



## ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ АСПЕКТОВ КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Дж. Н. Тан, Национальный институт стандартов и технологий США (NIST), группа атомной спектроскопии; Б. Стайн, NIST; Б. Спренджер, Menlo Systems США; Б. Хакер, Институт квантовой оптики общества Макса Планка, Германия; Т. Шумм, Институт атомной и субатомной физики, Венский технический университет, Австрия

Технология использования сверхбыстрых лазеров и спектроскопия для изучения свойств материи используют излучение фемтосекундных лазеров ( $10^{-15}$  с) и других источников. Чрезвычайно короткая длительность импульса позволяет создавать, обнаруживать и изучать очень кратковременные промежуточные химические реакции и переходные состояния. Сверхбыстрые лазеры могут также использоваться для генерации лазерных импульсов с огромной пиковой мощностью и плотностью потока энергии. Это позволяет использовать их в таких областях, как лазерная машинная обработка и лазерная абляция, генерация электромагнитного излучения на необычных длинах волны (таких как миллиметровые волны и рентгеновские лучи), а также для многофотонной визуализации. Кроме использования фемтосекундного лазера в медицине и промышленности существует много научных областей, которые могут быть исследованы при помощи технологий сверхбыстрых световых импульсов. В кратком анализе обсуждаются некоторые аспекты квантовых технологий, исследованные с помощью фемтосекундных лазеров.

### ЭЛЕКТРОНЫ ВНЕШНИХ ОБОЛОЧЕК МОГУТ ИСПОЛЬЗОВАТЬСЯ ДЛЯ ПРОВЕРКИ НОВОЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Исследователи из NIST (Национального института стандартов и технологий США) и Института физики общества Макса Планка (Германия) полагают, что они могут значительно продвинуться в увеличении точности одной из фундаментальных физических констант путем подъема электрона на орбиту, максимально отдаленную от атомного ядра, удерживающего его. Описанный эксперимент не только означал бы более точную идентификацию элементов во всех объектах, начиная от звезд и заканчивая экологическими загрязнителями, но и позволил бы провести самые строгие испытания современной теории атома.

Объектом наблюдения физиков является постоянная Ридберга [1], ее значение и зарядовый радиус протона из спектроскопии. Хотя протон открыли более 100 лет назад, единого мнения о величине его зарядового радиуса нет. Разные способы измерения дают разные результаты. Причина этого расхождения неизвестна. Группа российских и немецких ученых совместно получила новое значение постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона

из спектроскопии атомарного водорода в криогенном пучке (температура 5 К). Точность в измерении констант приближает нас к возможности проверки гипотезы о том, что фундаментальные константы меняются со временем. Новые значения помогут обновить метрологические эталоны времени и частоты на основе атомных часов, сделать точнее системы спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС и другие), создать сверхкороткие лазерные импульсы ( $10^{-18}$  сек), открыв новые возможности изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом. Согласно стандартной модели значения радиуса протона в обычном и мюонном водороде должны быть одинаковым. Однако результаты измерений, проведенных в PSI (Paul Scherrer Institute, Швейцария) в 2010 году, давали значения радиуса протона в мюонном водороде на 4% меньше, что значительно больше ошибки измерения.

Основное препятствие для более точного определения величины состоит в неопределенности значения размера ядра атома, которое может менять энергетические уровни электрона и, таким образом, менять частоту кванта света, которая необходима для выбивания электрона из атома водорода. Еще один источник неопре-

деленности связан с тем, что электроны иногда испускают и повторно поглощают непродолжительные "виртуальные фотоны" – процесс, который также может немного менять энергетический уровень электрона.

Текущая величина постоянной Ридберга получена из сравнения теоретических и экспериментальных результатов по двадцати трем различным видам энергетических переходов в атомах водорода и дейтерия. Исследователи экспериментально измерили частоту излучения, соответствующую атомному переходу (энергетическому скачку) с точностью до 14 долей на квадрильон (15 нулей после единицы), но величина постоянной Ридберга известна только приблизительно до 6,6 долей на триллион – точность меньше в 500 раз.

