

УДК 53.086

**ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ
МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ПРИМЕНЕНИИ К СОЗДАНИЮ
УЛЬТРАСТАБИЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ**

Константин Игоревич Макаренко

*Магистр 1 года,
кафедра «Проблемы квантовой физики»
Московский физико-технический институт*

*Научный руководитель: И.В. Шерстов,
Ph.D., заведующий лабораторией системных исследований проблем измерения времени
и частоты Сколковского института науки и технологий*

В октябре 2017 года по соглашению с Министерством образования и науки России было начато проведение прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Разработка генератора ультрастабильных опорных сигналов частоты на холодных ионах иттербия для повышения на порядок точности геопозиционирования, космической навигации и формирования новых сегментов массового спроса на рынке приложений глобальной спутниковой навигации». Лидирующую роль в выполнении ПНИЭР взял на себя Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (Москва), возглавляемый член-корреспондентом РАН, д.ф.-м.н. Н.Н. Колачевским. Помимо ФИАН в состав коллаборации вошли: АО "Российские космические системы", Сколковский институт науки и технологий (МО, Сколково), ООО "Авеста-Проект" (МО, Троицк) и Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН (Новосибирск).

На этапе разработки наземного экспериментального образца иттербиевого бортового ионного стандарта (ИБИС) решение ряда важных инженерных задач взяла на себя Лаборатория системных исследований проблем измерения времени и частоты Центра фотоники и квантовых материалов Сколковского института науки и технологий. В данной работе кратко описывается общая направленность работы коллектива инженеров-исследователей данной лаборатории, а также приводится ряд теоретических основ квантовой метрологии, некоторые данные из истории достижений физико-технических наук в области стандартизации времени и частоты и наиболее важные подходы к проектированию сверхточных приборов с помощью различных технологий лазерного охлаждения атомных и ионных частиц.

Из всех экспериментально определяемых физических величин частота может быть измерена с наивысшей точностью [1]. В 1983 году XVII Генеральной конференцией по мерам и весам была принята идея фактического объединения эталонов времени, длины и частоты. Скорость света была декларативно принята в виде фиксированной величины $c = 299792458$ [м/с]. Метр был определён как длина пути, проходимого в вакууме светом за $1/299792458$ долю секунды. Эталон длины, воспроизводящий метр в его новом определении, был реализован при помощи цезиевого эталона времени и частоты, дополненного РОЧМ - радиооптическим частотным мостом.

Стандарты частоты представляют собой приборы, способные синтезировать известные стабильные частоты с определённой погрешностью и обеспечивать потребителя необходимыми реперами (вторичными эталонами) частоты в широчайшем частотном диапазоне, представляющем глубокий интерес для науки и техники. Помимо

этого, стандарты частоты позволяют использовать единую для всех диапазонов единицу - герц.

Любой стандарт или репер частоты имеет две основные определяющие характеристики - точность и стабильность. Для объяснения их сути можно привести наглядный пример со стрелком и мишенью (рисунок 1).

