



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

№ _____
на № _____ от _____

Утверждаю:

Директор Международной
межправительственной организации
Объединенного института ядерных
исследований,

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН

Матвеев В.А.



«24» 08 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Семерикова Ильи Александровича

**«Лазерное охлаждение ионов Mg^+ и Yb^+ в квадрупольной ловушке Пауля
для квантовой логики»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.05 – Оптика.

Актуальность темы исследования

Кандидатская диссертация Семерикова И.А. содержит результаты
теоретического и экспериментального исследований динамики однозарядных
ионов Магния $^{24}Mg^+$ в линейной ловушке Пауля, а также теоретического

исследования глубокого охлаждения ионов Иттербия $^{171}\text{Yb}^+$ для задач квантовой логики.

В работе создана экспериментальная установка для захвата и лазерного охлаждения ионов $^{24}\text{Mg}^+$ в высоковакуумной линейной ловушке Пауля с системами детектирования ионов, лазерного охлаждения, и регистрации одиночных ионов. Измерено время жизни ионов в ловушке без применения лазерного охлаждения и дано теоретическое объяснение результатов. Предложен механизм потерь ионов в результате многочастичного межионного взаимодействия. Произведено лазерное охлаждение ионов $^{24}\text{Mg}^+$, температура одиночного иона оценена новым методом на основе анализа спектра люминесценции при помощи профиля Фойгта. Предложен и теоретически обоснован метод глубокого охлаждения иона Иттербия $^{171}\text{Yb}^+$ при помощи двойной электромагнитно-индуцированной прозрачности.

Тема исследования актуальна в применении к квантовым вычислениям на ионах.

Оценка структуры и содержания работы

Кандидатская диссертация И.А. Семерикова состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Материал диссертации изложен на 120 страницах, список цитируемой литературы имеет 102 наименования.

Во введении изложен краткий обзор истории развития квантовых вычислений с использованием ионов и место данной работы в современном контексте квантовых вычислений в России.

Первая глава посвящена теоретическому описанию удержания ионов в линейной ловушке, а также описанию взаимодействия иона в электрическом квадрупольном поле с излучением. Рассмотрено взаимодействие иона со светом в режиме Лэмба-Дике в приближении разрешенных и не разрешенных боковых частот, приведен доплеровский предел температуры иона при лазерном охлаждении, а также методы измерения температуры ионов

включая метод анализа профиля сигнала люминесценции при помощи профиля Фойгта.

Во второй главе описывается созданная экспериментальная установка, включающая в себя высоковакуумную систему генерации и удержания ионов, лазерную систему с двухступенчатым преобразованием частоты для доплеровского охлаждения ионов $^{24}\text{Mg}^+$, систему регистрации ионов на основе микроканальных электронных умножителей и оптическую систему регистрации одиночных ионов по сигналу их люминесценции.

В третьей главе описываются эксперименты по измерению времени жизни ионов в квадрупольной ловушке Пауля без использования лазерного охлаждения, приводится объяснение полученных результатов, предлагается механизм потерь ионов из ловушки за счет многочастичного кулоновского межионного взаимодействия, производится его численное моделирование. Рассмотрены также и другие механизмы потерь, связанные с уровнем давления остаточного газа в ловушке. По результатам моделирования показано, что в условиях эксперимента время жизни ионов в ловушке определяются предложенным механизмом потерь, а его величина достаточна для применения лазерного охлаждения. Многочастичные потери почти полностью подавляются при лазерном охлаждении. Далее описываются эксперименты по лазерному охлаждению ионов $^{24}\text{Mg}^+$ с измерением температуры одиночного иона при помощи аппроксимации спектра люминесценции профилем Фойгта. Исследованы спектры колебаний одного и двух ионов в зависимости от амплитуды удерживающего радиочастотного напряжения и величины постоянного напряжения. Экспериментально измерены параметры радиочастотной ловушки.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию глубокого охлаждения ионов $^{171}\text{Yb}^+$ ниже температуры доплеровского предела. Для энергетической структуры уровней исследуемого иона определены приближения, используемые для расчетов, и параметры оптических полей. По результатам проведенных численных расчетов населенности уровня $^2\text{P}_{1/2}$ в

присутствии трех оптических сфазированных полей даны оценки эффективности метода глубокого охлаждения, предложенного для $^{171}\text{Yb}^+$.

В заключении приведены основные результаты.

Соответствие темы и содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Тема диссертации полностью соответствует ее содержанию. Диссертация выполнена на высоком современном научном уровне. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК, правильно и достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

Все результаты, представленные в диссертации, получены И.А. Семериковым лично, либо при его определяющем участии. И.А. Семериков непосредственно участвовал в создании экспериментальной установки и экспериментах на ней, самостоятельно разрабатывал модели физических процессов и проводил расчеты в теоретической части диссертации.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных результатов обеспечивается согласованностью экспериментальных результатов с теоретическим моделированием, а также с результатами других исследователей при наличии аналогичных исследований. Принятые в работе допущения полно обоснованы с использованием теоретических оценок и ссылок на теоретические и экспериментальные исследования других авторов. Достоверность подтверждается также публикацией основных результатов в рецензируемых журналах, входящих в базу Web of science.

