

# Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

## 1. Аннотация

Работы направлены на развитие теоретических методов исследования динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах, чувствительных к внешним воздействиям и исследования возможности построения на их основе высокочувствительных квантовых датчиков, в частности датчиков инерционных ускорений, вращений, гравиметров и градиентометров гравитационного поля. Работа в данном направлении также представляет особый интерес для развития оптических стандартов частоты нового поколения.

## 2. Тема работы

Экспериментальное и теоретическое исследование динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах

## 3. Состав коллектива

1. Прудников Олег Николаевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт лазерной физики СО РАН, руководитель
2. Кирпичникова Анна Анатольевна, аспирант, Институт лазерной физики СО РАН, исполнитель

## 4. Информация о гранте

грант РФФИ и Правительства Новосибирской области № 18-42-540003 «Экспериментальное и теоретическое исследование динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах».

## 5. Научное содержание работы

Проект направлен на решение фундаментальной задачи - контроля квантовых состояний пучка холодных нейтральных атомов когерентными лазерными полями, включая контроль не только его внутренних, но и поступательных степеней свободы и их взаимосвязь.

Основой атомных интерферометров, в отличие от оптических, является пучок холодных атомов, взаимодействие которого с лазерным полем сводится к расщеплению его на несколько квантовых состояний с различными поступательными (импульсными) и внутренними состояниями, и к отражению с инвертированием внутренних квантовых состояний. Измеряемый сигнал флуоресценции на выходе интерферометра зависит от разности населенности атомов в основном и возбужденном состояниях, которая определяется разностью фаз атомных состояний, приобретаемых при движении атомов по различным квантовым траекториям. Приобретаемая атомами разность фаз имеет высокую чувствительность к внешним воздействиям (вращению, ускорению и действия гравитационного потенциала). Данное обстоятельство является принципиальным и используется для создания высокочувствительных атомных интерферометров. Отметим, что первые предложения использования схемы основанную на резонансном взаимодействии атома с разнесенными бегущими волнами в качестве атомного интерферометра была высказана в работе Борде (Ch. Borde) [1], где также было предложено использовать атомный интерферометр для измерения вращения и ускорения. К настоящему времени работы в данном направлении получили широкое развитие в ведущих мировых научных центрах (обзор проводимых достижений и проводимых работ будет дан в разделе «Анализ современного состояния исследований в данной области»).

Базовым элементом рассматриваемой задачи являются фундаментальные процессы, при взаимодействии атомов со световым полем. Стоит отметить, что задача о взаимодействии атомов со световым полем достаточно сложна и для ее решения используют различные приближения. Так, пренебрежение эффектом отдачи (обменом энергии и импульсом в единичных актах поглощения/излучения фотонов поля) часто используется в различных спектроскопических задачах, где взаимодействие атомов с лазерным полем приводит лишь к изменению его внутренних состояний. В задаче лазерного охлаждения атомов световым полем напротив, как правило, используют квазиклассическое описание, сводящееся к силовому действию светового поля на атомы (см. например [2-4]). При этом изменение его внутренних состояний исключается из анализа. Имеющиеся квантовые подходы, учитывающие изменение внутренних и поступательных степеней свободы, а также их корреляцию ограничиваются рядом простых примеров, как правило, одномерными конфигурациями световых полей и случаем стационарных (нединамических) решений (см. например [5-7]). Отметим, что список приведенных работ далеко не полный, но в целом отражает направленность развитых теоретических подходов и математических методов, использующихся для решения задачи о взаимодействии атомов со световым полем с учетом кинетических эффектов. Несмотря на указанную сложность, развитие современных вычислительных систем может позволить выйти на новый уровень в развитии теоретических методов и численных подходов в решении задачи о временной динамике квантовых состояний атомных ансамблей в когерентных световых полях, выходящие за рамки рассматриваемых ранее приближений. Рассматриваемая в проекте задача экспериментального и теоретического исследования динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах подразумевает развитие новых теоретических подходов и их экспериментальной проверки для динамического

описания кинетики квантовых состояний атомов в световых полях с полным учетом эффектов отдачи, т.е. с учетом изменения внутренних степеней свободы атомов в результате оптической накачки и поступательных степеней свободы при передаче импульса энергии фотонами поля в полях произвольной пространственной конфигурации для реальных атомов (цезия, рубидия – наиболее перспективных для использования в атомных интерферометрах) с учетом вырожденности их атомных уровней по проекции углового момента.

