

Методы квантовой логики в ионных стандартах частоты, квантовых вычислителях и современной спектроскопии

К.Ю. Хабарова, И.В. Заливако, Н.Н. Колачевский

Прецизионное лазерное управление квантовыми состояниями одиночных ионов, охлаждённых до низких температур в ловушках, обеспечивает сегодня значительный прогресс в развитии таких физических направлений, как оптические и микроволновые стандарты частоты, квантовые вычисления, а также точные измерения частот переходов для подтверждения основополагающих физических теорий. Пионерские идеи, высказанные в 1960-х годах нобелевским лауреатом Н.Г. Басовым о возможности использования лазеров при создании стандартов частоты, получили мощное развитие: относительная точность стандартов частоты достигла 18-го знака после запятой, а экспериментально продемонстрированное время когерентности узких оптических переходов достигло десятков секунд. В работе представлен выборочный обзор, а также результаты исследований в ФИАН в области использования элементов квантовой логики при воздействии когерентных лазерных импульсов на одиночные ионы. Также обсуждается использование методов квантовой логики в оптических часах на ионе Al^{+} , многозарядном ионе Ar^{13+} , а также в квантовых вычислителях на ионах Ca^{+} и Yb^{+} .

Ключевые слова: квантовая логика, ион в ловушке, частота Раби, стандарт частоты, квантовый вычислитель, лазерная спектроскопия

PACS numbers: 03.67. – a, 42.50. – p, 42.62.Eh

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.10.039270>

Содержание

1. Введение (1305).
 2. Лазерное возбуждение одиночных ионов (1306).
 3. Оптические часы (1308).
 4. Квантовые вычислители на ионной платформе (1309).
 5. Заключение (1310).
- Список литературы (1311).

1. Введение

XXI век в физике ознаменован началом так называемой "второй квантовой революции", в основе которой лежит широкий круг возможностей создания и управления одиночными квантовыми системами (квантовые технологии). В отличие от "первой квантовой революции", приведшей к появлению мазерно-лазерных источников излучения, светодиодного освещения, полупроводниковой микроэлектроники, солнечных панелей и низкораз-

мерных квантовых систем, где везде задействованы большие ансамбли частиц, в последние годы всё шире развиваются возможности управления одиночными системами, проявляющими квантовые свойства. К ним можно отнести одиночные атомы [1] и ионы (а также их упорядоченные массивы с индивидуальной адресацией) [2], фотоны [3], "искусственные атомы" (центры окраски в алмазах, квантовые точки, одиночные примесные центры в полупроводниках и пр.) [4], выделенные моды в резонаторах различного типа, джозефсоновские структуры [5] и многое другое. Поскольку квантовая природа присуща фактически всем физическим объектам, основной задачей исследователей является поиск двухуровневых (а иногда и многоуровневых [6]) квантовых систем, обладающих достаточно высокой когерентностью, возможностью индивидуальной адресации с помощью внешних полей и эффективного считывания состояний. В случае фотонов в качестве аналога двухуровневой системы зачастую используются состояния поляризации, а управление состояниями реализуется с помощью линейных и нелинейных оптических преобразований. Уже сформировались и развиваются такие направления, как квантовые вычисления [7], квантовая сенсорика [8] и квантовая криптография [9]. Значительные успехи, в том числе в прикладных и коммерческих задачах, достигнуты в области распределения шифро-ключей с использованием одиночных фотонов по оптическим волокнам и открытым каналам [10]. Созданы стандарты частоты на одиночных ионах, уже сегодня достигшим неопределённости воспроизведения частоты на уровне 18 знака после

К.Ю. Хабарова^(1,2), И.В. Заливако^(1,2), Н.Н. Колачевский^(1,2,a)

⁽¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация

⁽²⁾ Российский квантовый центр, территория Инновационного центра "Сколково", Большой бульвар 30, стр. 1, 121205 Москва, Российская Федерация

E-mail: ^(a) kolachevsky@lebedev.ru

Статья поступила 30 сентября 2022 г.

запятой [11], и рассматриваются возможности их использования в системах глобальной спутниковой навигации. Успешно развивается направление квантовых компьютеров, уже сегодня продемонстрировано превосходство таких систем над классическими суперкомпьютерами для решения некоторых специфических задач [12]. Пока не очевидно, сможет ли вторая квантовая революция так же сильно повлиять на научно-технологический уклад общества, как и первая, но ожидания от внедрения новых типов сенсоров, средств коммуникации и вычислений весьма велики.

Все перечисленные достижения, несомненно, опираются на пионерские работы Николая Геннадиевича Басова, чей 100-летний юбилей мы празднуем в этом году. основополагающие принципы мазерно-лазерного излучения лежат в основе всех типов лазеров, работающих сегодня [13]. Появление полупроводниковых лазеров, работа которых, например, лежит в основе всей информационно-телекоммуникационной системы Интернет, также неотрывно связана с именем Басова, именно им посвящена его нобелевская лекция [14]. Идея использовать лазеры и мазеры в качестве точных стандартов частоты и времени [15] привела сегодня к развитию систем глобальной спутниковой навигации, используемой во всём мире. Идеи лазерного термоядерного синтеза и пионерские работы по их реализации также были сформулированы и выполнены при ключевой роли Басова [16]. Подобные примеры можно было бы продолжать и расширять почти до бесконечности, но в настоящей работе хотелось бы сфокусироваться на лазерном управлении отдельными квантовыми объектами — ионами, захваченными в ловушки, представить некоторые результаты и описать перспективы развития данного направления.

