

Космические ретрорефлекторные системы

А.Л. СОКОЛОВ, А.С. АКЕНТЬЕВ, В.Д. НЕНАДОВИЧ

АО «НПК «СПП», Москва
E-mail: alsokolov@bk.ru

Аннотация

Рассмотрены основные геодезические спутники-цели двухсторонней импульсной лазерной дальнометрии. Представлена модернизированная кольцевая ретрорефлекторная система для навигационного космического аппарата «Глонасс». Рассмотрены основные характеристики малогабаритной ретрорефлекторной системы «Пирамида» для низкоорбитальных спутников.

Ключевые слова: уголкового отражателя, ретрорефлекторные системы, космический аппарат, геодезические спутники-цели.

1. Введение

На всех современных навигационных и геодезических космических аппаратах (КА) размещают уголкового отражатели (УО), которые образуют так называемые ретрорефлекторные системы (РС) [1–5]. Назначение последних состоит в отражении луча лазерного дальнометра обратно к источнику излучения для прецизионного измерения дальности до КА с целью уточнения параметров орбиты и координат оптико-лазерной станции, а также для калибровки наземных радиотехнических измерительных средств [6–9].

УО является уникальным оптическим устройством, которое меняет направление падающего луча на противоположное независимо от угла падения (на рис. 1 показаны ход луча в УО и ряд закреплённых в металлическом стакане УО, которые изготавливаются в АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения» (в общей сложности в космосе находится несколько десятков тысяч таких УО).

На сегодня одним из основных инструментов для обеспечения высокой точности геоцентрических координат измерительных пунктов ГЛОНАСС является сеть лазерных станций, измеряющих дальность до специальных геодезических спутников, которые должны иметь субмиллиметровую

ошибку цели (неконтролируемую добавку к систематической поправке измерения) и нулевую сигнатуру (отсутствие искажения формы и длительности импульса). Измерение дальности до таких спутников необходимо также для решения задач космической геодезии, геодинамики и навигации, в том числе для исследований гравитационного поля Земли, влияния негравитационных сил на стабильность орбит КА и т.д.

Пассивные геодезические спутники-цели (рис. 2) для высокоточной лазерной дальнометрии в большинстве случаев представляют собой тяжёлые металлические шары, на поверхности которых размещается от 60 до 2142 УО. За последние десятки лет для решения фундаментальных и прикладных задач были созданы и выведены на орбиты спутники «LAGEOS-1» (США, 1976 г.), «LAGEOS-2» (США, Италия, 1992 г.), «STARLETTE» (Франция, 1975 г.), «STELLA» (Франция, 1993 г.), «ЭТАЛОН-1» (СССР, 1989 г.), «ЭТАЛОН-2» (СССР, 1989 г.), «GFZ-1» (Германия, Россия, 1995 г.), «Ларец» (Россия, 2003 г.), «WESTPAC» (Россия, 1998 г.), «LARES» (Италия, 2012 г.) и ряд других. Высота орбиты спутников «Эталон» – 19100 км, количество УО – 2142 шт., диаметр – 1294 мм и масса – 1300 кг.

Если объект, на котором находится УО, движется, то возникает так называемое явление *скоростной аберрации*, вследствие которого луч отклоняется на угол $2 \cdot u/c$, где u – тангенциальная составляющая скорости

движения объекта и c – скорость света (рис. 3). Отклонение лазерного луча зависит от высоты орбиты спутника и может достигать при небольших высотах 10 угловых секунд, что означает смещение центра светового пятна на поверхности Земли на десятки-сотни метров от передатчика. Поэтому для успешной работы дальномерной системы необходимо, чтобы энергия отражённого лазерного пучка была сосредоточена на определённом расстоянии от оптической оси.

2. КА «Блиц»

Многоэлементные РС имеют значительную ошибку цели и ненулевую сигнатуру, что препятствует достижению субмиллиметровой точности измерений. Кроме того, взаимодействие магнитного поля Земли с наводимыми в металлическом корпусе спутника вихревыми токами замедляет его собственное вращение вплоть до полной остановки, что снижает точность измерений.

Эти недостатки можно преодолеть путём реализации спутника в виде сферической стеклянной линзы, фокусирующей падающую плоскую волну на своей противоположной поверхности с отражающим покрытием [10]. В данном случае оптический путь лазерного луча внутри шара не зависит от угла прихода, и не искажаются форма и длительность сигнала.