Развитие данных методов позволит провести анализ различных схем атомных интерферометров чувствительных к вращениям, ускорениям и воздействиям гравитационного поля Земли, степень их чувствительности к другим воздействиям (магнитных и электрических полей), исследования влияния квантовых шумов лазерных систем в атомных интерферометрах и исследования возможности построения на их основе высокочувствительных квантовых датчиков, в частности датчиков инерционных ускорений, вращений, гравиметров и градиентометров гравитационного поля.

#### **список литературы:**

1. Ch.J. Bordé, Atomic interferometry with internal state labeling, *Physics Letters A* 140, 10-12 (1989).
2. А.П. Казанцев и др «Механическое действие света на атомы», Москва «Наука», 1991
3. В.Г. Миногин, В.С. Летохов, Давление лазерного излучения на атомы, М.: Наука, 1986
4. О.Н. Прудников, А.В. Тайченачев, А.М. Тумайкин, В.И. Юдин, Кинетика атомов в поле, образованном эллиптически поляризованными волнами, *ЖЭТФ* 125, 499-517 (2004)
5. D.J. Wineland, W.M. Itano “Laser cooling of atoms” *Phys. Rev. A* v.20 1521 (1979)
6. A Aspect, E Arimondo, R Kaiser, N.Vansteenkiste, and C. Cohen-Tannoudji “Laser cooling below the one-photon recoil energy by velocity-selective coherent population trapping: theoretical analysis” *JOSAB* v. 6, 2112 (1989)
7. О.Н. Прудников, Р.Я. Ильенков, А.В. Тайченачев, А.М. Тумайкин, В.И. Юдин "Стационарное состояние ансамбля атомов малой плотности в монохроматическом поле с учетом эффектов отдачи", *ЖЭТФ*, т.139, 1074-1080 (2011)

#### **5.1. Постановка задачи**

1. Непосредственной задачей проекта является развитие численных методов, с использованием современных вычислительных систем (с использованием ИВЦ НГУ), направленных на решение задачи динамики квантовых состояний в атомных интерферометрах.
2. Важной фундаментальной задачей является построение физико-математической модели, позволяющей описывать динамику квантовых состояний атомных ансамблей с полным учетом как эффектов насыщения та и эффектов отдачи и их взаимной корреляции.
3. Разрабатываемая модель будет использоваться для исследования динамики квантовых состояний реальных атомов (Cs, K, Rb, Mg, ионов Yb<sup>+</sup>) анализа и проектирования различных схем атомных интерферометров, исследования степени их чувствительности к вращениям, ускорениям, воздействиям гравитационного поля Земли и другим (воздействиям магнитных и электрических полей).
4. Теоретический анализ и численные расчеты проводятся на базе ИВЦ НГУ. Экспериментальная проверка полученных результатов будет проводиться на базе экспериментальных установок Института Лазерной Физики СО РАН (с ионами Yb, либо атомами Mg).

#### **5.2. Современное состояние проблемы**

В современном мире все более широкое применение находят квантовые технологии, основанные на применении законов квантовой физики для практического управления сложными квантовыми системами на уровне их индивидуальных компонентов – атомов, ионов, молекул, примесных центров, фотонов и т.п. В целом в области квантовой обработки информации принято выделять четыре направления развития исследований: атомные часы и системы синхронизации; квантовые коммуникации; квантовые сенсоры и датчики; квантовые вычисления. Экспериментальные и теоретические исследования по атомной интерферометрии были начаты еще в 80-х годах прошлого столетия. Существенный прогресс этих исследований [1-5] за последние 20 лет связан с развитием экспериментальных методов и технологий лазерного охлаждения атомов и атомной оптики. В настоящее время, в исследования в данном направлении вовлечены ведущие институты, университеты и инновационные компании.