2. Лазерное возбуждение одиночных ионов

Взаимодействие двухуровневой системы (или её аналога) с внешним полем удобно описывать с использованием уравнений Блоха [17]. При этом единичный вектор, представляющий состояние системы, будет описывать траектории по сфере Блоха единичного радиуса, которые можно свести к вращениям вдоль трёх осей x , y , z . Соответственно, любое воздействие на систему может быть описано как комбинация операций вращения вокруг соответствующих осей R_x , R_y , R_z . Использование высокостабильных генераторов электромагнитного поля позволяет в большинстве случаев рассматривать поле как монохроматическую волну $E = E_0 \exp(-i\omega t)$, что упрощает описание взаимодействия. С появлением лазерных источников появилась возможность перенести в оптический диапазон те методы, которые ранее были хорошо изучены и апробированы в микроволновом диапазоне, например, известные методы возбуждения Раби и Рэмси. Благодаря богатой структуре уровней в атомных системах и наличию переходов с самыми разными характеристиками (спектрально-широкие и спектрально-узкие, циклические, двухфотонные, Λ -типа и многие другие) появился широчайший круг возможностей управления атомными системами и их анализа. До конца XX века основным объектом исследования для лазерной спектроскопии были большие ансамбли атомов: атомные ячейки, атомные пучки, твёрдое тело. Работа с одиночными квантовыми системами оставалась наиболее сложной по причине несовершенства методов удержания

таких систем, обеспечения эффективного взаимодействия с полем и считывания состояний.

Пионерские работы по демонстрации взаимодействия одиночных атомов с одиночными фотонами были выполнены Гербертом Вальтером в 1984 году [18]. Используя объёмный сверхпроводящий микроволновый резонатор и пучок атомов рубидия в ридберговских состояниях, его группе удалось продемонстрировать работу так называемого "микромазера", что фактически положило начало исследованиям методов управления одиночными квантовыми системами. В 2012 году Дэвид Вайнленд и Серж Арош получили Нобелевскую премию за "создание прорывных экспериментальных методов манипулирования индивидуальными квантовыми системами" [19]. К сожалению, Герберт Вальтер не дожид до этого события, фактически ознаменовавшего переход ко второй квантовой революции. Таким образом, ключевыми инструментами в данной области становятся максимально монохроматический источник электромагнитного излучения (например, лазер) и система удержания одиночного атома с возможностью эффективного возбуждения и считывания. В данном разделе мы сфокусируем наше внимание на взаимодействии лазерного излучения с ионами, захваченными в ловушку Пауля.

Если в 1970-х годах лазеры являлись самостоятельным объектом исследований, то сегодня многие типы лазеров стали очень эффективным инструментом, в том числе в задачах прецизионной спектроскопии. Узкий спектр лазерного излучения, ограничивающийся пределом Шавлова–Таунса [20], хорошо подходит для возбуждения резонансных оптических переходов в атомах и ионах. Выдающийся учёный В.С. Летохов, развивая идеи своего учителя Н.Г. Басова, уже в 1980-х годах описал в своих работах широчайший спектр возможностей, открывающихся при лазерном управлении атомными ансамблями [21]. Яркими примерами служат лазерное разделение изотопов и лазерное охлаждение атомов [22]. При этом достаточно обеспечить спектральную ширину излучения и стабильность его частоты на уровне 1 МГц, что легко достигается с использованием длинных лазерных резонаторов и простых систем стабилизации частоты по стабильному реперу.

Однако при адресации спектрально-узких переходов (магнито-дипольных, электрических квадрупольных и пр.), используемых в стандартах частоты и квантовых вычислителях, требуются лазерные источники с существенно более жёсткими требованиями к спектру. Характерным ограничением на ширину спектра оптической несущей является 1 Гц, что достигается применением специальных методов стабилизации частоты по внешним ультрастабильным резонаторам [23]. Лазерные системы со спектральной шириной порядка 1 Гц де-факто уже являются рутинным инструментом во многих лабораториях, а рекордная спектральная ширина несущей на сегодняшний день составляет десятки мГц, что достигается за счёт стабилизации по криогенным ультрастабильным кремниевым резонаторам [24]. Это позволило продемонстрировать рекордное время когерентности оптического перехода в атоме стронция, составившее в эксперименте 37 с [25].

Помимо требований к оптической несущей в ряде задач, например в квантовых вычислениях, также существенным является уровень спектральных шумов вдали от несущей (диапазон отстроек 100 кГц – 5 МГц) [26]. Так,



Рис. 1. Фотография кристалла из 22 ионов иттербия, захваченных в линейную квадрупольную ловушку Пауля.

для полупроводниковых лазеров в схеме Литтрова, стабилизированных по внешним резонаторам, доля мощности в шумовом пьедестале может достигать 5 % [27] и оказывать нежелательное влияние на возбуждение колебательных мод, и, как следствие, приводить к снижению качества операций. Решение указанной проблемы требует специальных систем фильтрации лазерного излучения (опять же дополнительных внешних высокочастотных резонаторов [28]) или использования лазеров с изначально низким пределом Шавлова – Таунса (например, Ti:Sa-лазеров, некоторых типов волоконных лазеров и пр.). В целом можно сказать, что задача создания настраиваемого на определённую оптическую частоту спектрально-чистого источника лазерного излучения сохраняет актуальность, несмотря на огромный прогресс в этой области, достигнутый в последние десятилетия.

В свою очередь, одиночные ионы, захваченные в ловушку Пауля, являются одним из наиболее удобных и интересных с точки зрения физики объектов исследования. Несмотря на то что сам принцип удержания ионов в линейном или трёхмерном переменном квадрупольном потенциале, формируемом системой электродов, был сформулирован Паулем более 50 лет назад [29], значительный прогресс в области спектроскопии захваченных одиночных ионов начался после появления методов глубокого лазерного охлаждения, продемонстрированных впервые Демельтом и Вайнлендом [30]. В результате одиночный ион оказывается захвачен в минимум так называемого псевдопотенциала, причём напряжённость удерживающего поля в точке нахождения иона равна нулю, что открывает широкие возможности для прецизионной лазерной спектроскопии. При использовании линейных ловушек можно захватить цепочку ионов, которые при лазерном охлаждении до уровня милликельвинов будут выстраиваться в упорядоченные структуры — так называемые ионные кристаллы (рис. 1) [31]. Расстояние между ионами при этом составляет несколько микрон и определяется кулоновским отталкиванием частиц и формой удерживающего продольного потенциала, что обеспечивает возможность индивидуальной адресации (фокусировка лазерного излучения) и оптического считывания (регистрация люминесценции), поскольку разрешающая способность широкоапертурных объективов обычно составляет около 1 мкм.