С этой целью в АО «НПК «СПП» был разработан и изготовлен КА «Блиц-М» (рис. 3), который обеспечивает субмиллиметровую ошибку цели с нулевой сигнатурой и площадь эквивалентной поверхности рассеяния около 10^6 м^2 для получения прецизионных измерительных данных в целях геодезического обеспечения системы ГЛОНАСС. КА «Блиц-М»

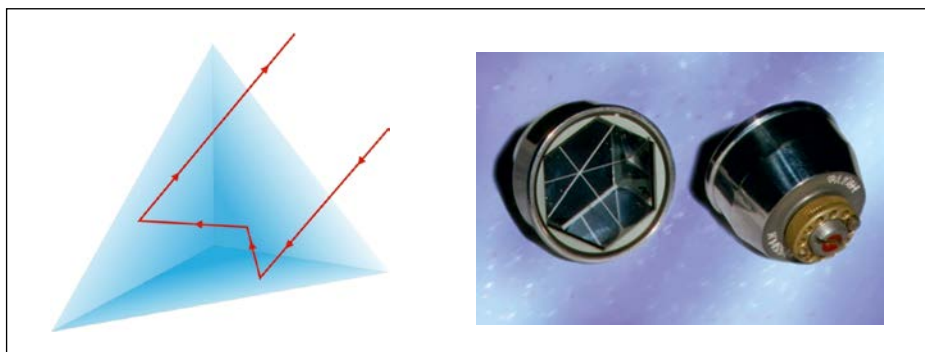


Рис. 1. Уголкового отражатели в опрае, изготавливаемые в АО «НПК «СПП»

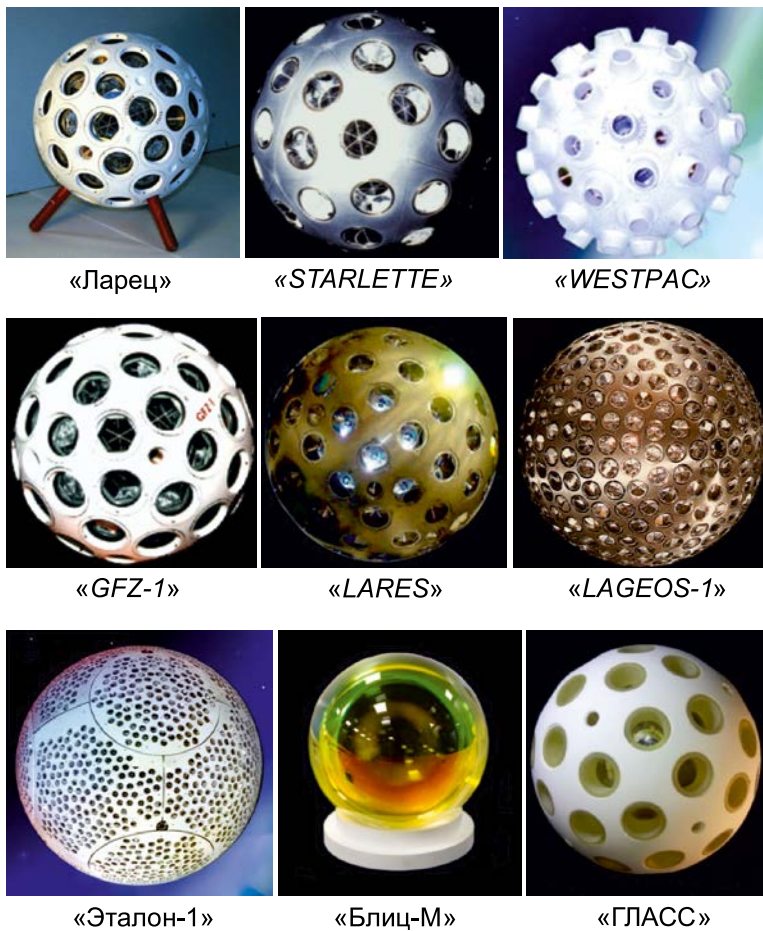
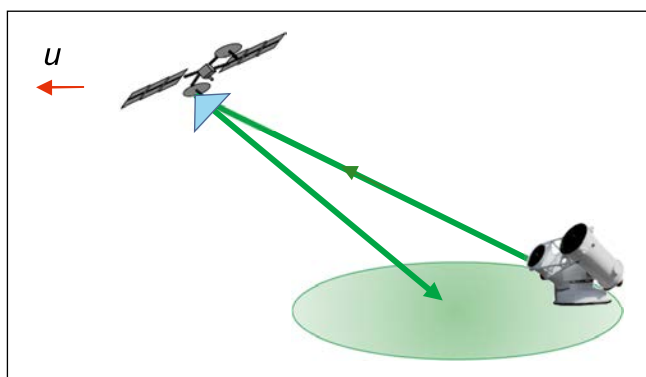