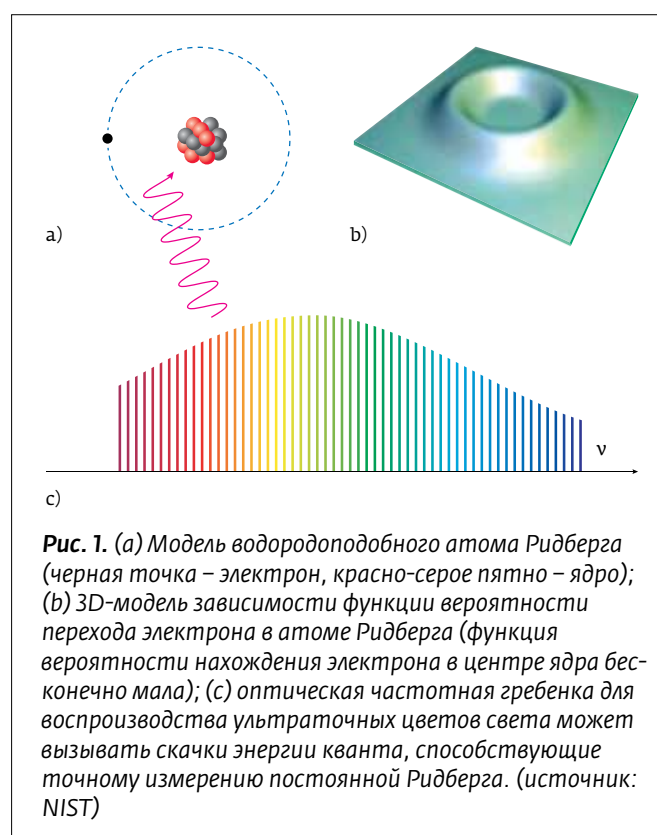
Для решения этих проблем физик Питер Мор из NIST и его коллеги предлагают построить так называемые водородоподобные атомы Ридберга – ядра атома, лишённые всех электронов, кроме одного, движущегося по кругу на верхнем энергетическом уровне вдали от ядра. В таких атомах электрон настолько отдален от ядра, что размером последнего можно пренебречь. Есть еще другое преимущество – такой электрон ускорялся бы меньше на крайней орбите, уменьшая эффекты "виртуальных фотонов", испускаемых им. Эти упрощения позволяют уменьшить теоретическую неопределенность до десятков долей на квинтильон (18 нулей после единицы).

Исследователи из NIST Джозеф Тан и коллеги осуществили этот подход экспериментально с помощью ионной ловушки электронных пучков (EBIT). Идея состояла в том, чтобы лишить атом всех электронов, охладить его и позволить ему захватить один электрон на самой крайней орбите. Тогда исследователи, используя чувствительный инструмент, называемый частотным гребнем [2], измерили квант света, поглощенного этим атомом Ридберга. При сравнении с изящной теорией, ультраточные измерения частоты в таких высоко ионизированных атомах Ридберга привели к уточнению величины постоянной Ридберга, обеспечивая достаточную чувствительность для раскрытия возможных аномалий в квантовой электродинамике, современной теории атома. Новый эксперимент обладает высокой значимостью и достоверностью, и его результаты совпадают со значением, полученным в эксперименте с мюонным водородом. Это еще одно важное подтверждение правильности стандартной модели.