Замечательным свойством таких систем является возможность использования нормальных колебательных мод для обмена квантовой информацией [32, 33]. Как проиллюстрировано на рис. 2а, каждый электронный уровень иона оказывается расщеплён на множество колебательных подуровней, расстояние между которыми определяется частотами колебательных мод в удерживающем потенциале (обычно от 100 кГц до 1 МГц). Соответственно, квантовое состояние двухуровневой системы $\Psi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ во внешнем (гармоническом) потенциале превращается в $\Psi' = (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|k\rangle$, где k соответствует номеру колебательной моды. В цепочке частиц

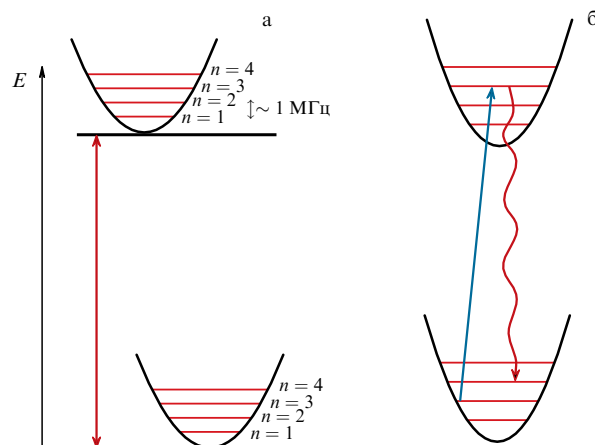


Рис. 2. (В цвете онлайн.) (а) Иллюстрация расщепления электронных уровней на колебательные подуровни в радиочастотном поле ионной ловушки Пауля. (б) Перевод системы в состояние с более высоким колебательным числом при поглощении излучения с синей отстройкой.

колебательные моды (как аксиальные, так и радиальные) являются общими, что и лежит в основе обмена квантовой информацией между частицами в цепочке. Узость спектра лазерного излучения открывает возможность осуществлять переходы с индивидуальной адресацией колебательных подуровней, тем самым добавляя или забирая колебательный квант из цепочки. Например, ион из состояния $|0\rangle|0\rangle$ можно перевести в состояние $|1\rangle|1\rangle$, используя π -импульс с соответствующей синей отстройкой, что добавит один колебательный квант в систему (рис. 2б). Такая техника была впервые предложена Демельтом и Вайнлендом для охлаждения ионов в ловушке Пауля до основного колебательного состояния [34, 35].

Важно отметить, что сильное кулоновское взаимодействие захваченных ионов также позволяет осуществлять так называемое симпатическое охлаждение, широко используемое в ряде экспериментов [36]. Существует много ионных систем, в которых методы прямого лазерного охлаждения либо неприменимы, либо чрезвычайно сложны по причине неудобных длин волн охлаждающих лазеров. При этом такие ионы могут быть захвачены в ловушку (спарринг-ион), обладающую характерной глубиной 1 эВ, что соответствует температуре в тысячи кельвинов. В качестве "холодильника" могут использоваться ионы с удобными для лазерного охлаждения переходами, например, Be^+ , Sr^+ , Ba^+ и другие, в зависимости от требуемого отношения заряда к массе e/m (наиболее эффективно симпатическое охлаждение работает при близких e/m у охлаждающего и спарринг-иона). Использование указанного метода позволяет весьма эффективно достигать как доплеровского предела (единицы мК), так и основного колебательного состояния у спарринг-иона. Таким методом охлаждаются, например, ионы алюминия в оптических часах [37], ионы иттербия в квантовых вычислителях [38], многзарядные ионы [39], рассматривается возможность охлаждения экзотического иона антиводорода [40].

Таким образом, лазерно-оптическое управление состояниями ионов в ловушках Пауля открывает широчайшие возможности для работы с одиночными квантовыми системами как в задачах прецизионной метрологии,

оптических часах, квантовых вычислителях, так и в широком спектре фундаментальных направлений.

3. Оптические часы

Одним из важнейших направлений развития метрологии времени и частоты, лежащей в основе таких ключевых областей, как глобальные системы спутниковой навигации и телекоммуникации, является создание оптических часов. Уникальные свойства одиночных ионов, захваченных в ловушку Пауля, такие как 1) широчайший выбор объектов исследований (можно удерживать фактически любой ион), 2) наличие спектрально узких "часовых" переходов, слабо чувствительных к постоянным электрическим полям и излучению чёрного тела, 3) отсутствие вклада эффекта Доплера первого порядка и 4) отсутствие внешних возмущающих полей в ловушке (ион находится в нуле квадрупольного потенциала, магнитное поле отсутствует) делают их одними из лучших реперов частоты. Достоинствами также являются компактность ловушки, простота системы загрузки, глубокий удерживающий потенциал и длительное время жизни иона, достигающее недель и месяцев в зависимости от уровня вакуума [41]. Наверное, единственным недостатком является сравнительно малая статистика отсчётов в сигнале флуоресценции одиночного иона (по сравнению с оптическими часами на ансамблях нейтральных атомов), и, соответственно, снижение стабильности частоты системы на интервалах 1–100 с примерно на порядок по сравнению с часами на оптических решётках, где одновременно опрашивается 10^4 – 10^5 атомов. Можно отметить, что в ряде случаев используются и ансамбли заряженных ионов, в основном в радиочастотных стандартах. Так, с использованием облака ионов ртути в радиочастотной ловушке созданы часы, работающие на частоте 40 ГГц (частота сверхтонкого перехода основного состояния) [42], ведутся разработки радиочастотного стандарта на ионах иттербия [43]. В случае оптических стандартов возможность перехода от одиночных ионов к ансамблям из 5–10 частиц находится в стадии исследований [44]. Это должно улучшить статистику отсчётов, однако возникают жёсткие требования по чувствительности часового перехода к электрическому полю [45].