Рис. 2. Пассивные спутники-цели – сферические РС (показаны не в масштабе)

Рис. 3. Эффект скоростной абберации: отражённый луч отклоняется на угол, зависящий от скорости спутника



представляет собой сферическую стеклянную оптическую систему, состоящую из внутреннего шара и двух внешних менисков диаметром 220 мм и общей массой 17 кг. Для улучшения баллистического качества и энергетиче-ски спутника с учётом большей высоты орбиты необходимо было увеличить его размер по сравнению с предыдущей конструкцией КА «Блиц», который прекратил существование в 2013 г. после столкновения с элементом космического мусора на высоте 832 км. Чем больше радиус шара, тем больше отношение массы к площади поперечного сечения и энергия

лазерного излучения, отражённого спутником.

Однако основную роль в повышении силы излучения в направлении приёмника играет оптимальное, в смысле уменьшения сферической абберации, соотношение радиусов кривизны и толщины слоёв для данной длины волны, показателей преломления стекла и температуры спутника. Это позволяет сформировать индикатрису отражения (диаграмму направленности) с максимально возможной интенсивностью отражённого излучения для углов отклонения от оптической оси в диапазоне 6–8°

с учётом явления скоростной абберации.

Один из ключевых критериев для выбора конструкции – обеспечение срока службы КА «Блиц-М» в течение десяти лет. С этой целью в конструкции спутника использованы радиационно-стойкие стекла К108 (для изготовления внешних менисков) и ТФ105 (для изготовления внутреннего шара) и разработана термоустойчивая конструкция.

В целом средняя температура спутника на орбите отрицательна и равна примерно минус 25 °С. Однако при движении по орбите каждые два часа он подвергается облучению Солнцем с различным углом падения света и может заходить в тень Земли. При этом следует учитывать, что ось вращения КА «Блиц-М» перпендикулярна плоскости орбиты, а скорость вращения составляет от 5 до 10 оборотов в минуту, для того, чтобы спутник попеременно направлялся пропускающей и отражающей полусферами на лазерную станцию. Алюминиевое отражающее покрытие приводит к значительному нагреву спутника, перепадам температуры и неравномерности её распределения. Поэтому в КА «Блиц-М» один из внешних менисков имеет интерференционное диэлектрическое покрытие.

Для достижения целевой функции необходимо было правильно выбрать высоту орбиты КА «Блиц-М». Факторы, определяющие выбор орбиты – это остаточное влияние атмосферы, космический мусор и воздействие радиации космоса (высокоэнергетические элементарные частицы, УФ излучение Солнца). Чем выше орбита, тем она стабильней, тем меньше влияние атмосферы и плотность космического мусора. На высотах свыше 1500 км вероятность столкновения с космическим мусором критического размера достаточно мала.

Для космической же радиации картина обратная: с увеличением высоты от 1500 км и приближением к радиационным поясам растёт число высокоэнергетических электронов и протонов, способных приводить к деградации внешних менисков.

В результате проведённых исследований высота орбиты КА «Блиц-М» (круговой, околополярной) выбрана оптимальной – близкой к 1500 км. Планируется выведение на орбиту КА «Блиц-М» в качестве полезной

нагрузки вместе с группой КА «Гонец» в 2018 г.