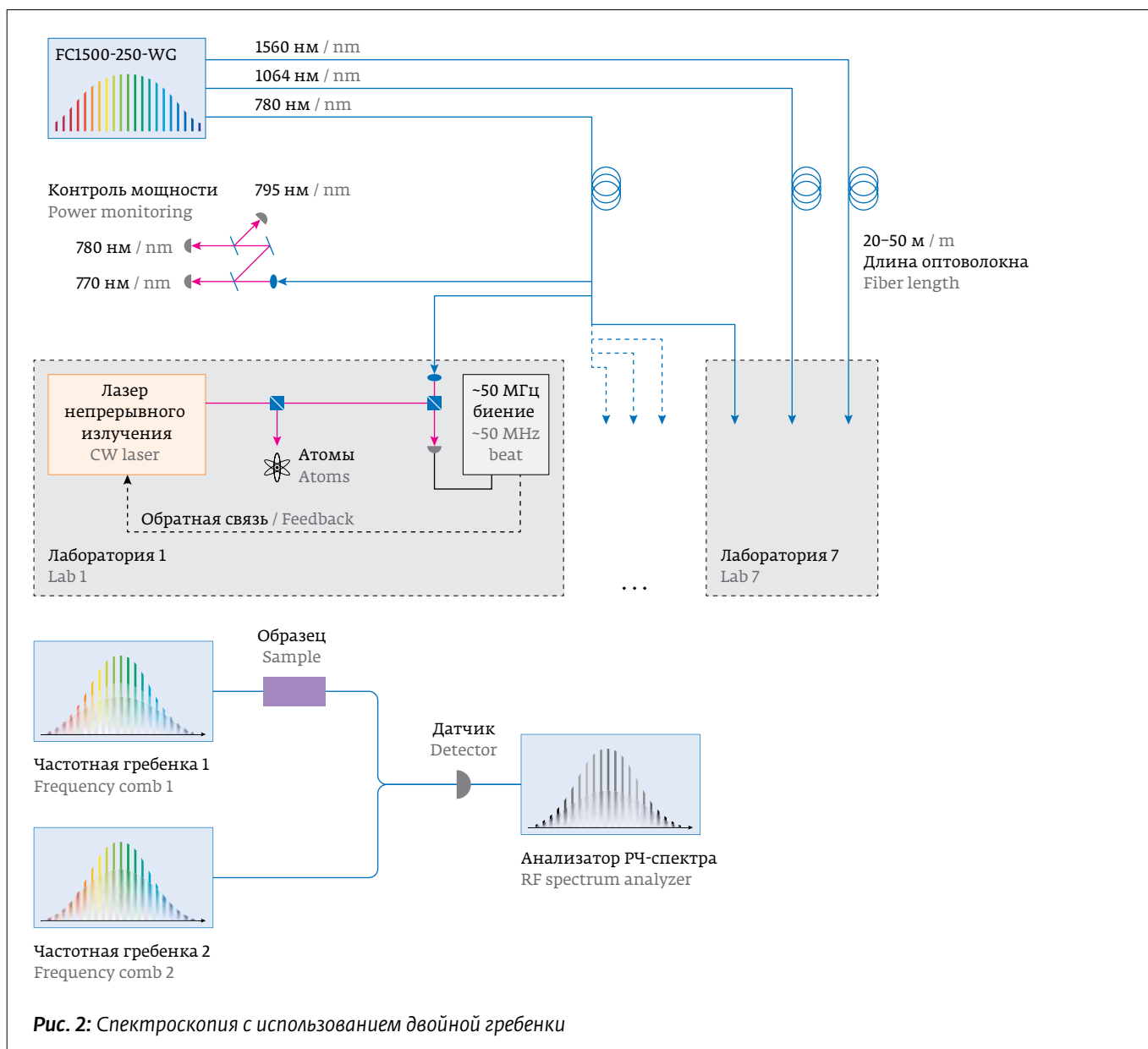
За последнее время частотный гребень эффективно использовался в эксперименте NIST для исследования давней проблемы в наблюдаемом разделении микроструктуры среди различных изотопов лития. Измерения высокого разрешения показали важность квантовой интерференции в мельчайших деталях, а результаты подтверждают сложные вычисления строения атома и потенциал спектроскопии высокой точности для зондирования экзотических ядер [3].

### ФИКСАЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ ЛАЗЕРОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ ГРЕБЕНКЕ

Оптические частотные гребенки (ЧГ), излучаемые фемтосекундными лазерами с синхронизацией мод, коренным образом изменили технику измерения частоты света. Мы обсудим три из самых интересных режимов ЧГ: передача стабильности оптических часов, спектроскопия двойной гребенки и калибровка спектрографа для наблюдений глубокого космоса. Постоянно растущий спрос на стабильность и точность сигналов времени и частоты требует усовершенствованных осцилляторов и опорных частот [4]. Сегодняшние лучшие часы полагаются на узкополосные оптические переходы и исполь-



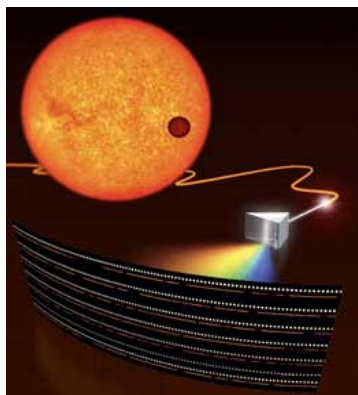
**Рис. 1.** (а) Модель водородоподобного атома Ридберга (черная точка – электрон, красно-серое пятно – ядро); (б) 3D-модель зависимости функции вероятности перехода электрона в атоме Ридберга (функция вероятности нахождения электрона в центре ядра бесконечно мала); (с) оптическая частотная гребенка для воспроизводства ультраточных цветов света может вызывать скачки энергии кванта, способствующие точному измерению постоянной Ридберга. (источник: NIST)



зуют частотные гребенки в качестве часового механизма. Чтобы записать линии поглощения образца в спектроскопии двойной гребенки используется две ЧГ (рис. 2). Расстояние между пиками двух гребенок меньше расстояния между пиками отдельных гребенок. Если взять разницу между ними, то можно измерять низкие частоты, принадлежащие радиодиапазону. Спектроскопия двойной гребенки способна охватывать широкополосные спектры с разрешением в один герц за доли секунды [5]. В астрономии точность, обеспеченная расположенными с равными интервалами линиями (или модами) частотных гребенок, открывает новые пути [6] обнаружения экзопланет (планет,

подобных Земле) или непосредственного наблюдения ускоренного расширения Вселенной.

В группе квантовой динамики, возглавляемой профессором Герхардом Ремпе в Институте квантовой оптики общества Макса Планка, несколько лабораторий работают в направлении организации цепочки оптических частот с помощью лазеров с фазовой привязкой. Это необходимо для экспериментов с холодным атомом. Гребенка (FC1500-250-WG) формируется с помощью фемтосекундного лазера, работающего в режиме синхронизации мод (короткий световой импульс, циркулирующий внутри резонатора, при каждом проходе ослабляется и покидает резонатор через полупрозрачное



**Рис. 3:** Калибровка спектрографа



**Рис. 4:** Оптический стол с частотной гребенкой (на врезке кристалл, легированный торием)



**Рис. 5:** УФ-спектрометр (Mc Pherson)

выходное зеркало). Интервал между двумя соседними спектральными компонентами гребенки равняется частоте повторения импульсов.

Дискретный спектр излучения импульсного лазера фемтосекундного диапазона называют частотной гребенкой эквидистантно расположенных частот.

Инновационные эксперименты, выполняемые в группе, включают элементарную квантовую сеть [7] и квантовый вентиль

атома-фотона [8]. Для этих и многих других экспериментов частоты лазерного излучения должны быть зафиксированы в течение нескольких дней и даже недель подряд. Цуг импульсов распределяется через волокна всего к семи лабораториям. В зависимости от потребностей используется частотная или фазовая синхронизация для привязки к гребенке одновременно до 22 лазеров. Обычно в группе квантовой динамики ведут эксперименты с атомом рубидия.



Из второй гармоники эрбиевой частотной гребенки все необходимые длины волны могут охватить диапазон от 780 нм и 795 нм для рубидия и до 1064 нм и 1560 для других молекул [9]. Так как различные подгруппы используют гребенку одновременно, то требуется работа в режиме 24/7 (24 часа 7 дней в неделю), и часто гребенка и синхронизированные с ней лазеры работают в течение многих месяцев подряд без перерывов.