Часы на основе одиночного иона в ловушке (переход $^1S_0 \leftrightarrow ^3P_0$ в Ti^+) были впервые предложены Хансом Демельтом в 1973 г. [46]. При этом первые полноценно работающие оптические часы на одиночном ионе были продемонстрированы в США с использованием иона Hg^+ [47]. Сегодня успешно функционирует ряд оптических стандартов на одиночных ионах Sr^+ (674 нм) [48], Hg^+ (282 нм) [49], Yb^+ (467 нм) [50], Ca^+ (729 нм) [51], Al^+ (267 нм) [37] и некоторых других. Характерная относительная нестабильность частоты при времени усреднения 1 с обычно составляет около 10^{-15} (что определяется часовым лазером) и в рекордных случаях снижается до 10^{-18} при времени усреднения 10^6 с. Такие характеристики открывают широкий спектр возможностей решения как практических задач (формирование шкал времени), так и чувствительных фундаментальных тестов.

Для иллюстрации последних нужно упомянуть выполненные впервые лабораторные исследования гравитационного красного сдвига, что было сделано с помощью двух Al^+ стандартов, разнесённых по высоте на 10 см (измеренный относительный сдвиг частоты составил 10^{-17})

[52]. Не менее интересны лабораторные эксперименты по исследованию возможного дрейфа постоянной тонкой структуры α с помощью оптических часов. Первые работы в данном направлении начались в 2000-х годах [53], что позволило наложить ограничение на дрейф на уровне $|d\alpha/dt|/\alpha < 10^{-15} \text{ год}^{-1}$. А в 2021 году с использованием одиночного иона иттербия, захваченного в ловушку Пауля, удалось на три порядка усилить указанное ограничение, составляющее сегодня $|d\alpha/dt|/\alpha < 1,0(1,1)10^{-18} \text{ год}^{-1}$ [54]. Последнего удалось достичь с помощью длительного сличения частот двух различных переходов в одном и том же ионе — квадрупольного на длине волны 436 нм и октупольного на длине волны 467 нм, — обладающих разной чувствительностью к изменению α . На сегодня это является самым жёстким ограничением на дрейф постоянной тонкой структуры в современную эпоху.

Отдельно хотелось бы описать некоторые аспекты работы оптических часов на ионе Al^+ , где впервые были использованы элементы техники квантовых вычислений [55]. Ион алюминия обладает часовым переходом на длине волны 267 нм (естественная ширина линии 8 МГц), который весьма привлекателен для использования в оптических часах за счёт малых вкладов систематических сдвигов частоты, прежде всего, за счёт излучения чёрного тела [56]. При этом охлаждающий переход на длине волны 167 нм оказывается фактически недоступен для современных лазеров, поскольку лежит в ультрафиолетовом диапазоне. И если задача с охлаждением иона относительно легко решается с использованием метода симпатического охлаждения, то вопрос считывания состояния иона после возбуждения часового перехода остаётся открытым. Ставший традиционным метод квантовых скачков, широко применяющийся в стандартах частоты и квантовых вычислителях [57], требует возбуждения сильного (с шириной более 10 МГц) циклического перехода в ионе и регистрации люминесценции на длине волны перехода. В случае если ион находится в основном состоянии, система покажет сильный сигнал люминесценции, а если ион был возбуждён в метастабильное состояние, то люминесценция будет отсутствовать. Однако в случае иона алюминия, опять же, для использования описанного метода требуется лазер на длине волны 167 нм, который недоступен.

Для решения данной задачи Дэвидом Вайнлендом был впервые реализован метод квантовой логики, подробно описанный в [55]. В основе последнего метода лежит добавление колебательного кванта в систему (изначально находящуюся в основном состоянии $|\downarrow_S\rangle|\downarrow_L\rangle|0\rangle$) при возбуждении часового перехода в логическом ионе. В качестве логического иона использовался ион Al^+ (L), симпатическим ионом являлся ион Be^+ (S). Подбирались параметры возбуждающих импульсов часового лазера для спектроскопического и логического ионов таким образом, чтобы волновая функция системы эволюционировала следующим образом: $|\downarrow_S\rangle|\downarrow_L\rangle|0\rangle \rightarrow |\downarrow_S(\alpha)|\downarrow_L + |\beta\rangle|\uparrow_L\rangle|0\rangle \rightarrow |\downarrow_S|\downarrow_L(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow (\alpha|\downarrow_S + \beta|\uparrow_S)|\downarrow_L\rangle|0\rangle$. Это достигается за счёт адресации красных колебательных боковых частот, как показано на рис 3. Видно, что в результате процедуры амплитудные коэффициенты, определяющие вероятность возбуждения часового перехода в логическом ионе (α, β), сначала оказались "записаны" в амплитуду возбуждения *общих* для двух ионов колебательных квантов, а затем — в амплитуду возбуждения спектроскопического иона. Последняя может быть

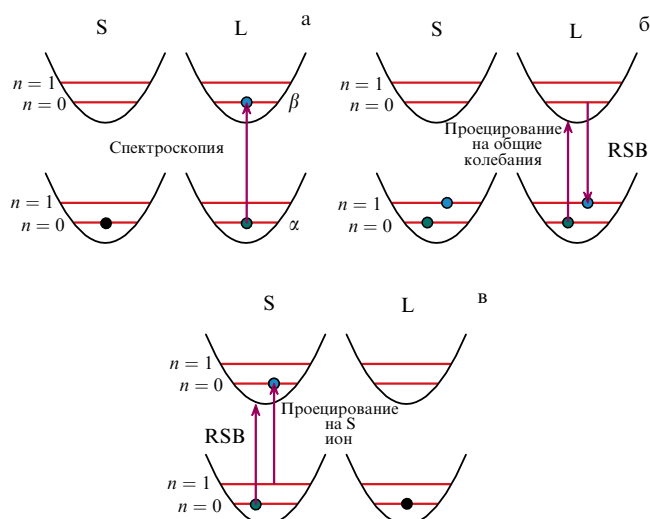


Рис. 3. (В цвете онлайн.) Схема метода спектроскопии посредством квантовой логики. (а) Производится спектроскопия "часового" перехода в логическом ионе (L); (б) прикладывается π -импульс на "часовом" переходе в ионе L с отстройкой в красную область на частоту колебаний (RSB). В результате электронное состояние иона L проецируется на общее колебательное состояние пары ионов; (в) прикладывается π -импульс на "часовом" переходе в ионе S с отстройкой в красную область на частоту колебаний (RSB). В результате общее колебательное состояние проецируется на электронное состояние S.