Представленные исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

Теоретическая значимость исследовательской работы диссертанта заключается в предложенном механизме многочастичных потерь и в создании программы для численного моделирования классического движения ионов в линейной ловушке Пауля с учетом межионного кулоновского взаимодействия. Эта программа может быть использована для оптимизации загрузки ионов в радиочастотные ловушки и исследования коллективных эффектов в ионных кристаллах. К теоретически значимым результатам диссертации следует отнести расчет значений параметров лазерного излучения, необходимых для использования метода двойной электромагнитно-индуцированной прозрачности.

Практическая значимость обусловлена тем, что созданная в рамках диссертационной работы современная экспериментальная установка может быть использована для дальнейшего изучения лазерно-охлажденных ионов, в том числе для задач квантовой логики и создания стандартов частоты.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы востребованы такими организациями как МГУ им. Ломоносова, МФТИ, АО РКС, ВНИИФТРИ, ООО МЦКТ, ИЛФ СО РАН, ЗАО “ВремяЧ” и могут быть использованы как для создания перспективных квантовых вычислительных систем, так и для разработки оптических и радиочастотных стандартов частоты на одиночных ионах или больших упорядоченных ионных ансамблях.

Новизна и научная ценность полученных результатов

Впервые исследован механизм многочастичных потерь ионов, захваченных в ловушку Пауля. Для оценки вклада предложенного механизма в потери ионов из ловушки проведено численное решение уравнений

движения ионов с полным учетом кулоновского взаимодействия ионов в количестве до 30. Методом анализа спектра флюоресценции иона при помощи профиля Фойгта измерена верхняя граница температуры иона $^{24}\text{Mg}^+$ после цикла лазерного охлаждения. Верхняя граница температуры составила 39 мК при погрешности 5 мК. Впервые предложен метод двойной электромагнитно индуцированной прозрачности для охлаждения ионов иттербия в основное колебательное состояние с использованием трех оптических полей. Метод позволит производить охлаждение ионов иттербия до колебательного состояния с $\langle n \rangle < 0,1$ в диапазоне секулярных частот от $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 0,9$ МГц до $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 2,5$ МГц.

Положения, выносимые на защиту

1. Число захваченных ионов $^{24}\text{Mg}^+$ в созданную ловушку Пауля с радиальной секулярной частотой $6,28 \times 0,16$ МГц и аксиальной циклической частотой $6,28 \times 0,08$ МГц экспоненциально уменьшается со временем удержания. Постоянная времени жизни ионов определяется кулоновским взаимодействием ионов.
2. Лазерным охлаждением достигнута температура иона $^{24}\text{Mg}^+$ 30 ± 5 мК мК°.
3. Расчеты с помощью решения уравнения Линдбада показали, что метод двойной индуцированной электромагнитной прозрачности, примененный к иону $^{171}\text{Yb}^+$, позволит получить среднее осцилляторное число $n < 0,1$ в диапазоне секулярных частот от $6,28 \times 0,9$ МГц до $6,28 \times 2,5$ МГц.

Апробация работы

Результаты диссертации были представлены автором лично на 5 Международных и Российских научных конференциях и симпозиумах. Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях, в том числе три статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных Web of Science.

Замечания по диссертационной работе

По материалам диссертации Семериковым И.А. был представлен доклад на заседании Секции пучков заряженных частиц Общеинститутского семинара ОИЯИ 06.08.2020. По заданным тринадцати вопросам диссертант дал обстоятельный ответ. При подготовке отзыва на диссертацию появилось замечание методического характера: выражение "Верхняя граница температуры составила 39 мК при погрешности 5 мК" (стр.8) явно неудачно, т.к. не ясно, о какой границе идет речь, если здесь же приводится значение погрешности. Недоумение исчезает при чтении результатов на стр. 81-82, где приведены оценки погрешностей, сопровождающиеся фразой "указанное значение температуры является верхней оценкой..." В целом критические замечания не уменьшают значимость работы, как диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Заключение по диссертации о соответствии её требованиям

Диссертация является законченным научным исследованием, связанным с решением актуальной научно-технической задачи.