Текущий уровень развития исследований атомных интерферометров в мире достаточно высок. Так например, атомные интерферометры на холодных атомах позволяют создавать гравиметры с чувствительностью на уровне 50 мкГал/√Гц и точностью измерений на уровне 1 мкГал (относительная точность dg/g ~ 10<sup>-9</sup>). Уже коммерчески доступные образцы переносимых гравиметров с АИ на холодных атомах изготавливаются фирмой mQuans (<http://www.muquans.com/>). Стоит отметить, что, несмотря на то, что подобные экземпляры в настоящий момент дают сравнимую с классическими баллистическими лазерными гравиметрами точность измерений, атомные гравиметры значительно превосходят классические варианты в чувствительности, что позволяет проводить измерения за значительно более короткие времена, что открывает потенциал для использования их в том числе и на подвижной платформе. Несмотря на множество достигнутых результатов объем научных работ в данном направлении непрерывно растет, что связано с высокими перспективами атомных интерферометров.

1. A.D. Cronin, J. Schmiedmayer, D.E. Pritchard, Optics and interferometry with atoms and molecules, Rev. Mod. Phys. 81, 1051–1129 (2009).
2. P.R. Berman (ed.), Atom Interferometry, Academic Press, (1997).
3. Б.Я. Дубецкий, А.П. Казанцев, В.П. Чеботаев, В.П. Яковлев, Интерференция атомов и получение атомных пространственных решеток в световых полях, Письма в ЖЭТФ 39, 531-533 (1984).
4. Ch.J. Bordé, Atomic interferometry with internal state labeling, Physics Letters A 140, 10-12 (1989).
5. J.F. Clauser, Ultra-high sensitivity accelerometers and gyroscopes using neutral atom matter-wave interferometry, Physica B 151, 262-272 (1988).

#### 5.4. Полученные результаты

1. Развита новая численная модель и построена физико-математическая модель для исследования квантовой задачи динамической эволюции состояния атомов, взаимодействующих с динамически меняющимся когерентным полем световых волн, имеющих в общем случае различные поляризации. Построенная модель позволяет описывать эволюцию состояний атомной системы с учетом эффектов отдачи (обмена энергией и импульсом в единичных актах поглощения/излучения фотонов поля), а также при наличии внешних воздействий (вращения, ускорения, воздействия гравитационного поля, воздействия электрических и магнитных полей).

При этом рассмотрены различные подходы для решения данной задачи:

1а. Развита модель на основе динамического решения квантового кинетического уравнения (ККУ) для атомной матрицы плотности.

1б. В дополнении к методу, основанному на численном решении (ККУ), исследованы варианты реализации квантовых методов Монте-Карло, описывающих эволюцию атомных систем взаимодействующих с резонансным световым полем. В данном методе эволюция квантовых систем рассматривается на основе волнового уравнения Шредингера (в импульсном, а также в координатном представлении), а процессы спонтанного излучения фотонов описываются в формализме «квантовых скачков» приводящих к коллапсу волновой функции.

Стоит отметить, что представленный подход, основанный на решении ККУ для атомной матрицы плотности является более полным и позволяет проследить эволюцию квантовых состояний, описываемых матрицей плотности, содержащей информацию, как о внутренних степенях свободы атомной системы, так и о поступательных и их взаимной корреляции в результате эффектов отдачи в единичных актах поглощения/излучения фотонов поля. Развита модель позволяет проследить эволюцию атомных состояний в результате оптической накачки, а также их изменение в результате поглощения/потери импульса, передаваемого фотоном лазерного поля. Корреляции изменения внутренних и поступательных степеней свободы атомов, взаимодействующие с внешним световым полем значительно осложняют данную задачу и делают ее практически не решаемой. Предложенный в проекте метод, для «двухточечной» атомной матрицы плотности в координатном пространстве позволил привести основное интегрально-дифференциальное ККУ для атомной матрицы плотности к конечной форме линейных дифференциальных уравнений, допускающих численное решение с использованием современной вычислительной техники.