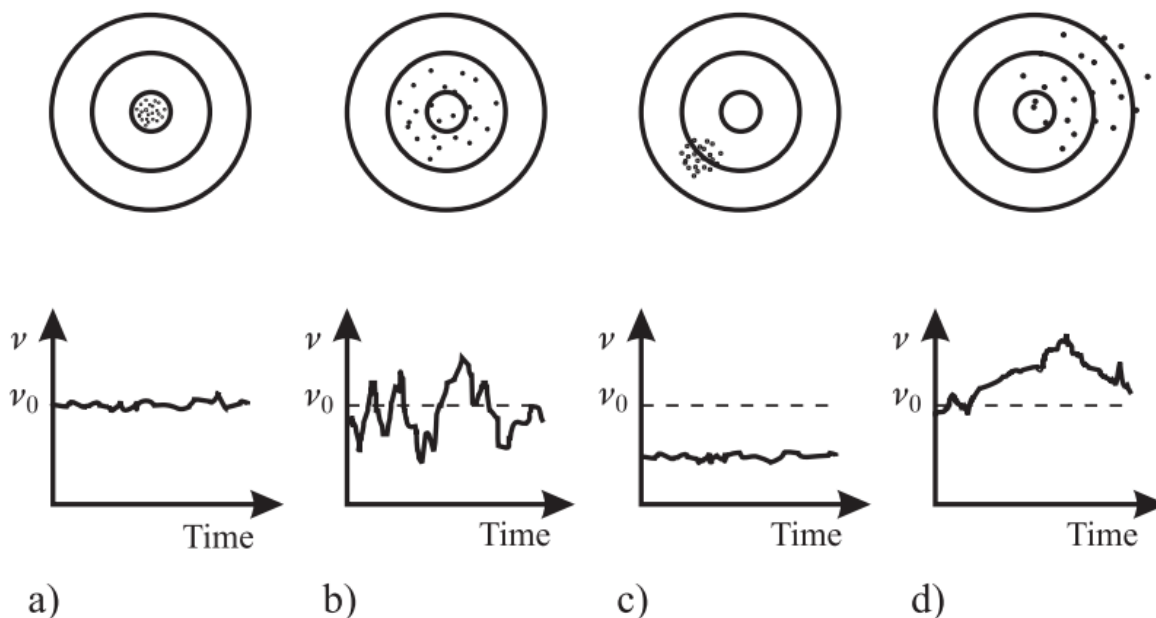


Рис. 1. Мишени с пулевыми отверстиями (верхний ряд), иллюстрирующие различные виды случайных реализаций стрельб: а - стабильную и точную; б - точную, но нестабильную; в - стабильную, но неточную; д - нестабильную и неточную. Нижний ряд - источники частоты с соответствующими характеристиками точности и стабильности сигнала.

Степень относительной нестабильности стандарта или репера частоты характеризуется одной из важнейших величин в квантовой метрологии - дисперсией Аллана. Она является обобщением формулы дисперсии по выборке (квадрата стандартного отклонения для последовательности результатов измерений)

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{1}{N} \cdot \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right)$$

и расширяет её до адекватной численной характеристики случайного процесса в присутствии корреляций:

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \sum_{i=1}^2 \left(\bar{y}_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j \right)^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_2 - \bar{y}_1)^2 \rangle.$$

Это выражение было получено из формулы N-точечной выборочной дисперсии при заданном числе измерений N и заданных величинах интервала между последовательными измерениями T и времени каждого измерения τ

$$\sigma_y^2(N, T, \tau) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\bar{y}_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j \right)^2,$$

в которой, согласно предложению Д. Аллана, было принято $N = 2$, $T = \tau$ и т.н. «мёртвое время» $T - \tau = 0$.

В отличие от классического стандартного отклонения, дисперсия Аллана опирается на измерение разности двух соседних последовательных измерений физической величины, а не на измерение отклонения физической величины от её среднего значения. Любой стандарт или репер частоты характеризуется «графиком стабильности», или «паспортом стандарта» - кривой аллановской дисперсии. На рисунке 2 представлены указанные зависимости для ряда существующих на данный момент в технике стандартов.

