping lifetime of lithium-7 atoms in optical dipole trap. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1787, No. 1, p. 012046). IOP Publishing.
3. Saakyan, S., D'yachkov, L., Klimov, S., Sautenkov, V., & Zelener, B. B. (2022). Photoionization cross section of first excited state of lithium. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 195, 106503.
4. Saakyan, S. A., Vilshanskaya, E. V., Galstyan, K. P., Sautenkov, V. A., & Zelener, B. B. (2021 ). Measurement of the photoionization cross section of the lithium 2P 3/2 state in a magneto-optical trap with a UV-light-emitting diode. *Measurement Science and Technology*, 32(11), 115501.
5. Beterov, I. I., Yakshina, E. A., Tretyakov, D. B. Entin, V. M., Singh, U., Kudlaev, Y. V., Mityanin, K. Yu., Panov, K.A., Al'yanova N.V. & Ryabtsev, I. I. (2020). Trapping and detection of single rubidium atoms in an optical dipole trap using a long-focus objective lens. *Quantum Electronics*, 50(6), 543.
6. Saakyan, S. A., Sautenkov, V. A., & Zelener, B. B. (2021). Near-Threshold Measurement of the Photoionization Cross-Section of the Lithium  $^2P_{3/2}$  State in a Magneto-Optical Trap. *Journal of Russian Laser Research*, 42, 545-553.