Необходимо отметить, что оба предложенных метода (1а) решение динамической задачи для атомной матрицы плотности на основе ККУ и (1б) подходов использующих квантовые методы Монте-Карло дают полностью схожие результаты. Тем не менее, несмотря на достаточно простую реализацию методов квантовых методов Монте-Карло, их недостаток заключается в достаточно большом времени вычислений, требуемых для статистического усреднения квантовых траекторий необходимых для определения измеряемых физических величин для анализа интерференции квантовых состояний в атомном интерферометре. Поскольку дисперсия измеряемых величин обратно пропорциональна корню из числа измерений, для качественного сопоставления результатов с требуемым уровнем достоверности требовался расчет порядка 3000 квантовых траекторий, что значительно увеличивало время расчетов.

В сравнении с развитыми квантовыми методами Монте-Карло предложенный подход, основанный на решении динамической задачи для атомной матрицы плотности на основе ККУ, требует достаточного объема оперативной памяти вычислительной системы, но позволяет значительно сократить время вычислений.

Atom	$T_D$	$\lambda$	$\omega_R/\gamma$
$^{200}\text{Hg}$	32 $\mu\text{K}$	254 nm	0.01
$^{174}\text{Yb}$	4.5 $\mu\text{K}$	556 nm	0.02
$^{88}\text{Sr}$	0.17 $\mu\text{K}$	689 nm	0.635
$^{40}\text{Ca}$	10 nK	657 nm	32.3
$^{24}\text{Mg}$	0.75 nK	457 nm	1100

Таб.1 Длина волны оптического перехода и отношение энергии отдачи к естественной ширине линии интеркомбинационного перехода  $^1S_0\text{-}^3P_1$  различных атомов (Yb, Sr, Ca, Mg) представляющих интерес для реализации высокоточных оптических стандартов частоты, а также оценочные данные для доплеровского предела температуры  $k_B T_D \approx \hbar\gamma / 2$  лазерного охлаждения.

Развитые подходы были использованы для исследования эволюции квантовых состояний атомов в резонансном световом поле в условиях значительного влияния эффектов отдачи, т.е. при описании взаимодействия атомов со светом резонансным узким оптическим переходам атомов (интеркомбинационным или квадрупольным переходам) см. Таб.1. Основным преимуществом таких переходов является существенная корреляция внутренних и поступательных степеней свободы при взаимодействии с фотонами светового поля. Так для атомов магния (таб.1), импульс отдачи, получаемый при поглощении/излучении фотона поля резонансного интеркомбинационному переходу, соответствует скорости атома 3.6 см/с, в то время как доплеровская ширина линии предельна мала  $v = \gamma/k = 0.0014$  см/с.

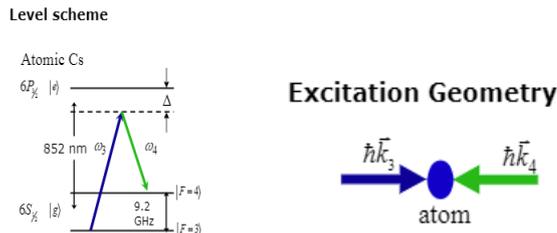


Рис. 2 Схема энергетических уровней атомов Cs. Синими и зелеными стрелками показаны вынужденные оптические переходы используемые для реализации атомного интерферометра.