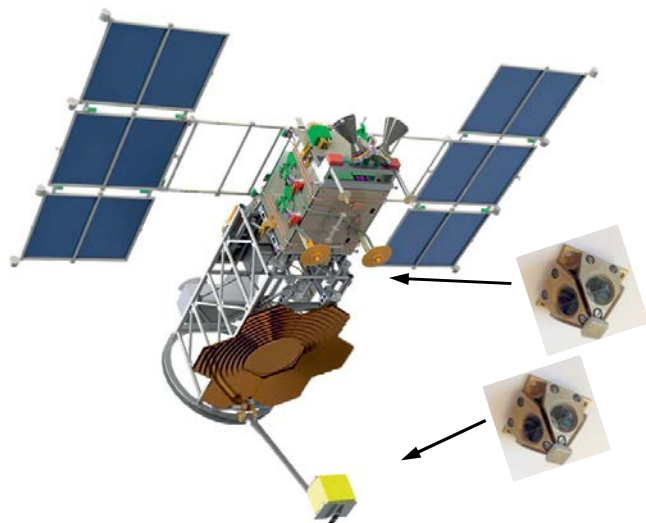
3. Индикатриса отражения углового отражателя

Если на УО падает плоская волна, то в дальней зоне образуется дифракционная картина, вид которой зависит от многих факторов: размера УО, точности изготовления двухгранных углов, вида покрытия отражающих граней и т.д. Луч может пройти путь внутри УО шестью разными способами, в зависимости от попадания на один из шести секторов входной грани [1–5]. Каждое из трёх отражений характеризуется сдвигом фазы между ортогональными компонентами вектора E (линейной фазовой анизотропией), при этом плоскости падения луча на грани не совпадают. Угол падения на каждую грань УО равен $\arctg \sqrt{2} \approx 54^\circ$, а угол между плоскостями падения на грани равен $\alpha = \pm 60^\circ$. Для описания поляризационных свойств УО необходимо рассматривать шесть результирующих матриц Джонса для разных комбинаций хода луча с учётом поворотов системы координат и сдвига фазы δ на отражающих гранях. Каждый сектор УО характеризуется определёнными амплитудно-фазовыми коэффициентами пропускания для ортогональных компонент вектора E . В результате отражения света образуется шесть когерентных пучков, поэтому необходимо учитывать их различное состояние поляризации, расширение по мере распространения в пространстве и интерференцию в дальней зоне [1–5].

Дифракционная картина в дальней зоне (индикатриса отражения) существенно зависит от сдвига фаз ортогональных компонент при отражении, который определяется видом покрытия граней УО и имеет вид нескольких пятен (лепестков индикатрисы отражения). В частном случае, это дифракционная картина Эйри с угловой шириной центрального максимума между первыми нулями $2\gamma \approx 2,44 \cdot \lambda/D$, где D – диаметр апертуры УО.

Формирование требуемого сдвига фаз обеспечивается изменением сдвига фаз между ортогональными компонентами электрического вектора E при отражении. Покрытие с *любым* сдвигом фазы может быть спроектировано на базе тонких диэлектрических слоёв, напыляемых на отражающие

Рис. 4. КА «Ломоносов». РС «Пирамида» в количестве 2 шт. показана в увеличенном масштабе



грани УО [11–13]. Первый диэлектрический слой, примыкающий к поверхности призмы, должен иметь показатель преломления выше, чем у материала призмы, например $n = 2$; при контакте последнего слоя с воздухом всегда наблюдается полное внутреннее отражение, так что потери в идеале отсутствуют (только в отличие от УО без покрытия многолучевая интерференция приводит к дополнительному сдвигу фаз между ортогональными компонентами).

4. Кольцевая ретрорефлекторная система из угловых отражателей увеличенного размера с двухлепестковой индикатрисой отражения

В КА «Глонасс-К» используется *кольцевая* ретрорефлекторная система, состоящая из трёх рядов УО с непокрытыми гранями. Как показано в п. 3, при полном внутреннем отражении света от граней УО дифракционная картина отражённого излучения в дальней зоне имеет вид одного центрального и шести периферийных пятен. Специальный разворот каждого УО в плоскости панели позволяет получить кольцо интенсивности, которое формируется боковыми пятнами каждого УО. Поскольку дифракционная картина РС образована всеми УО, то и на приёмное устройство приходят фотоны, отражённые от всех УО. При наклонах панели УО оказываются расположенными на разном расстоянии от приёмника. При рабочих углах падения излучения $8-10^\circ$ ответный сигнал удлиняется до значения

600–700 пс. Это означает, что среднее квадратичное отклонение (СКО) единичного измерения дальности составляет в среднем 60 мм вместо требуемых 6–8 мм.