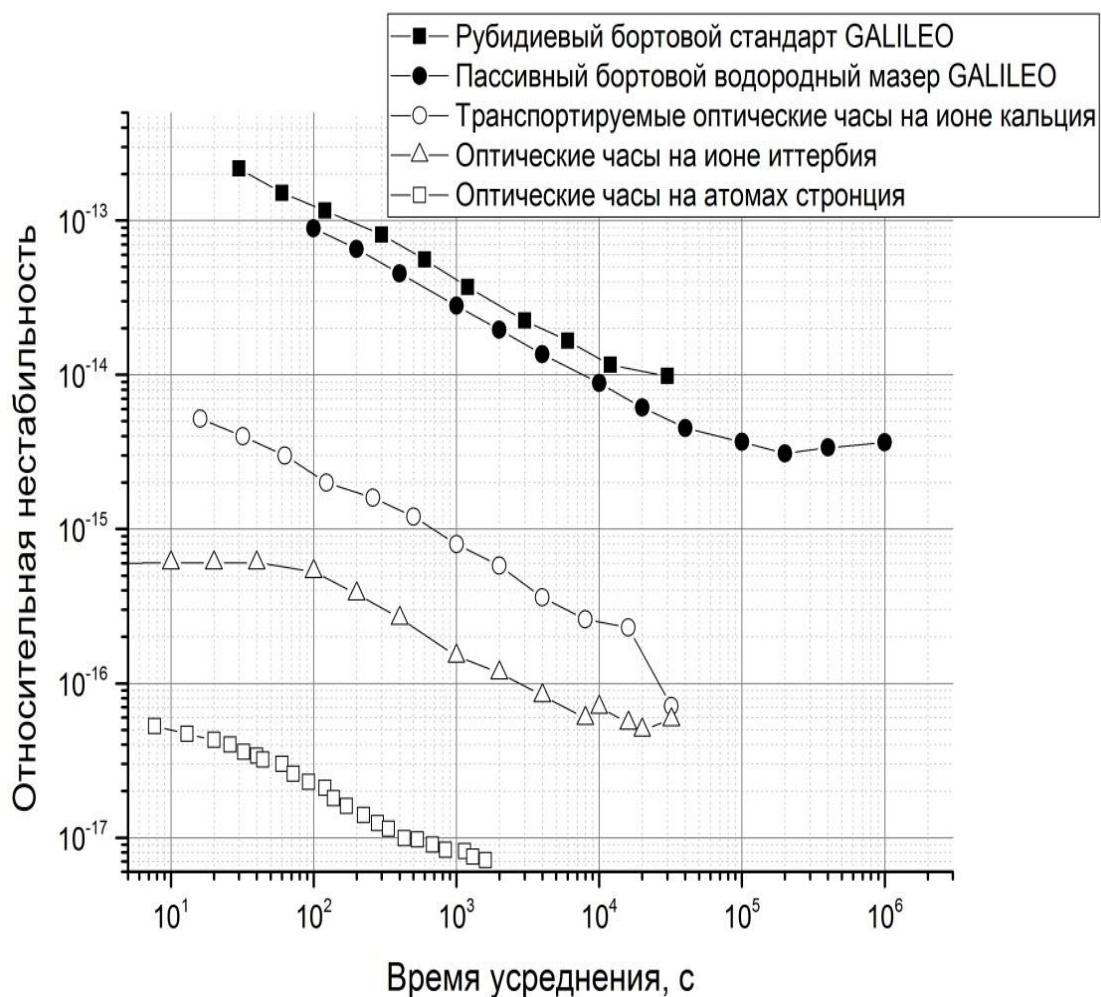


Рис. 2. Сравнение характеристик различных наземных, транспортируемых и бортовых стандартов.

В настоящее время в ФИАН им. П.Н. Лебедева при сотрудничестве Сколтеха, РКС, ООО «Авеста-проект» и ИЛФ СО РАН ведётся разработка транспортируемых оптических часов (стандарта частоты видимого диапазона) на одиночном холодном ионе иттербия. Выдающиеся характеристики стабильности (см. рис. 2) стали

достижимы благодаря переходу из широко распространённого в технике стандартов частоты СВЧ-диапазона в область видимого света, использования одиночного иона вместо ансамбля частиц и практической реализации передовых технологий лазерного охлаждения до температур порядка единиц микрокельвин с использованием ультрастабильных резонаторов и перестраиваемых узкополосных диодных лазеров.

Существуют две наиболее важные и широкоиспользуемые технологии лазерного охлаждения нейтральных атомов и ионов. Первая из них - **доплеровское охлаждение** в т.н. **оптической патоке** (optical molasses). Суть технологии заключается в следующем. Одиночная движущаяся частица (для простоты рассмотрим двухуровневый атом в одномерном случае) облучается встречным лазерным излучением, отстроенным в красную сторону спектра от частоты перехода атома на величину доплеровского сдвига. За частицей установлен рефлектор, отражающий лазерный луч в обратном направлении. Частота фотонов, движущихся навстречу частице, за счёт эффекта Доплера находится ближе к частоте перехода, чем фотонов, «догоняющих» частицу (в системе отсчёта, связанной с частицей). По этой причине вероятность поглощения частиц из встречного потока превышает аналогичную вероятность для попутного, в результате чего число актов поглощения фотонов со встречным импульсом начинает превалировать - на атом начинает действовать зависящая от его скорости равнодействующая сила (рисунок 4), схожая по природе с силой вязкого трения в жидкости, и частица начинает тормозиться, т.е. терять скорость, энергию и температуру. Однако следует оговориться - понятие температуры в физике есть понятие статистическое, и для одиночной частицы оно, вообще говоря, неприменимо. Говоря о температуре одного атома, мы имеем в виду соответствующую этой температуре скорость.