В отличие от базовых схем атомных интерферометров, использующих элементы щелочных металлов (Рис.2) использование атомов с узкими оптическими переходами позволяет реализовать альтернативные схемы атомных интерферометров. Использование атомов с узкими оптическими переходами, естественная ширина которых меньше, либо сопоставима с энергией отдачи атомов позволяет реализовать связанные когерентные состояния, характеризующиеся одинаковой электронной структурой, но отличающиеся импульсом

$$|\psi\rangle = \alpha |g, p\rangle + \beta |g, p + 2\hbar k\rangle.$$

Используя встречные волны с различными отстройками, удовлетворяющими условию:

$$\delta_1 = \delta_2 + \frac{2kp}{M} + 4 \frac{\hbar k^2}{2M}$$

где  $M$  – масса атома, можно реализовать данное квантовое состояние с импульсом, отличающимся на удвоенный импульс отдачи фотонов поля  $2\hbar k$  (рис.3).

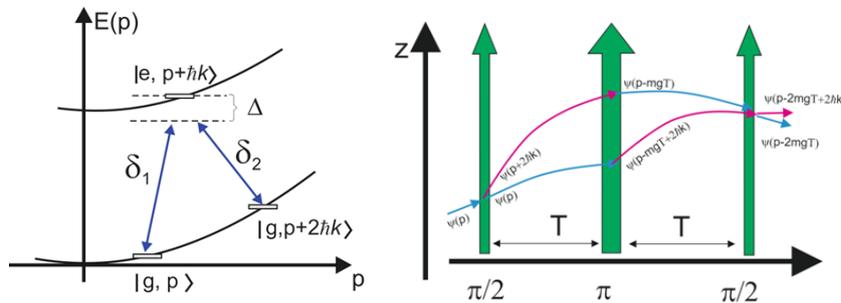


Рис.3. Схема оптических переходов атомного интерферометра с использованием узкого оптического перехода. Встречные световые волны с отстройками  $\delta_1$  и  $\delta_2$  обеспечивают когерентную суперпозицию атомов в состояниях с различным моментом  $|\psi\rangle = \alpha |g, p\rangle + \beta |g, p + 2\hbar k\rangle$  (a). Схема атомно-оптического интерферометра с использованием узкого оптического перехода (b).

Использование интеркомбинационного перехода атомов магния  $^1S_0$ - $^3P_1$  в схемах атомно-оптического интерферометра позволяет реализовать когерентную суперпозицию состояний  $^1S_0$  различающихся на удвоенный импульс отдачи  $2v_{rec} = 7.2$  см/с (рис.3), что в сравнение с другими элементами группы щелочноземельных металлов (рис.2) позволяет получить большую площадь интерферометра (при тех же относительных параметрах систем), что перспективно для реализации высокочувствительных квантовых сенсоров. Другим преимуществом рассматриваемой схемы является её малая чувствительность к воздействию внешних паразитных полей, поскольку в двух плечах интерферометра атомы находятся в одном и том же электронном состоянии и значит испытывают равные полевые сдвиги, что не приводит к разности фаз в плечах интерферометра. Это позволяет, в частности, уменьшить чувствительность такого интерферометра к внешним магнитным полям на пять порядков, по сравнению со схемами стандартных атомных интерферометров на щелочных металлах (рис.2).

Рассмотренная схема с использованием интеркомбинационных оптических переходов  $^1S_0-^3P_1$  атомов (Mg, Sr, Ca, Yb, Hg) является перспективной для реализации атомно-оптических интерферометров и реализации на них схем атомно-оптических гравиметров, градиентометров и гироскопов.

На основе развитых физико-математических подходов было впервые показано, что эволюция различных групп атомных ансамблей с различными соотношениями естественной ширины к энергии отдачи с узкими оптическими переходами (атомы Mg, Sr, Ca, Yb, Hg, интеркомбинационный перехода  $^1S_0-^3P_1$ ) описывается единым образом. Это позволило сформулировать универсальный закон подобия, позволяющих описывать динамику квантовых состояний таких атомов на основе универсальных базовых функций, рассчитанных численно для широкого спектра параметров световых полей.