Проблема уменьшения случайной погрешности одиночного измерения (СКО) при одновременном увеличении энергии отражённого сигнала в направлении приёмника лазерного дальномера может быть решена за счёт кольцевой РС, состоящей из «*двухлепестковых*» УО увеличенного размера. Двухлепестковая дифракционная картина формируется за счёт контролируемого изменения одного из двухгранных углов. Угловой размер каждого пятна зависит от размеров УО: чем больше УО, тем больше концентрация энергии в пятне. Грани таких УО должны быть покрыты специальным диэлектрическим покрытием для того, чтобы, с одной стороны, сформировать нужную индикатрису отражения, а с другой – уменьшить её термические искажения.

Оптимальная индикатриса отражения обеспечивается выбором размера УО (42–48 мм) и развала угла между отражающими гранями (2,2–2,5"). При угловом расстоянии между боковыми лепестками, равном удвоенному значению угловой абберрации, одно из пятен как раз попадает на приёмник отражённого сигнала (рис. 2). Это позволяет снижать потери энергии, которые возникают, если индикатриса отражения имеет один широкий или семь узких лепестков [1–6].

Для кольцевой РС (КРС) требуется использовать 36 УО, развёрнутых относительно друг друга на некото-

рый угол, например на 10° , так, чтобы все линии, соединяющие боковые лепестки были направлены к геометрическому центру КРС. Тогда для определённой ориентации КРС в направлении на приёмник отражают два УО на противоположных сторонах этой РС. В данном случае СКО определения геометрического центра РС равно корню из суммы квадратов СКО двух сигналов, т.е. для длительности исходного импульса 50 пс это $18 \cdot \sqrt{2} = 25$ пс (7,5 мм в линейной мере), независимо от угла падения.

5. «Пирамида»

Разработанная в АО «НПК «СПП» малогабаритная РС «Пирамида» представляет собой пирамидальную конструкцию из четырёх УО с общей вершиной (рис. 4). Её масса составляет всего 30 г, а поперечный размер не превышает 40 мм.

Для достижения требуемых энергетических и точностных характеристик необходимо, чтобы конструктивные параметры РС обеспечивали оптимальную индикатрису отражения. Наличие скоростной абберации приводит к тому, что оптимальное направление приёма отличается от оси индикатрисы отражения и зависит от скорости спутника, т.е. от высоты его орбиты. Для низкоорбитальных спутников среднее значение скоростной абберации [6] составляет около $8''$. Это означает, что необходимо каким-то образом расширять индикатрису, например, уменьшая размер УО; однако при этом уменьшается апертура, и в целом падает принимаемая энергия лазерного излучения. При увеличении количества УО возрастает как эффективная поверхность рассеяния, так и вероятность отражения излучения от двух и более УО. Если расстояние от лазерного передатчика до отдельных УО в РС различно, то возникает удлинение ответного сигнала, приводящее к так называемой ошибке цели.

В зенитной области пролёта КА угол падения на все четыре УО составляет около 54° , при этом апертура УО уменьшается и имеет овальную форму. В результате эффективная поверхность рассеяния для отражённого от УО излучения оказывается минимальной и не превышает нескольких тысяч квадратных метров. В случае расположения спутника чуть выше ли-

ний видимого горизонта площадь этой поверхности составляет от 10000 до 42000 м^2 . Вместе с тем, расстояние до спутника минимально как раз в зенитной области и максимально при расположении спутника чуть выше линии видимого горизонта. Поскольку количество фотоэлектронов, регистрируемых фотоприёмником наземной квантово-оптической системы, пропорционально четвёртой степени расстояния до спутника, то увеличение апертуры УО при уменьшении угла наклона КА компенсирует увеличение расстояния. В результате количество фотоэлектронов оказывается максимальным в области зенитного угла наблюдения $\theta_{zen} = 30^\circ$.

В зенитной области максимальная ошибка измерения дальности возникает, когда излучение падает сразу на несколько УО, за счёт разной оптической длины луча внутри двух УО. Минимумы ошибки цели соответствует случаю, когда излучение падает на два УО, но оптическая длина пути луча внутри них одинакова. В целом ошибка измерения дальности до КА с РС «Пирамида» не превышает 0,5 мм.

