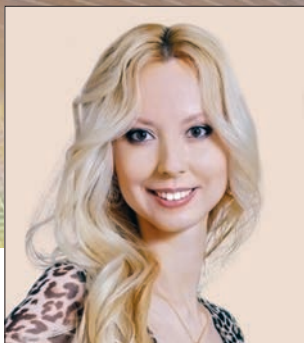
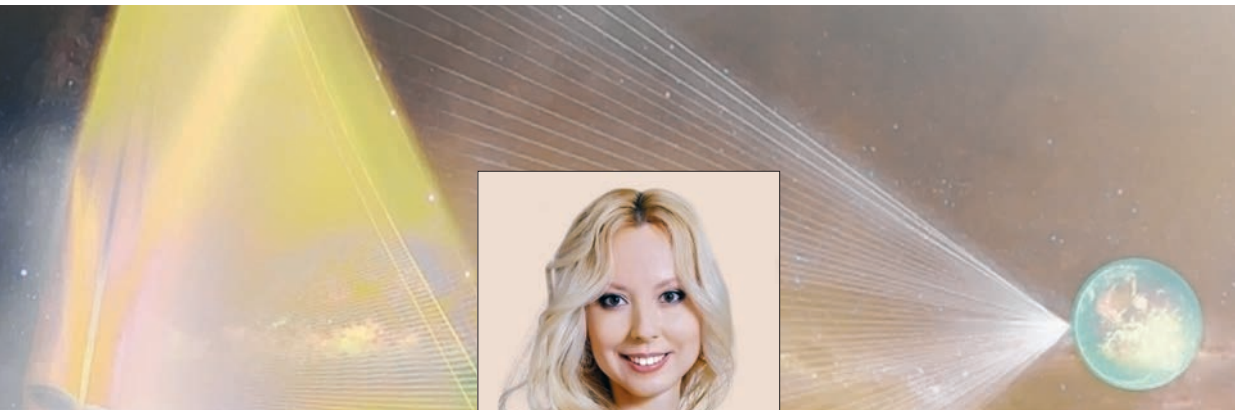


ПРОЕКТ “BREAKTHROUGH STARSHOT”



Е.П. ПОПОВА,

*ведущий научный сотрудник
Институт физики Земли РАН
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова*

И.Р. ГАБИТОВ,

*кандидат технических наук
Центр фотоники и квантовых материалов
Сколковского института науки и технологий
Аризонский университет (США)*



DOI: 10.7868/50044394819030046

“Breakthrough Starshot” (с англ. яз. – “Звездный прорыв”) – научно-инженерный проект, который направлен на разработку межзвездных космических аппаратов, оснащенных парусом и ускоряемых давлением света мощных лазеров. По замыслу проектировщиков, КА такого типа совершит полет к звездной системе Альфа Центавра, удаленной на 4,37 св. года от Земли, со скоростью примерно 15–20% от скорости света (45–60 тыс. км/с). Предполагается, что на аппаратах будут установлены камеры для фотографирования экзопланет. Проект требует решения многих сложнейших научно-техниче-

ских задач: создания сверхмощного лазера, способного сфокусировать свою энергию на быстро удаляющемся небольшом парусе с поперечным размером всего лишь 2–3 м (мощность лазера до 100 ГВт, он должен работать в течение нескольких минут); создания системы контроля и наведения луча лазера, которая сможет компенсировать известный эффект дрожания атмосферы, мешающей астрономам получать точные изображения звезд; конструирования принципиально новой электронной наноаппаратуры управления наноспутником; сбора научной информации и связи с Землей; разработки

и изготовления наносточника энергии для обеспечения жизнедеятельности наноспутника. Особую сложность представляет создание сверхлегких материалов для паруса, способных эффективно отражать лазерный луч (без перегрева материала) и обеспечивать устойчивость ориентации космического аппарата.

ВСТУПЛЕНИЕ

С давних пор человечество интересовал вопрос – существуют ли другие обитаемые миры? Звездное небо будило воображение людей и заставляло задумываться над устройством мира, искать ответы на многочисленные вопросы: как устроен космос, какова причина движений Солнца, Луны, звезд и планет, почему существуют окружающий мир и человек? Исторические исследования показывают, что, начиная с древних цивилизаций, человечество могло проводить довольно точные астрономические наблюдения, а в 1609 г. Г. Галилей, создав зрительную трубу с трехкратным увеличением, стал первым, кто направил ее в небо, превратив в телескоп, и сделал ряд открытий.

4 октября 1957 г. было положено начало космической эры в истории человечества: отечественная ракета, стартовавшая с космодрома Байконур, вывела на орбиту вокруг Земли первый в мире искусственный спутник. Он находился на орбите 92 сут и проделал путь длиной около 60 млн км.

В настоящее время вокруг нашей планеты вращается множество спутников, выполняющих различные научно-исследовательские и прикладные задачи: мониторинг космической

погоды, исследование космической радиации и ресурсов Земли; обеспечение навигации, связи и телекоммуникации; физико-технические и биологические эксперименты и т.д.