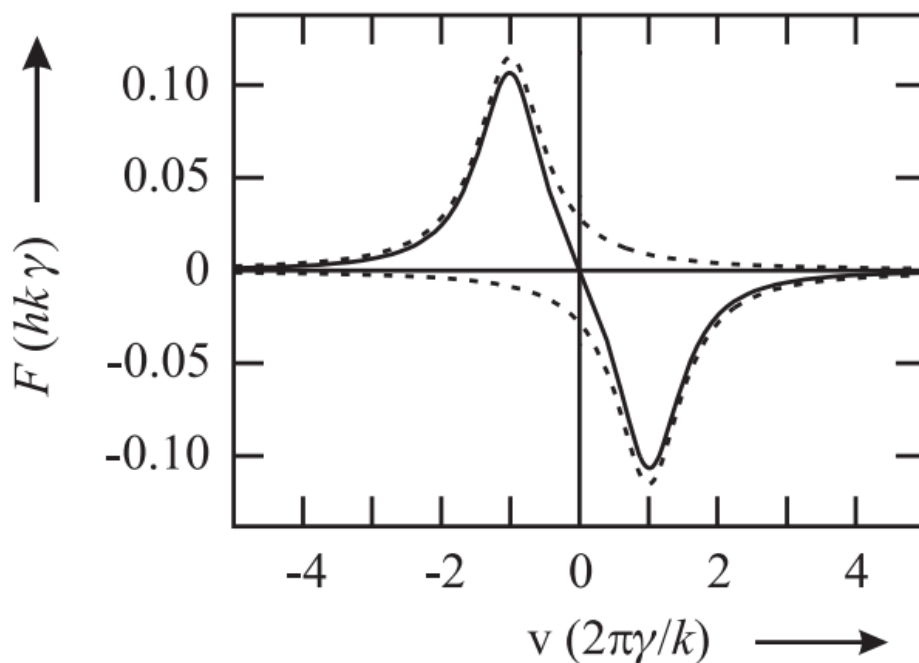


Рис. 3. Зависимость силы светового давления от скорости атома при отстройке частоты лазера ν в красную область от частоты перехода ν_0 на одну спектральную ширину линии $\gamma = 1/2\pi\tau$, где τ - время жизни возбуждённого состояния [1]. Здесь параметр насыщения $S_0 = 0.3$.

Вторая технология, позволяющая достичь ещё более низких температур - **субдоплеровское лазерное охлаждение**, или т.н. механизм «сизифова охлаждения». В

данной технологии частицы движутся в лазерном поле с сильным градиентом поляризации, таким, что направление поляризации полностью изменяется на половине длины волны излучения (рисунок 4). Такой градиент можно получить, например, в двух встречных световых потоках одной и той же амплитуды и частоты, но с перпендикулярными линейными поляризациями. В таком световом поле магнитные подуровни основного и возбуждённого состояний атомной системы испытывают световые сдвиги, изменяющиеся в пространстве из-за наличия градиента поляризации. Это приводит к тому, что в разных точках пространства разрешённые переходы при поглощении фотона атомом отличаются от разрешённых переходов при релаксации. Поглощая фотон, атом «взбирается» на потенциальный холм, совершая разрешённый в данной точке пространства переход и теряя кинетическую энергию. При релаксации атом переизлучает фотон, теряет потенциальную энергию и возвращает себе потерянную ранее кинетическую, но она оказывается меньше первоначальной из-за разницы между энергиями разрешённых переходов при поглощении и релаксации. Процесс «потенциальных» спусков и падений повторяется многократно - отсюда и аналогия с древнегреческим мифом о Сизифе. После каждой пары актов поглощения - переизлучения кинетическая энергия атома, его скорость и, соответственно, температура уменьшаются. Оптимальный режим работы в механизме субдоплеровского лазерного охлаждения - тот, при котором среднее время переброса атома на другой магнитный подуровень равно времени прохождения атомом расстояния $\lambda/2$, где λ - длина волны лазерного излучения.

