

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 сравнения 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 перебазированного 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-грабенок 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 криокристаллах 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 Xe 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 длинной 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 229mTh nuclear isomeric transition and the 87Sr 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.