легко считана с помощью метода квантовых скачков. Это позволило создать одни из лучших оптических часов с нестабильностью воспроизведения частоты на уровне 17-го знака после запятой [58].

Представленный метод оказался чрезвычайно эффективным: за работы в данном направлении Д. Вайндленд был удостоен Нобелевской премии в 2012 г. Одним из наиболее ярких примеров его использования на сегодня является исследование часового перехода в многозарядном ионе Ar^{13+} [59]. Тяжёлый многозарядный ион захватывался в ловушку вместе с симпатическим ионом Be^+ и выполнялась спектроскопия перехода на длине волны 441 нм. Это явилось первой работой по прецизионной лазерной спектроскопии одиночного многозарядного иона: была продемонстрирована относительная нестабильность оптических часов на ионе Ar^{13+} на уровне нескольких единиц 17-го знака, открываются совершенно новые перспективы использования многозарядных ионов в оптических часах [60]. Метод обмена квантовой информации может быть также использован и при регистрации одиночных актов спонтанного испускания фотонов, например, для измерения частоты перехода $1S-2S$ в ионе He^+ [61].

Одним из важных направлений развития оптических стандартов частоты, ставшим, по сути, технологическим, является уменьшение их размера, переход к транспортируемым системам, а в перспективе и к системам космического базирования. Развивается ряд проектов по созданию транспортируемых часов на одиночном ионе Yb^+ [41, 62], Ca^+ [63] и Al^+ [64]. Начиная с 2018 г. в ФИАНе разрабатывается транспортируемый стандарт на одиночном ионе иттербия [41]. Было показано, что созданная установка с габаритами 1 м^3 и весом 300 кг обеспечивает нестабильность воспроизведения частоты лучше 5×10^{-16} с переносом в радиочастотный диапазон

(1 ГГц) с использованием фемтосекундного синтезатора оптических частот (ФСОЧ). Сегодня ведутся работы по улучшению массо-габаритных характеристик, создаётся новая компактная высокостабильная лазерная система, компактная ловушка Пауля, ведутся работы по улучшению характеристик ФСОЧ. Создаваемая система важна для развития релятивистской геодезии [65], а также для перспективных задач системы ГЛОНАСС [66].

4. Квантовые вычислители на ионной платформе

На сегодняшний день ионы, захваченные в ловушку Пауля, являются одними из лучших систем для реализации квантовых операций. Сочетание большого времени когерентности, достигающего часа [67] (для кубитов, закодированных в сверхтонкой структуре), полной изоляции от внешних полей, простого оптического доступа и естественного кулоновского взаимодействия между ионами обеспечивает выполнение фактически всех критериев Ди Винченцо, сформулированных для реализации квантового вычислителя [68]. Основным недостатком ионной платформы является ограниченная масштабируемость, поскольку количество ионов, которые можно захватить в линейную цепочку, ограничено примерно 50 [69].

Пионерское предложение о возможности использования ионов для квантовых манипуляций было сформулировано Сираком и Цоллером в 1995 г. [32], а первые двухкубитные операции на основе данного протокола были реализованы несколько позже в США [70] и Австрии [71] в 1998 и 2003 годах соответственно. В течение последних двух десятилетий направление бурно развивалось. На сегодня продемонстрировано функционирование программируемого 11-кубитного ионного квантового компьютера компании IonQ [72], на котором выполнен ряд ключевых квантовых алгоритмов, при этом достоверность двухкубитной операции в среднем составляет около 97,5 %. Недавно компании IonQ и Honeywell (теперь это подразделение компании было выделено в компанию Quantinuum) независимо заявили о создании 20-кубитных систем, однако эти данные ещё не были опубликованы в рецензируемых журналах. С использованием ионов Yb^+ , захваченных в планарных ловушках Пауля, Quantinuum впервые продемонстрировала полноценное перепутывание двух логических кубитов с использованием алгоритма коррекции ошибок (два логических кубита были закодированы в 20 физических) [73]. Было показано, что алгоритм коррекции позволил увеличить достоверность операции до 99,6 % при достоверности перепутывания физических кубитов менее 99,0 %. Ионные вычислители обладают на сегодня самым высоким квантовым объёмом, равным 4096 (согласно анонсам Quantinuum), — показателем, характеризующем одновременно количество кубитов и глубину вычислительных операций [74]. Таким образом, ионная платформа рассматривается как одна из наиболее перспективных для реализации полноценных программируемых квантовых компьютеров.

Можно отметить, что элементарные манипуляции, требуемые для реализации квантовых вычислителей на ионах (захват, адресация, вращение вектора Блоха по сфере Блоха, считывание) аналогичны используемым в оптических часах и, соответственно, хорошо отрабо-



Рис. 4. История развития исследований ионов в ловушках в ФИАН. (а) Первая ионная ловушка для ионов магния и иттербия. (б) Транспортируемые оптические часы на одиночном ионе $^{171}\text{Yb}^+$. (в) Первый в России 4-кубитный квантовый компьютер на холодных ионах $^{171}\text{Yb}^+$.

таны. Одним из существенных отличий является необходимость выполнения в квантовых вычислителях двухкубитных операций, напоминающих метод квантовой логики, описанный в предыдущем разделе. Двухкубитная операция является "сердцем" любого квантового вычислителя, и для её реализации требуется перепутать две частицы в цепочке. Метод, предложенный Сираком и Цоллером [32], опирается на использование квантованных колебательных мод в цепочке ионов для их перепутывания и, соответственно, обмена квантовой информацией. Сегодня в большинстве экспериментов метод Сирака–Цоллера был заменён на метод Мельмера–Соренсена [33], который оказывается менее требовательным к глубине охлаждения ионной цепочки. Несмотря на схожесть некоторых технических и научных аспектов между оптическими часами и квантовыми вычислителями, последние оказываются существенно сложнее в реализации, поскольку требуют одновременной индивидуальной манипуляции десятками одиночных частиц.