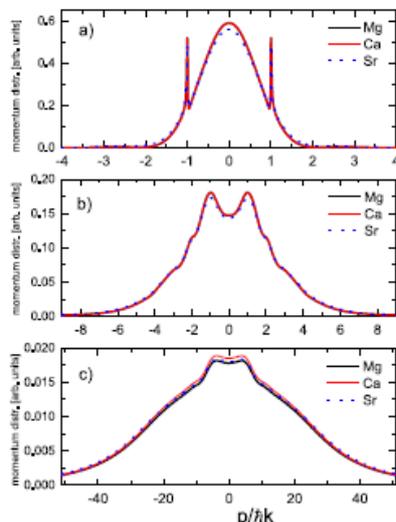


Рис.4 Расчет стационарного распределения ансамбля атомов Ca, Sr, Mg в импульсном пространстве в результате лазерного охлаждения лазерного поля резонансного узкому оптическому переходу  $^1S_0-^3P_1$ .

Обнаруженный «закон подобия» позволяет единым образом описать эволюцию различных атомных систем и подобрать необходимые параметры световых волн и условия для экспериментальной реализации различных задач. В частности, проведены оценки параметров светового поля и времен для экспериментальной реализации быстрого и одновременно сверхглубокого лазерного охлаждения атомов Mg с использованием интеркомбинационного оптического перехода  $^1S_0-^3P_1$  ( $\lambda = 457\text{nm}$ ,  $\gamma = 31\text{Гц}$ , энергия отдачи  $hw_r = 40\text{ кГц}$ ). Приведенные оценки определяют параметры светового поля и условия наиболее быстрого лазерного охлаждения ансамбля нейтральных атомов до температуры 3 мкК, требуемой для эффективной загрузки облака атомов в оптическую решетку, что недостижимо методами доплеровского лазерного охлаждения.

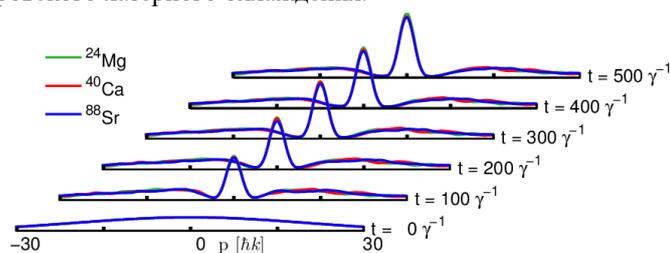


Рис.5 Зависимость временной эволюции импульсного распределения ансамбля атомов Sr, Ca и Mg в результате взаимодействия с лазерным полем резонансным узкому оптическому переходу  $^1S_0-^3P_1$  при эквивалентных условиях (выбраны одинаковые соотношения параметров Раби и отстройки полей к частоте отдачи  $\Omega = 2\omega_R$ ,  $d = -3\omega_R$ ). Показано, что динамика разных атомов может быть описана эквивалентно при выборе параметров поля, удовлетворяющих найденным условиям подобия. Расчеты проведены на основе развитого квантового метода Монте-Карло с вычислением по 3000 траекторий.

Отметим, что указанные оценочные в таблице 1 оценочные значения для доплеровской температуры недостижимы для рассматриваемых атомов, поскольку для рассматриваемых элементов нарушаются условия квазиклассичности, при которых формула для оценки доплеровского предела справедлива. Выполненный в проекте анализ кинетики атомов с полным учетом квантовых эффектов отдачи позволил привести анализ минимальных температур и динамики лазерного охлаждения, что позволило определить оптимальные параметры для лазерного охлаждения указанных элементов.

Предложенная схема будет использована для реализации второй стадии глубокого лазерного охлаждения атомов магния (до температуры 3 мК), предварительно охлажденных до температуры 2 мК в магнито-оптической ловушке, и загрузки их оптическую решетку глубиной 10 мК. Ультрахолодные атомы магния локализованные в оптической решетке представляют интерес как для реализации интерферометрических схем позволяющих создать современные стандарты частоты с высокой точностью и стабильностью  $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-18}$  и лучше, а также как источник холодных атомов для построения гравиметра на основе волн материи и предложенных схем (рис.3).