Две малогабаритные РС «Пирамида», созданные в АО «НПК «СПП», были размещены на борту КА «Ломоносов» (рис. 4). Спутник был запущен на солнечно-синхронную орбиту высотой 500 км в апреле 2016 г. с научной аппаратурой МГУ им. М.В. Ломоносова для исследования явлений в верхних слоях атмосферы.

Каждая из РС представляет собой пирамиду, состоящую из четырёх угольковых отражателей с общей вершиной, и способна отражать лазерные импульсы со всей нижней полусферы. Одна РС размещена на корпусе спутника, а другая на выдвижной штанге на расстоянии около 2 м. Проведённые измерения в одноэлектронном режиме позволили наблюдать два трека на расстоянии, зависящем от ориентации спутника относительно лазерной станции в момент наблюдения.

Несмотря на малые размеры, РС обеспечили достаточную площадь эквивалентной поверхности рассеяния. По оценке (были проведены сравнительные измерения по спутникам «Stella» и «Lageos») она составила 0,02–0,05 млн м^2 . Результаты космического эксперимента позволяют рекомендовать данную систему для установки на низкоорбитальные космические аппараты с целью определения

их ориентации и дополнительного мониторинга за развёртыванием составных частей аппарата в космосе.

Заключение

Космические РС являются важным бортовым сегментом оптико-лазерных средств, необходимых для решения задач космической геодезии, геодинамики и навигации, в том числе для исследования гравитационного поля Земли, влияния негравитационных сил на стабильность орбит космических аппаратов (КА) и других научных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротаев В.В., Панков Э.Д. Поляризационные свойства угольковых отражателей // Оптико-механическая промышленность. – 1981. – № 1. – С. 9–12.
2. Денисюк Г.В., Корнеев В.И. Формирование мелкоструктурного изображения угольковыми отражателями, работающими на основе явления полного внутреннего отражения // Оптико-механическая промышленность. – 1982. – № 9. – С. 1–3.
3. Садовников М.А., Соколов А.Л. Пространственная поляризационная структура излучения, формируемая угольковыми отражателями с металлизированными гранями // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107, № 2. – С. 213–218.
4. Садовников М.А., Соколов А.Л., Шаргородский В.Д. Анализ эквивалентной поверхности рассеяния угольковых отражателей с различным покрытием граней // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 8. – С. 55–62.
5. Ищенко Е.Ф., Соколов А.Л. Поляризационная оптика (учебное пособие). 2-е изд. – М.: Физматлит, 2012. – 446 с.
6. Degnan John J. Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review // Contribution of Space Geodesy to Geodynamics: Technology. – 1997. – Vol. 25. – P. 133–162.
7. Васильев В.П., Шаргородский В.Д. Прецизионная спутниковая лазерная дальнометрия на основе лазеров с высокой частотой повторения импульсов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – № 7. – С. 6–10.
8. Arnold D. URL: http://ilrs.gsfc.nasa.gov/about/reports/other_publications.html (дата обращения: 03.2017).

9. Садовников М.А. Необходимые условия достижения субмиллиметровой точности измерений в спутниковой лазерной дальнометрии // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – № 12. – С. 13–16.

10. Белов М.С., Васильев В.П., Гашкин И.С., Пархоменко Н.Н., Шаргородский В.Д. Сферическая линза как спутник цель для прецизионной лазерной дальнометрии // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – № 7. – С. 11–14.

11. Соколов А.Л., Мурашкин В.В. Дифракционные поляризационно-оптические элементы с радиальной симметрией // Оптика и спектроскопия. – 2011. – Т. 111. – С. 900–907.

12. Sokolov A.L. Formation of polarization-symmetrical beams using cube-corner reflectors // J. Opt. Soc. Am. A. – 2013. – Vol. 30, No 7. – P. 1350–1357.

13. Sokolov A.L. Optical vortices with axisymmetric polarization structure // Optical Engineering. – 2017. – Vol. 56 (1). – P. 014109–1 – 014109–8.