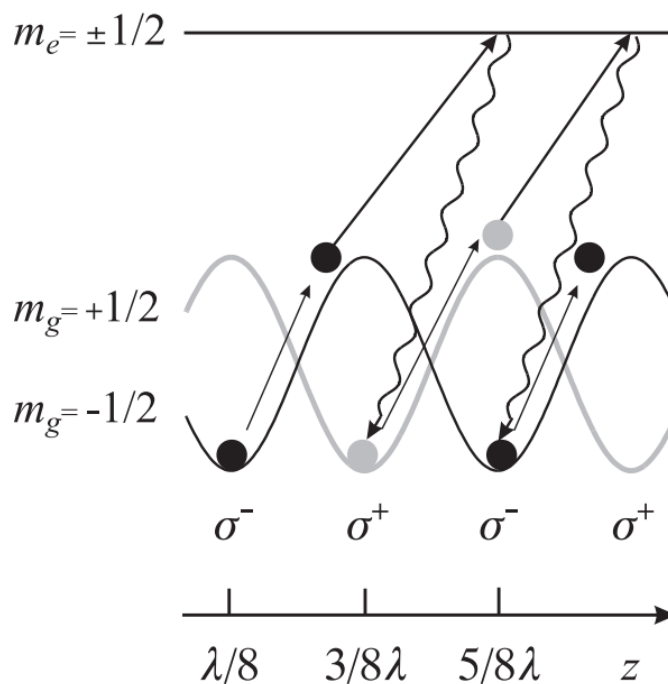


Рис. 4. Картина расщепления энергии магнитных подуровней основного и возбуждённого состояний, приводящая к пространственной модуляции взаимодействия частицы с полем [1].

Температурным пределом, определяющим минимальную теоретически достижимую температуру при субдоплеровском лазерном охлаждении, является т.н. предел отдачи, обусловленный невозможностью атома поглотить фотон и остаться на нулевой скорости в силу закона сохранения импульса. Теоретический температурный предел для доплеровского механизма лазерного охлаждения - доплеровский предел -

является более строгим, чем предел отдачи, и не позволяет в этом механизме достичь настолько же низких температур, как для технологии субдоплеровского охлаждения.

Для реализации на практике различных механизмов лазерного охлаждения необходимо локализовать частицу, т.е. создать условия для удержания её в ограниченной области пространства, в которой она бы совершала финитное движение [2]. Это требование для атомов и ионов выполняется с помощью специальных ловушек: для атомов - атомных, для ионов - ионных. Среди **ионных ловушек** следует выделить два основных типа - это ловушки на переменном неоднородном электрическом поле (радиочастотные ловушки, или **ловушки Пауля**), а также ловушки на комбинации статических магнитного и электрического полей (**ловушки Пеннинга**). В каждой из этих ловушек заключенный в них ион совершает в трёхмерном случае три типа колебательного движения: в ловушке Пауля - micromotion (осцилляции на частоте приложенного поля с отставанием от него по фазе на π), а также радиальные и аксиальные колебания; в ловушке Пеннинга - циклотронное движение (быстрые колебания вокруг линий напряжённости магнитного поля с частотой ω_c), аксиальное движение (гармонические колебания вдоль направления магнитного поля с частотой ω_z) и магнетронное движение (медленные смещения) с частотой ω_m (рисунок 5). Если же говорить об **атомных ловушках**, то в их случае силы, воздействующие на нейтральные атомы и молекулы гораздо слабее, чем силы электростатического взаимодействия. В основном они основаны на взаимодействии градиента внешнего электрического поля с наведённым электрическим моментом частицы или магнитным дипольным моментом частицы.