ДАЛЕКИЕ ПЛАНЕТЫ

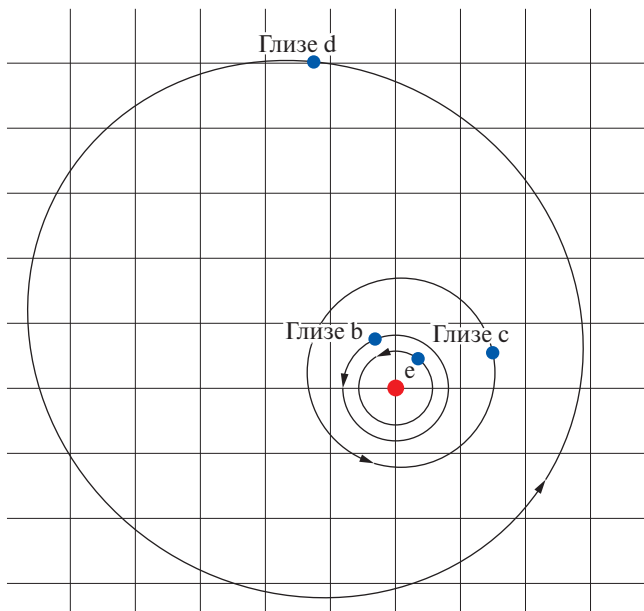
С началом космической эры стала актуальной проблема обитаемости и пригодности для жизни других планет – как в Солнечной системе, так и за ее пределами (для существования белковой жизни условия на планете должны быть близкими к земным). Поэтому наибольший интерес представляет поиск экзопланет, похожих на Землю и вращающихся вокруг звезды с параметрами излучения, сходными с солнечными.

Экзопланеты обнаружены примерно у 10% звезд, которые включены в программы поисков. Их доля растет по мере накопления данных и совершенствования техники наблюдения. К настоящему времени открыто множество планет с массами порядка массы Нептуна и ниже. Экзопланеты стали

открывать благодаря усовершенствованным научным методам, зачастую на пределе их возможностей. К ним относятся: радионаблюдение пульсаров, метод радиальных скоростей, транзитный метод, метод синхронизации, визуальное наблюдение, гравитационное линзирование, астрометриче-

ский метод. На 10 марта 2019 г. достоверно подтверждено существование 4011 экзопланет в 2996 планетных системах, из которых в 654 имеется более одной планеты. Следует отметить, что количество надежных кандидатов в экзопланеты значительно больше.

Экзопланеты обнаружены примерно у 10% звезд, которые включены в программы поисков. Их доля растет по мере накопления данных и совершенствования техники наблюдения



Система экзопланет Глизе 581. Каждый квадрат соответствует масштабу $0,05 \times 0,05$ а.е.

Из 2326 кандидатов, обнаруженных с помощью космической обсерватории “Кеплер”, 207 имеют примерно земной размер, 680 – размер Суперземли, 1181 – Нептуна, 203 – сравнимый с юпитерианским и 55 – больший, чем у Юпитера.

У экзопланет, движущихся на орбитах с большим эксцентриситетом, внутренний состав которых включает в себя несколько слоев вещества (такого, как пласты коры, мантия, ядро), приливные силы в состоянии высвобождают тепловую энергию, которая может способствовать созданию и поддержанию благоприятных для жизни условий на космическом теле, а их орбита со временем – эволюционировать в околокруговую.

Экзопланетой, наиболее близкой по своим условиям к Земле (известной на 2019 г.) является Глизе 581с, температура на которой, по предварительным оценкам, находится в диапазоне от 0° до 40°C . Теоретически на этой планете могут существовать запасы жидкой воды, а, следовательно, возможна и жизнь. Планета находится в сис-

теме красного карлика Глизе 581 (его масса равна $0,31 M_\odot$) и вращается по орбите, радиус которой примерно в 10 раз меньше, чем у орбиты Земли. Следовательно, на экзопланету действуют довольно существенные приливные силы, которые могли привести к прекращению ее вращения вокруг своей оси. В таком случае у Глизе 581с может

отсутствовать собственное магнитное поле – защитный щит от космической радиации (и, в частности, от вспышечной активности звезды). А она может быть довольно высока, судя по наблюдениям за красными карликами.

Возникают вопросы: можно ли выяснить, что происходит на поверхности экзопланет и как можно найти существование внеземной жизни?