Работы в области квантовых вычислений на одиночных ионах начались в ФИАНе несколько лет назад, и уже сегодня создано несколько поколений ионных ловушек, в которых проводятся опыты [75, 76]. Впервые предложен и исследован оптический кубит на квадрупольном переходе в ионе иттербия [77], исследована достоверность считывания [78] и развит новый метод измерения температуры ионов [79]. В конце 2021 года были выполнены операции на четырёх кубитах, при этом опять же впервые были использованы многоуровневые системы в ионе иттербия — так называемые кудиты [6]. Показано, что два кудита с размерностью гильбертова пространства, равной 4, и возможностью их перепутывания, полностью эквивалентны четырём кубитам. Продemonстрированная в экспериментах достоверность перепутывания двух ионов в ловушке Пауля методом Мельмера–Соренсена пока составила около 80 %, что ограничивается шумами лазерной системы, а также неидеальностью изготовления ловушки.

Работы в ФИАН активно развиваются, в 2022 году запланированы эксперименты уже на 16 кубитах, ведутся работы по улучшению качества операций, разрабатываются новые квантовые алгоритмы, идёт интеграция квантового вычислителя с облачной платформой (рис. 4). Работы выполняются в рамках Дорожной карты по

квантовым технологиям совместно с Российским квантовым центром и рядом других ведущих организаций, входящих в Национальную квантовую лабораторию. Эти исследования позволяют существенно сократить отставание от мирового уровня и вывести данное направление в ряд лидеров и локомотивов научного развития России.

5. Заключение

В отличие от многих других Нобелевских премий, научное наследие Николая Геннадиевича Басова не только не снизило актуальность, но и, на удивление, получило широчайшее развитие как в фундаментальной, так и в практической областях. На ум приходит работа австрийского учёного Кристиана Доплера, в начале XIX века обнаружившего зависимость скорости звука от направления распространения в движущейся среде. Подсчитано, что за прошедшее время было присуждено 24 Нобелевские премии за достижения в медицине, технологии и естественных науках, которые были бы невозможны без использования эффекта Доплера. Интересно было бы посчитать, сколько Нобелевских премий неотрывно связано с работами Н.Г. Басова — думаем, тоже не один десяток. Только в XXI веке по физике было присуждено 9 премий за работы, непосредственно связанные с лазерными исследованиями — прямым наследием Н.Г. Басова. И 2022 год ознаменовался присуждением премии по квантовой оптике Алену Аспе, Антону Цайлингеру и Джону Клаузеру (первые двое коллег несколько лет назад выступали с лекциями в ФИАНе) — за эксперименты с запутанными фотонами, установление нарушения неравенств Белла и первенство в создании науки о квантовой информации. А запутанные фотоны получаются вследствие нелинейного преобразования лазерных импульсов в кристаллах — параметрического преобразования света, что является прямым наследием идей Басова.

Важно отметить и другой, часто забываемый, момент в научной карьере Басова: его докторская диссертация, легшая в основу Нобелевской премии, была написана им в 35 лет. И это с учётом того, что он был "поздним" студентом, прошедшим через фронт в годы Великой Отечественной войны. Конечно, тема данной работы — ла-

зерное управление ионами в ловушках — является лишь малой крупинкой в наследии Н.Г. Басова, но, как мы постарались представить, является актуальной и имеет широкое развитие в его родном институте — Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Список литературы

