

НАУЧНАЯ СЕССИЯ

«К 100-летию квантовой механики. Стандарты частоты»

17 декабря 2025 г

АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

1. Состояние и перспективы развития прецизионных стандартов частоты и квантовых гравиметров

Донченко С.И.

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»
(ФГУП ВНИИФТРИ)*

Использование при формировании национальной шкалы времени РФ прецизионных стандартов частоты (неисключенная систематическая погрешность (НСП) не более 10^{-17}), позволило государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ-1 занять лидирующую позицию по величине вклада в международное координированное время UTC, а национальной шкале времени РФ войти в число наиболее точных среди всех шкал времени в мире. Для обеспечения перспективных требований потребителей и сохранения лидирующих позиций РФ в формировании международной шкалы времени ведутся работы по созданию следующего поколения прецизионных стандартов частоты с улучшенными метрологическими характеристиками (НСП не более 5×10^{-19}), и поисковые исследования по созданию стандарта частоты на основе ядерного изомерного перехода в тории-229 с потенциальной НСП на уровне 10^{-21} . Другим перспективным квантовым сенсором с широкой областью применения является атомный гравиметр, обладающий более высокой чувствительностью и неограниченным временем непрерывной работы по сравнению с классическими гравиметрами. За рубежом технология атомных квантовых гравиметров развивается уже в течении 15- 20 лет и в настоящее время их точность достигает единиц мкГал. В 2025 году ФГУП «ВНИИФТРИ» создан опытный образец стационарного абсолютного атомного гравиметра с предельной чувствительностью 3-5 мкГал. В дальнейшем планируется разработка перебазируемого образца с предельной чувствительностью 1-3 мкГал.

2. Новые технологии в задачах развития стандартов частоты

Колачевский Н.Н.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)

Обсуждаются перспективы развития стандартов частоты с акцентом на новых технологиях, внедряемых в этой области. Важным направлением мирового развития является внедрение подходов, позволяющих существенным образом снизить объем, энергопотребление и стоимость приборов. Внедряются новые лазерные источники и методы их стабилизации,

развивается направление интегральной фотоники для оптических ловушек, чип-гребенок и мультиплексирования, быстро прогрессирует направление детекторов. Предлагается сфокусировать усилия в России на достижении технологического паритета с западными странами.

3. Актуальные задачи прецизионной квантовой метрологии

Прудников О.Н.

*Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЛФ СО РАН)*

Квантовые сенсоры и атомные стандарты частоты на основе ультрахолодных атомов являются одними из основных бурно развивающихся направлений атомной физики. Например, достигнутый уровень точности оптических стандартов частоты $\Delta\nu/\nu_0 < 10^{-18}$ открывает новые горизонты для развития фундаментальных исследований, таких как исследование влияния гравитационного воздействия поля Земли на пространственно-временной континуум, тесты постоянства фундаментальных констант, проверки общей теории относительности, Лоренц-инвариантности пространства и др.

Квантовые сенсоры на основе волн материи – атомные интерферометры переходят из стадии лабораторных исследований к одному из мощнейших инструментов для современной фундаментальной науки и практических приложений. Закладываемые уровни точности и чувствительности таких приборов перспективны для проверки основ фундаментальной физики, таких как общая теория относительности, принцип эквивалентности не только в рамках классических теорий, но, в том числе, на квантовом уровне, где материя не имеет определённой траектории и описывается волновыми функциями, а энергия вносящая вклад в массу задается гамильтоновым оператором внутренних степеней свободы.

В докладе будут представлены новые результаты в области прецизионных стандартов частоты, квантовых сенсоров на основе волн материи, развиваемых в Институте лазерной физики СО РАН.

4. Двухфотонная лазерная генерация экситонных состояний в криокристаллах криптона как метод возбуждения аномального низкоэнергетического изомерного ядерного состояния в изотопе Тория-229

Борисюк П.В.¹, Мызин Д.А.¹, Губский К.Л.¹, Диденко Н.В.², Корнеев Ф.А.¹, Кузнецов А.П.¹,
Лебединский Ю.Ю.^{1,3}, Наурызбаев Ж.М.¹, Попруженко С.В.¹, Ткаля Е.В.^{1,4,5}, Чубунова Е.В.¹,
Шилов В.А.¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

² ООО «АВЕСТА»;

³ Московский физико-технический институт (МФТИ);

⁴ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

⁵ Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

В рамках доклада будет сделан обзор основных мировых тенденций в области прикладных исследований, направленных на разработку оптического стандарта времени и частоты нового

поколения на основе аномального низколежащего ядерного изомерного состояния в изотопе тория-229. Частота перехода между основным и данным изомерным уровнем, по последним данным [1], составляет $2\,020\,407\,384\,335(2)$ кГц (приблизительно 8.3 эВ) и находится в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ), что доступно для прямой прецизионной спектроскопии имеющимися на сегодняшний день лазерными источниками или источниками СИ. При этом источники монохроматического излучения на экситонных переходах в кристаллах благородных газов (криптона, ксенона), часть из которых покрывает диапазон энергий часового перехода в тории-229, до настоящего времени не рассматривались как возможные кандидаты для создания систем прецизионной спектроскопии низколежащего изомерного состояния в изотопе тория-229. В работе [2] было описано возможное использование благородных газов в конденсированном состоянии в качестве рабочего тела квантовых генераторов монохроматического излучения в ВУФ области. Усиление достигалось при облучении Хе в жидкой фазе пучком быстрых электронов.

В настоящем докладе будут представлены пионерские результаты исследований, посвящённые разработке оригинальной методики резонансного возбуждения ядер тория-229 ультрафиолетовым излучением, испущенным при распаде экситонных состояний в благородных газах. Приведены результаты экспериментов по возбуждению интенсивных линий экситонов в благородных газах при помощи двухфотонного механизма посредством лазерной накачки. Показан спектр излучения, демонстрирующий интенсивный экситонный пик с центральной длиной волны в области 148 нм. Представлены теоретические оценки, позволяющие определить концентрацию экситонов в кристалле и пороговые значения интенсивности накачки, необходимые для достижения существенной концентрации экситонов при двухфотонном возбуждении.

Список использованных источников

1. Zhang, C., Ooi, T., Higgins, J.S. et al. Frequency ratio of the ^{229m}Th nuclear isomeric transition and the ^{87}Sr atomic clock. // Nature. – 2024. – Вып. 633. – С. – 63–70. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07839-6>
2. Н. Г. Басов, В. А. Данилычев, А. Г. Молчанов, Ю. М. Попов, Д. Д. Ходкевич, Квантовые генераторы, использующие люминесценцию автолокализованных экситонов в конденсированных инертных газах // Известия АН СССР. Серия физическая. 1973. Том 37, № 4. С. 494-497.