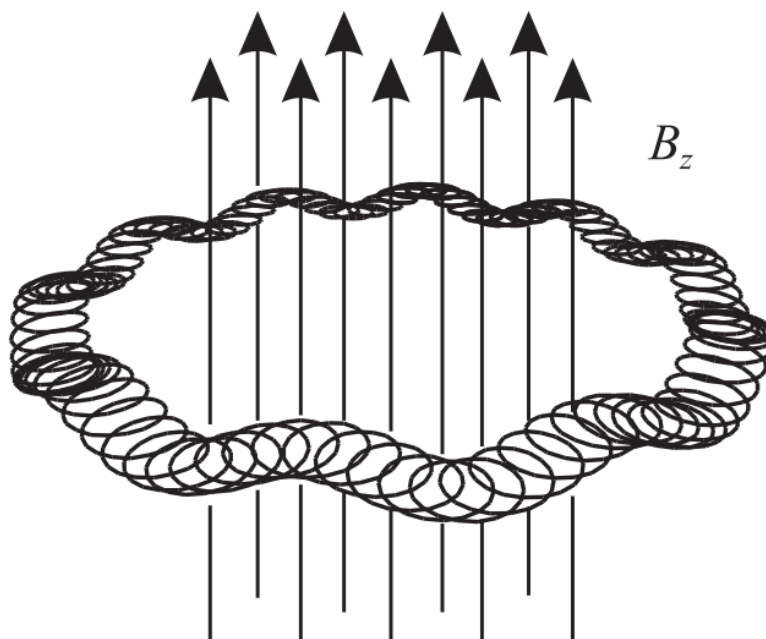


Рис. 5. Траектория иона в ловушке Пеннинга, представляющая собой орбиту с эпициклами в плоскости $x - y$, на которую наложены колебания вдоль направления магнитного поля (оси z) [1]. Изображённая траектория соответствует случаю $\omega_c = 10 \cdot \omega_z = 100 \cdot \omega_m$.

Целью разработки ультрастабильного бортового оптического стандарта частоты на одиночном ионе иттербия является дальнейшее использование его в различных отраслях науки, техники и народного хозяйства. Наиболее обширным и существенным из них является глобальная спутниковая навигация. Повышение точности и

стабильности бортовых часов влечёт за собой увеличение точности геопозиционирования - определения координат объекта на Земле. На данный момент ставится амбициозная, но вполне решаемая задача повысить эту точность для системы ГЛОНАСС до единиц деци- и даже сантиметров. Такая точность может быть крайне востребована как для военных, так и гражданских применений. К последним относятся: мониторинг автотранспорта, в т.ч. беспилотного, контроль за движением железнодорожных составов, высокоточная посадка самолётов и швартовка кораблей в портах, движение аппаратов в космическом пространстве, мари- и сельское хозяйство (локальный полив, вспашка и внесение удобрений в почву), реализация наукоёмких комплексов в рамках т.н. «умных» городов и т.д. Помимо навигационных систем, можно перечислить ещё ряд важных направлений применения ультрастабильных стандартов частоты:

1) Передача сигнала точного времени для использования в time-based services - сервисах точного времени и синхронизации.

2) Фундаментальная наука: повышение точности измерения фундаментальных констант (джозефсоновская постоянная, постоянная Ридберга, постоянная сверхтонкой структуры), детектирование гравитационных волн, гравиметрия [3].

3) Картография, геодезия, исследование океанического и морского дна, прогнозирование стихийных бедствий.

В настоящее время автором работы в составе команды инженеров-исследователей Сколковского института науки и технологий разрабатывается архитектура, дизайн, конструкция и технология изготовления модуля системы соединения и корпуса наземного образца итербиевого бортового стандарта. Согласно требованиям технического задания, при эксплуатации изделия должны быть строго выдержаны условия поддержания микроклимата, избыточного давления, класса чистоты атмосферы, экранирования внешних магнитных полей и защиты от вибраций в области расположения наиболее ответственных оптических узлов установки. Проведённая работа над миниатюризацией, компактизацией и облегчением изделия на данный момент уже сократила ряд массогабаритных характеристик стандарта частоты почти в 1.5 раза по сравнению с требуемыми значениями.

Литература.

1. *Риле Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 512 с. - ISBN 978-5-9221-1096-9.
2. *Huntemann N.* High-Accuracy Optical Clock Based on the Octupole Transition in $^{171}\text{Yb}^+$. Doktor der Naturwissenschaften Dr. rer. nat. genehmigte Dissertation. Der Fakultät für Mathematik und Physik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Germany, 2014.
3. *Хабарова К.Ю., Кудеяров К.С., Колачевский Н.Н.* Стандарты частоты на ультрахолодных атомах в тестах общей теории относительности, навигации и гравиметрии. Квантовая электроника, 47:5 (2017), 394–399 [Quantum Electron., 47:5 (2017), 394–399]. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://mi.mathnet.ru/qr16607> (дата обращения 25.11.2017).