- Saffman M "Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: progress and challenges" *J. Phys. B* **49** 202001 (2016)
- Bruzewicz C D et al. "Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges" *Appl. Phys. Rev.* **6** 021314 (2019)
- Flamini F, Spagnolo N, Sciarrino F "Photonic quantum information processing: a review" *Rep. Prog. Phys.* **82** 016001 (2019)
- Wolfowicz G et al. "Quantum guidelines for solid-state spin defects" *Nat. Rev. Mater.* **6** 906 (2021)
- Linke N M et al. "Experimental comparison of two quantum computing architectures" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **114** 3305 (2017)
- Kiktenko E O et al. "Single qubit realization of the Deutsch algorithm using superconducting many-level quantum circuits" *Phys. Lett. A* **379** 1409 (2015)
- Georgescu I "Trapped ion quantum computing turns 25" *Nat. Rev. Phys.* **2** 278 (2020); "40 years of quantum computing" *Nat. Rev. Phys.* **4** 1 (2022)
- Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P "Quantum sensing" *Rev. Mod. Phys.* **89** 035002 (2017)
- Pirandola S et al. "Advances in quantum cryptography" *Adv. Opt. Photon.* **12** 1012 (2020)
- Yin J et al. "Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres" *Nature* **582** 501 (2020)
- Belov K et al. "Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network" *Nature* **591** 564 (2021)
- Arute F et al. "Quantum supremacy using a programmable superconducting processor" *Nature* **574** 505 (2019)
- Басов Н Г, Прохоров А М "Молекулярный генератор и усилитель" *УФН* **57** 485 (1955)
- Basov N G "Semiconductor lasers" Nobel Lecture, December 11, 1964. The Nobel Foundation, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/basov-lecture.pdf>; *Science* **149** 821 (1965); Басов Н Г "Полупроводниковые квантовые генераторы" *УФН* **85** 585 (1965)
- Басов Н Г, Летохов В С "Оптические стандарты частоты" *УФН* **96** 585 (1968); Basov N G, Letokhov V S "Optical frequency standards" *Sov. Phys. Usp.* **11** 855 (1969)
- Басов Н Г, Крохин О Н "Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора" *ЖЭТФ* **46** 171 (1964); Basov N G, Krokhin O N "Conditions for heating up of a plasma by the radiation from an optical generator" *Sov. Phys. JETP* **19** 123 (1964)
- Riehle F *Frequency Standards: Basics and Applications* (Weinheim: Wiley-VCH, 2004); Пер. на русск. яз.: Риле Ф *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009)
- Meschede D, Walther H, Müller G "One-atom maser" *Phys. Rev. Lett.* **54** 551 (1985)
- "Particle control in a quantum world", The Nobel Prize in Physics 2012. Press release. The Nobel Foundation, <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-18.pdf>; Пер. на русск. язык: "Управление частицами в квантовом мире" *УФН* **184** 1067 (2014); Wineland D J "Nobel Lecture: Superposition, entanglement, and raising Schrödinger's cat" *Rev. Mod. Phys.* **85** 1103 (2013); Вайнленд Д Дж "О суперпозиции, перепутанности и о том, как вырастить кота Шрёдингера" *УФН* **184** 1089 (2014); Haroche S "Nobel Lecture: Controlling photons in a box and exploring the quantum to classical boundary" *Rev. Mod. Phys.* **85** 1083 (2013); Арош С "Управление фотонами в ящике и изучение границы между квантовым и классическим" *УФН* **184** 1068 (2014)
- Schawlow A L, Townes C H "Infrared and optical masers" *Phys. Rev.* **112** 1940 (1958)
- Летохов В С, Чеботаев В П *Принципы нелинейной лазерной спектроскопии* (М.: Наука, 1975); Пер. на англ. яз.: Letokhov V S, Chebotayev V P *Nonlinear Laser Spectroscopy* (Berlin: Springer-Verlag, 1977)
- Letokhov V *Laser Control of Atoms and Molecules* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2007)
- Alnis J et al. "Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities" *Phys. Rev. A* **77** 053809 (2008)
- Kessler T et al. "A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity" *Nat. Photon.* **6** 687 (2012)
- Bothwell T et al. "Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample" *Nature* **602** 420 (2022)
- Levine H et al. "High-fidelity control and entanglement of Rydberg-atom qubits" *Phys. Rev. Lett.* **121** 123603 (2018)
- Kolachevsky N et al. "Low phase noise diode laser oscillator for 1S – 2S spectroscopy in atomic hydrogen" *Opt. Lett.* **36** 4299 (2011)
- Hald J, Ruseva V "Efficient suppression of diode-laser phase noise by optical filtering" *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 2338 (2005)
- Paul W, Raether M "Das elektrische Massenfilter" *Z. Phys.* **140** 262 (1995)
- Wineland D J, Drullinger R E, Walls F L "Radiation-pressure cooling of bound resonant absorbers" *Phys. Rev. Lett.* **40** 1639 (1978)
- Diedrich F et al. "Observation of a phase transition of stored laser-cooled ions" *Phys. Rev. Lett.* **59** 2931 (1987)
- Cirac J I, Zoller P "Quantum computations with cold trapped ions" *Phys. Rev. Lett.* **74** 4091 (1995)
- Sørensen A, Mølmer K "Quantum computation with ions in thermal motion" *Phys. Rev. Lett.* **82** 1971 (1999)
- Wineland D J, Dehmelt H *Bull. Am. Phys. Soc.* **20** 637 (1975)
- Monroe C et al. "Resolved-sideband Raman cooling of a bound atom to the 3D zero-point energy" *Phys. Rev. Lett.* **75** 4011 (1995)
- Larson D J et al. "Sympathetic cooling of trapped ions: A laser-cooled two-species nonneutral ion plasma" *Phys. Rev. Lett.* **57** 70 (1986)
- Brewer S M et al. "²⁷Al⁺ quantum-logic clock with a systematic uncertainty below 10⁻¹⁸" *Phys. Rev. Lett.* **123** 033201 (2019)
- Pino J M et al. "Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture" *Nature* **592** 209 (2021)
- Kozlov M G et al. "Highly charged ions: Optical clocks and applications in fundamental physics" *Rev. Mod. Phys.* **90** 45005 (2018)
- Pérez P et al. "The GBAR antimatter gravity experiment" *Hyperfine Interact.* **233** 21 (2015)
- Khabarova K et al. "Toward a new generation of compact transportable Yb⁺ optical clocks" *Symmetry* **14** 2213 (2022)
- Burt E A et al. "Demonstration of a trapped-ion atomic clock in space" *Nature* **595** 43 (2021)
- Lacroûte C et al. "Compact Yb⁺ optical atomic clock project: design principle and current status" *J. Phys. Conf. Ser.* **723** 012025 (2016)
- Herschbach N et al. "Linear Paul trap design for an optical clock with Coulomb crystals" *Appl. Phys. B* **107** 891 (2012)
- Keller J et al. *Phys. Rev. A* **99** 013405 (2019)
- Dehmelt H G *Bull. Am. Phys. Soc.* **18** 1521 (1973)
- Diddams S A et al. "An optical clock based on a single trapped ¹⁹⁹Hg⁺ ion" *Science* **24** 881 (1999)
- Barwood G P et al. "Agreement between two ⁸⁸Sr⁺ optical clocks to 4 parts in 10¹⁷" *Phys. Rev. A* **89** 050501 (2014)
- Rosenband T et al. "Frequency ratio of Al⁺ and Hg⁺ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place" *Science* **319** 1808 (2008)
- Huntemann N et al. "High-accuracy optical clock based on the octupole transition in ¹⁷¹Yb⁺" *Phys. Rev. Lett.* **108** 090801 (2012)
- Huang Y et al. "Frequency comparison of two ⁴⁰Ca⁺ optical clocks with an uncertainty at the 10⁻¹⁷ level" *Phys. Rev. Lett.* **116** 013001 (2016)
- Chou C W et al. "Optical clocks and relativity" *Science* **329** 1630 (2010)
- Fischer M et al. "New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements" *Phys. Rev. Lett.* **92** 230802 (2004)
- Lange R et al. "Improved limits for violations of local position invariance from atomic clock comparisons" *Phys. Rev. Lett.* **126** 11102 (2021)
- Schmidt P O et al. "Spectroscopy using quantum logic" *Science* **309** 749 (2005)