Развитая физико-математическая модель будет использована для построения и анализа возможностей новых схем атомных интерферометров, необходим для проектирования на их основе высокочувствительных квантовых датчиков.

## **6. Эффект использование кластера в достижении целей работы**

Исследование динамики атомного ансамбля в резонансных световых полях является достаточно сложной задачей, поскольку требует учета изменения не только внутренних состояний атомов, но и поступательных в результате эффектов отдачи вызванных процессами излучения/поглощения фотонов поля, так и учета взаимной корреляции изменения внутренних и поступательных степеней свободы. На начальном этапе исследований был предложен квазиклассический подход, который в рамках квазиклассических приближений позволил разделить эволюцию внутренних степеней свободы и поступательных, что позволило получить выражения для силы и коэффициентов диффузии описывающих эволюцию поступательных степеней свободы атомов. Тем не менее, квазиклассическое приближение нарушается при попытках описания сверхглубоких режимов лазерного охлаждения, наиболее интересных для научных задач, а также не позволяет описывать атомы взаимодействующие с лазерным полем резонансным узким оптическим переходам.

Современное развитие вычислительной техники позволяет подступиться к данному классу задач. Тем не менее, в силу их достаточной сложности требуется развитие современных вычислительных методов, которые могли бы позволить проводить анализ динамики квантовых состояний атомов с учетом эффектов отдачи.

## **7. Перечень публикация содержащих результаты работы**

### **Результаты работ докладывались на российских и международных научных конференциях**

- 1) O.N. Prudnikov et. al. "Laser cooling on narrow-line optical transitions" VIII International Symposium Modern Problems of Laser Physics (MPLP2018), Novosibirsk, Russia, 25 August-1 September, 2018, <http://mplp2018.laser.nsc.ru> (приглашенный доклад)
- 2) O.N. Prudnikov et. al. "Laser cooling on narrow-line optical transitions in monochromatic field", VIII Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Photonics 2018, Kazan, Russia 11-16 October. <http://kfti.knc.ru/rc1p2018/> (приглашенный доклад)
- 3) О.Н.Прудников, и др. "Закон подобия в задаче лазерного охлаждения атомов с узкими оптическими переходами", Всероссийская конференция "Физика ультрахолодных атомов", Новосибирск, Россия, 17-19 декабря 2018 года, <http://www.isp.nsc.ru/quantum18/> (устный доклад)
- 4) Р.Я.Ильенков, О.Н.Прудников, и др. "Исследование возможности глубокого лазерного охлаждения атомов с использованием узких переходов в поляризованных полях", Всероссийская конференция "Физика ультрахолодных атомов", Новосибирск, Россия, 17-19 декабря 2018 года, <http://www.isp.nsc.ru/quantum18/> (устный доклад)
- 5) А.А.Кирпичникова, О.Н.Прудников, "Исследование возможности сверхглубокого лазерного охлаждения с использованием квадрупольного перехода", Всероссийская конференция "Физика ультрахолодных атомов", Новосибирск, Россия, 17-19 декабря 2018 года, <http://www.isp.nsc.ru/quantum18/> (постерный доклад)

### **а также опубликованы:**

1. O. N. Prudnikov, R. Ya. Ilenkov, A. V. Taichenachev, and V. I. Yudin "Scaling law in laser cooling on narrow-line optical transitions" Phys. Rev. A v. 99, 023427 (2019) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.023427>
2. O.N. Prudnikov, R.Ya. Ilenkov, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin "Laser cooling on narrow-line optical transitions in monochromatic field" VII Russian –Chinese Symposium on Laser Physics and Photonics, October 11-16, 2018, Kazan, Russia, program&abstracts
3. O.N. Prudnikov, R.Ya. Ilenkov, A.V. Taichenachev, V.I. Yudin "Laser cooling on narrow-line optical transitions" VIII International Symposium "Modern Problem of Laser Physics", 25 August – 01 September, 2018, Technical Digest, p.34