Вторая гармоника от частотной гребенки разделяется с помощью оптоволоконных расщепителей луча и затем распределяется к различным лабораториям через оптоволокно длиной до 50 м. В каждой лаборатории излучение от гребенки далее расщепляется с использованием пространственных дихроических зеркал, расположенных близко друг другу. Здесь используются быстродействующие датчики для генерации сигналов биения с соответствующими пропорциями частотной гребенки. Для синхронизации частоты используются лазерные счетчики, а медленный сигнал обратной связи контролирует частоту выходного сигнала лазера для поддержания на определенной абсолютной частоте. Когда требования к стабильности частоты и точности предъявляются более высокие, тогда используются фазовые детекторы, а фазовые синхронизаторы интегрируются с помощью электроники.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНОГО ЯДРА ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Для определения с относительно высокой точностью времени используется переход между двумя энергетическими уровнями в атоме цезия. Атомы цезия являются неразличимыми квантовыми частицами и поэтому абсолютно идентичны между собой. Это предполагает возможность построения полностью воспроизводимой системы и поэтому идеальны как основа стандарта частоты/времени. Одним из самых важных инструментов для управления атомами является лазер, так как можно создавать излучение с ультракороткими импульсами (УКИ) и очень узкой полосой и высокой стабильностью.

Ядерные переходы, т.е. переходы между энергетическими уровнями атомного "ядра", могут обеспечить некоторые преимущества по сравнению с атомным переходом: они более стабильны при внешних возмущениях и обеспечивают частоту перехода, определяемую с высо-

кой точностью (поэтому позволяют более точное определение времени). Величина энергии, необходимой для управления ядрами, обычно на несколько порядков выше той, что доступна для управления с помощью лазеров и, как правило, обеспечивается ускорителями частиц.

По прогнозам изотоп Торий-229 имеет уникальные возможности низкоэнергетического ядерного перехода, который может стимулировать лазер УФ-диапазона. Ожидаемые свойства перехода (измеренные только косвенно) делают этот переход превосходным кандидатом для нового стандарта времени с потенциалом превзойти точность существующих часов на несколько порядков величины. В дополнение к точному измерению времени Торий-229 превосходно подойдет для измерений, если наши фундаментальные константы действительно являются постоянными и не меняются во времени и пространстве.

В настоящее время создана частотная гребенка, которая будет перенесена в область 160 нм с помощью высокочастотного резонатора. Она будет использоваться в качестве точного измерительного инструмента для сравнения частоты ядерного перехода с другими стандартами частоты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jentschura U.D., Mohr P. J., Tan J. N., Wundt B. J.** Fundamental constants and tests of theory in Rydberg states of hydrogen-like ions // *Physical Review Letters*, 2008, № 100, p.160404.
2. **Sansonetti C.J., Simien C. E., Gillaspay J. D., Tan J. N., Brewer S. M., Brown R. C., Wu S., Porto J. V.** Absolute Transition Frequencies and Quantum Interference in a Frequency-comb Based Measurement of the 6,7Li D Lines // *Physical Review Letters*, 2011, № 107, p.023001.
3. **Hoogerheide S.F., Aung A. S., Dreiling J. M., Brewer S. M., Guise N. D., Tan J. N.** Experiments with highly-ionized atoms in unitary Penning traps // *Atoms*, 2015, № 3, p.367–391.
4. **Hänsel W., Hoogland H., Giunta M., Schmid S., Steinmetz T., Doubek R., Holzwarth R.** // *Applied Physics B*, 2017, № 123(1), p.41.
5. **Coddington I., Newbury N., Swann W.** // *Optica*, 2016, № 3, p. 414–426.
6. **Probst R. A. et al.** SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation // *International Society for Optics and Photonics*, 2016.
7. **Ritter S. et al.** An elementary quantum network of single atoms in optical cavities // *Nature*, 2012, v. 484, p. 195.
8. **Reiserer S. et al.** A quantum gate between a flying optical photon and a single trapped atom // *Nature*, 2014, v. 508, p. 237.
9. **Prehn et al.** Fast, precise, and widely tunable frequency control of an optical parametric oscillator referenced to a frequency comb // *Review of Scientific Instruments*, 2017, v. 88, p. 033101.