56. Golovizin A et al. "Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift" *Nat. Commun.* **10** 1724 (2019)
57. Bergquist J C, Itano W M, Wineland D J "Recoilless optical absorption and Doppler sidebands of a single trapped ion" *Phys. Rev. A* **36** 428 (1987)
58. Chou C W et al. "Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks" *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802 (2010)
59. Micke P et al. "Coherent laser spectroscopy of highly charged ions using quantum logic" *Nature* **578** 60 (2020)
60. King S A et al. "An optical atomic clock based on a highly charged ion" *Nature* **611** 43 (2022)
61. Herrmann M et al. "Feasibility of coherent xuv spectroscopy on the $1S - 2S$ transition in singly ionized helium" *Phys. Rev. A* **79** 052505 (2009)
62. Opticlock. BMBF project, <https://www.opticlock.de/>
63. Cao J et al. "A compact, transportable single-ion optical clock with 7.8×10^{-17} systematic uncertainty" *Appl. Phys. B* **123** 112 (2017)
64. Hannig S et al. "Towards a transportable aluminium ion quantum logic optical clock" *Rev. Sci. Instrum.* **90** 53204 (2019)
65. Riehle F "Optical clock networks" *Nat. Photon.* **11** 25 (2017)
66. Rochat P et al. "Atomic clocks and timing systems in global navigation satellite systems", in *Proc. of the 2012 European Navigation Conf.* (2012) p. 25
67. Wang P et al. "Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour" *Nat. Commun.* **12** 233 (2021)
68. DiVincenzo D P "The physical implementation of quantum computation" *Fortschr. Phys.* **48** 771 (2000)
69. Zhang J et al. "Observation of a many-body dynamical phase transition with a 53-qubit quantum simulator" *Nature* **551** 601 (2017)
70. Turchette Q A et al. "Deterministic entanglement of two trapped ions" *Phys. Rev. Lett.* **81** 3631 (1998)
71. Schmidt-Kaler F et al. "Realization of the Cirac-Zoller controlled-NOT quantum gate" *Nature* **422** 408 (2003)
72. Wright K et al. "Benchmarking an 11-qubit quantum computer" *Nat. Commun.* **10** 5464 (2019)
73. Ryan-Anderson C et al. "Implementing fault-tolerant entangling gates on the five-qubit code and the color code", arXiv:2208.01863
74. Cross A W et al. "Validating quantum computers using randomized model circuits" *Phys. Rev. A* **100** 032328 (2019)
75. Семериков И А и др. "Многочастичные потери в линейной квадрупольной ловушке Пауля" *Квантовая электроника* **46** 935 (2016); Semerikov I A et al. "Multiparticle losses in a linear quadrupole Paul trap" *Quantum Electron.* **46** 935 (2016)
76. Семериков И А и др. "Линейная ловушка Пауля для задач квантовой логики" *Краткие сообщения по физике ФИАН* **47** 385 (2020); Semerikov I A et al. "Linear Paul trap for quantum logic experiments" *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **47** 385 (2020)
77. Заливако И В и др. "Экспериментальное исследование оптического кубита на квадрупольном переходе 435 нм в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ " *Письма в ЖЭТФ* **114** 53 (2021); Zalivako I V et al. "Experimental study of the optical qubit on the 435-nm quadrupole transition in the $^{171}\text{Yb}^+$ ion" *JETP Lett.* **114** 59 (2021)
78. Семенин Н В и др. "Оптимизация достоверности считывания квантового состояния оптического кубита в ионе иттербия $^{171}\text{Yb}^+$ " *Письма в ЖЭТФ* **114** 553 (2021); Semenin N V et al. "Optimization of the readout fidelity of the quantum state of an optical qubit in the $^{171}\text{Yb}^+$ ion" *JETP Lett.* **114** 486 (2021)
79. Семенин Н В и др. "Определение скорости нагрева и температуры ионных цепочек в линейной ловушке Пауля по дефазировке осцилляций Раби" *Письма в ЖЭТФ* **116** 74 (2022); Semenin N V et al. "Determination of the heating rate and temperature of an ion chain in a linear Paul trap by the dephasing of Rabi oscillations" *JETP Lett.* **116** 77 (2022)

Methods of quantum logic in ion frequency standards, quantum computers, and modern spectroscopy

K.Yu. Khabarova^(1,2), I.V. Zalivako^(1,2), N.N. Kolachevsky^(1,2,a)

⁽¹⁾ Lebedev Physical Institute Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

⁽²⁾ Russian Quantum Center, Skolkovo IC, Bol'shoi bul'var 30, str. 1, 121205 Moscow, Russian Federation

E-mail: ^(a) kolachevsky@lebedev.ru

Today, precise laser control of the quantum states of single ions cooled to low temperatures in traps ensures significant progress in the development of such physical areas as optical and microwave frequency standards, quantum computing, and accurate measurements of transition frequencies to confirm fundamental physical theories. Pioneering ideas about the possibility of using lasers in the development of frequency standards, expressed in the 1960s by the Nobel laureate N G Basov, have enjoyed rapid development: the relative accuracy of frequency standards has reached the 18th decimal place, and the experimentally demonstrated coherence time of narrow optical transitions amounts to tens of seconds. The paper presents a selective review, as well as the results of research at the Lebedev Physical Institute, in the area of using elements of quantum logic in the action of coherent laser pulses on single ions. Also discussed is the use of quantum logic methods in optical clocks based on the Al^+ ion and the multiply charged Ar^{13+} ion, and also in quantum computers based on Ca^+ and Yb^+ ions.

Keywords: quantum logic, trapped ion, Rabi frequency, frequency standard, quantum computer, laser spectroscopy

PACS numbers: **03.67. – a**, **42.50. – p**, 42.62.Eh

Bibliography — 79 references

Received 30 September 2022

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (12) 1305–1312 (2022)

Physics – Uspekhi **65** (12) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2022.10.039270>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2022.10.039270>