Диссертация Семерикова Ильи Александровича "Лазерное охлаждение ионов $^{24}\text{Mg}^+$ и $^{171}\text{Yb}^+$ в квадрупольной ловушке Пауля для квантовой логики" представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п.9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. №842, а ее автор Семериков Илья Александрович заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

Отзыв составил:

Советник Лаборатории Физики

Высоких Энергий ОИЯИ,

Доктор технических наук, профессор
Эрнаст Истюреевич Уразаков
e-mail vta@jinr.ru; тел 496-2164492

Подпись Э. Уразаков

Дата 24.08.2020

Отзыв на диссертацию Семерикова Ильи Александровича "Лазерное охлаждение ионов Mg^{+} и Yb^{+} в квадрупольной ловушке Пауля для квантовой логики" рассмотрен и утвержден на *видеоконференции* научного семинара Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского семинара Международной межправительственной организации Объединённый институт ядерных исследований ОИЯИ, протокол № 76 от 06 августа 2020 г.

Председатель Секции физики пучков
заряженных частиц и ускорительной
техники Общеинститутского семинара
Академик РАН, д.ф.м.н., профессор,
Научный руководитель
ускорительно-коллайдерного проекта NICA,
Главный научный сотрудник ЛВФЭ ОИЯИ
Игорь Николаевич Мешков
e-mail meshkov@jinr.ru; тел.496-2165193

Подпись И. Мешков

Дата 24.08.2020

Подписи Эрнаста Истюреевича Уразакова и
Игоря Николаевича Мешкова заверяю:
Главный ученый секретарь ОИЯИ, д.ф.м.н., профессор
Александр Савельевич Сорин



Список основных работ сотрудников ведущей организации Объединенный институт ядерных исследований по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. **ЛОВУШКИ ДЛЯ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И АНТИЧАСТИЦ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ**
Есеев МК, Мешков ИИ
Успехи физических наук. 2016. Т. 186. №. 3. С. 321-335.
2. **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЛОВУШКЕ ПЕННИНГА-МАЛМБЕРГА-СУРКО С ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОЛЕМ.**
Мешков, И. Н., Овсянников, А. Д., Овсянников, Д. А., & Есеев, М. К.
Доклады Академии наук 2017 Vol. 476, No. 6, pp. 630-634
3. **АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ЛОВУШКЕ ЧАРЛЬТОНА.**
Овсянников, А. Д., Мешков, И. Н., Овсянников, Д. А., & Есеев, М. К.
Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2018 15(7), 675-680.
4. **STUDY OF THE STABILITY OF CHARGED PARTICLE DYNAMICS IN A PENNING–MALMBERG–SURKO TRAP WITH A ROTATING FIELD.**
Meshkov, I. N., Ovsyannikov, A. D., Ovsyannikov, D. A., & Eseev, M. K.
Doklady Physics 2017. Vol. 62. No. 10. pp. 457-460.
5. **ANALYSIS AND MODELING OF THE CHARGED PARTICLE BEAM DYNAMICS IN THE CHARLTON TRAP.**
Ovsyannikov, A. D., Meshkov, I. N., Ovsyannikov, D. A., & Eseev, M. K.
Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. 15(7). 754-757.
6. **DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR THE COOLING OF IONS.**
Dikansky, N. S., Meshkov, I. N., Parkhomchuk, V. V. E., & Skrinsky, A. N.
Physics-Uspekhi. 2018. 61(5). 424.
7. **LONGITUDINAL PARTICLE DYNAMICS AND COOLING IN NICA COLLIDER.**
Mityanina, N., Petrov, V., Rotov, E., Tribendis, A., Meshkov, I., Sidorin, A., & Syresin, E.
In 12th Workshop on Beam Cooling and Related Topics (COOL'19), Novosibirsk, Russia, 23-27 September 2019 (pp. 64-67). JACOW Publishing, Geneva, Switzerland.
8. **THE CURRENT STATUS OF THE MASHA SETUP.**
Vedeneev, V. Y., Rodin, A. M., Krupa, L., Belozerov, A. V., Chernysheva, E. V., Dmitriev, S. N., ... & Komarov, A. B
Hyperfine Interactions. 2017. 238(1), 19.
9. **PRODUCTION AND STUDY OF NEUTRON RICH HEAVY NUCLEI, GALS SETUP**
Zemlyanoy, S., Avvakumov, K., Myshinsky, G., Zhemenik, V., Kudryavtsev, Y., Fedosseev, V., ... & Janas, Z.
In Journal of Physics: Conference Series 2020. Vol. 1555, p. 012021
10. **TRANSPORT CHANNEL OF SECONDARY ION BEAM OF EXPERIMENTAL SETUP FOR SELECTIVE LASER IONIZATION WITH GAS CELL GALS.**
Gulbekyan, G. G., Zemlyanoy, S. G., Bashevoy, V. V., Ivanenko, I. A., Kazarinov, N. Y., Kazacha, V. I., & Osipov, N. F.
In Journal of Physics. Conference Series 2017 Vol. 874, No. 1
11. **CHANGE IN STRUCTURE BETWEEN THE $I=1/2$ STATES IN 181TL AND 177,179 AU.**
Cubiss, J. G., Barzakh, A. E., Andreyev, A. N., Al Monthery, M., Althubiti, N., Andel, B., ... & Goodacre, T. D.
Physics Letters B. 2018, 786, 355-363.