Физики впервые получили «жидкий свет» при комнатной температуре, сделав эту необычную форму материи более доступной, чем когда-либо. Она представляет собой одновременно смесь из сверхтекучей жидкости, обладающей нулевым уровнем трения и вязкости, и своего рода конденсата Бозе-Эйнштейна (КБЭ), который нередко называют пятым состоянием материи. Эти свойства позволяют свету фактически обтекать вокруг находящиеся перед ним объекты.

Обычный свет, как правило, демонстрирует свойства волны и иногда частиц и всегда движется только по прямой. Именно поэтому наши глаза, например, не способны видеть за углами. Однако при определённых и весьма экстремальных окружающих условиях свет также может вести себя как жидкость, обретая способность обтекания вокруг объектов.

Интерес для науки КБЭ представляют в первую очередь за счёт своего агрегатного состояния, когда правила, по которым они действуют, работают на грани классической и квантовой физики, когда твёрдая материя начинает приобретать скорее волновые свойства. Как правило, такие конденсаты создаются при температурах, близких к абсолютному нулю, и способны существовать доли секунды.

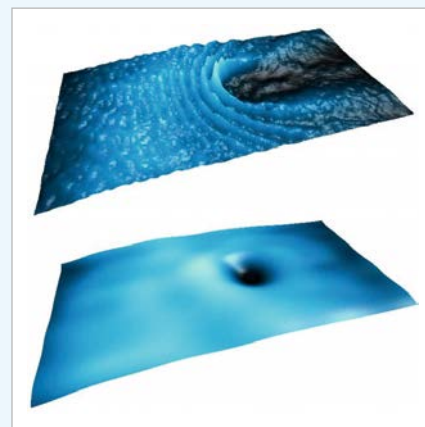
Но в рамках последнего исследования учёные смогли создать КБЭ при обычной комнатной температуре, используя «франкенштейнский» набор из материи и света.

«Особенность нашей работы заключается в том, что мы продемонстрировали возможность создания состояния сверхтекучести при комнатной температуре окружающей среды, используя частицы светоматерии, называемые поляритонами», – говорит ведущий исследователь Даниэле Санвитто из итальянского Института нанотехнологий CNR NANOTEC.

Создание поляритонов потребовало от исследователей использования очень дорогого оборудования и технологий нанотехнологического уровня. Учёные поместили между двумя «суперотражающими» зеркалами слой органических молекул толщиной 130 нм и пропустили через него 35-фс лазерный импульс ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$).

В результате получилась «сверхжидкость» с весьма необычными свойствами. При обычных условиях

температуры, когда простая жидкость будет обладать свойством текучести, на её поверхности под внешним воздействием может создаваться рябь и завихрения. Сверхжидкость же такой ответной реакции не показывает.



На верхнем изображении видно, как поток поляритонов, направленный в обычную жидкость, создаёт волны, в то время как внутри сверхжидкости (на нижнем изображении) такой особенности не демонстрирует.

Учёные говорят, что результаты этих исследований не только открывают дорогу к новым исследованиям особенностей квантовой гидродинамики, но также и к созданию устройств и технологий будущего, которые будут способны использовать поляритоны в обычных условиях. Речь идёт о новых типах сверхпроводниковых материалов, которые можно будет использовать в производстве нового поколения светодиодов, солнечных панелей и лазеров.

«Тот факт, что подобный эффект наблюдается и при обычных условиях окружающей среды, открывает множество возможностей для будущей работы», – говорят исследователи.

«Это не только новая веха в исследовании таких феноменов, как КБЭ, но и дорога к потенциальной разработке футуристичных фотонных устройств на базе сверхтекучих жидкостей, в которых проблема искажений будет полностью отсутствовать, а вместо этого будет открыта дверь к другим новым неожиданным феноменам».

Результаты работы итальянских физиков опубликованы в последнем номере журнала «Nature Physics».

hi-news.ru
20.06.2017



Соколов Андрей Леонидович,
доктор техн. наук, доцент. Окончил в 1981 г. МЭИ. Начальник научно-технического комплекса АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»



Акентьев Александр Сергеевич.
Окончил в 2014 г. МЭИ. Инженер АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». Аспирант НИУ «МЭИ»



Ненадович Владимир Дмитриевич. Окончил в 2013 г. МЭИ. Инженер АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения». Аспирант НИУ «МЭИ»