ПУТЕШЕСТВИЕ К ДАЛЕКИМ ПЛАНЕТАМ

В 1972 г. с помощью ракеты-носителя “Атлас-Центавр” была запущена АМС “Пионер-10”, а в 1973 г. – “Пионер-11”. “Пионер-10” стал первым КА, совершившим пролет вблизи Юпитера и сфотографировавшим планету, а также первым аппаратом, развившим третью космическую скорость – достаточную для преодоления силы притяжения Солнца. Обе станции несут “Межзвездное письмо” – анодированную пластинку из прочного алюминиевого сплава размером 220×152 мм (с рисунком,

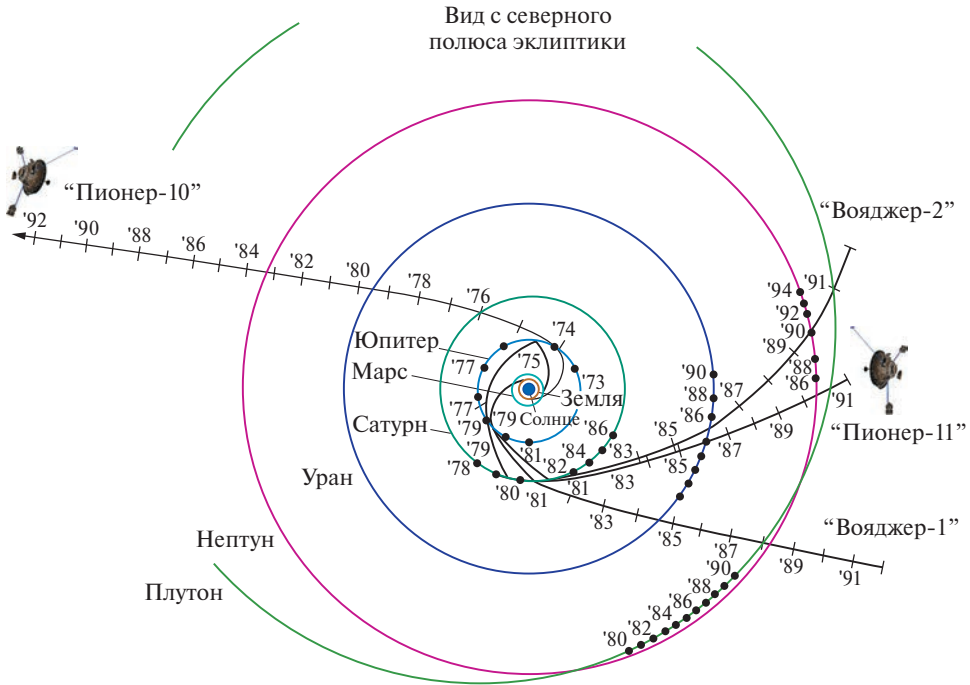
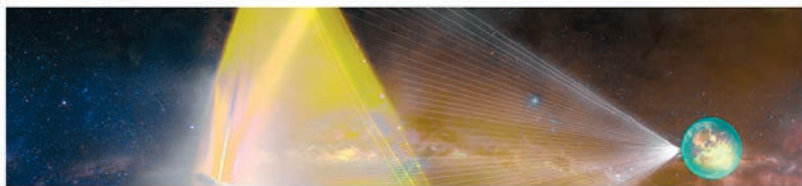


Схема полета аппаратов "Пионер-10/11" и "Вояджер-1/2" в гелиосфере. На траекториях движения космических кораблей цифрами нанесены годы, когда они "проходили" указанный участок космического пространства. В 2000-х гг. эти космические аппараты вышли за пределы Солнечной системы (из статьи "Вояджеры – полет длиною в жизнь": <https://habr.com/ru/post/406117/>)

автором которого был Карл Саган). На пластине изображены: молекула нейтрального водорода; две человеческие фигуры (мужчины и женщины) на фоне контура аппарата; положение Солнца по отношению к центру Галактики и 14 пульсарам; схематическое изображение Солнечной системы и траектория аппарата относительно планет. Последний успешный прием данных телеметрии от "Пионера-10" состоялся 27 апреля 2002 г. Последний очень слабый сигнал от него был получен 23 января 2003 г. с расстояния свыше 12 млрд км от Земли. Сообщалось, что аппарат направляется в сторону звезды Альдебаран. Если с ним ничего не случится по пути, то его по-

лет до окрестностей этой звезды продлится более 2 млн лет. По состоянию на 21 октября 2012 г. межпланетная станция продолжала отдаляться от Солнца и вышла в межзвездное пространство. В 1977 г. были запущены две американские АМС серии "Вояджер": "Вояджер-1" и "Вояджер-2", план полета которых предусматривал вылет за пределы Солнечной системы. Они впервые передали высококачественные снимки Юпитера и Сатурна, "Вояджер-2" раньше своего собрата достиг Урана и Нептуна, зато первым в истории аппаратом, достигшим границ Солнечной системы (гелиопаузы) и вышедшим за ее пределы (в декабре 2004 г.), стал "Вояджер-1". "Вояджер-2"



STARSHOT

The story of humanity is a story of great leaps – out of Africa, across oceans, to the skies and into space. Since Apollo 11's 'moonshot', we have been sending our machines ahead of us – to planets, comets, even interstellar space.

But with current rocket propulsion technology, it would take tens or hundreds of millennia to reach our neighboring star system, Alpha Centauri. The stars, it seems, have set strict bounds on human destiny. Until now.

In the last decade and a half, rapid technological advances have opened up the possibility of light-powered space travel at a significant fraction of light speed. This involves a ground-based **light beamer** pushing ultra-light **nanocrafts** – miniature space probes attached to **lightsails** – to speeds of up to 100 million miles an hour. Such a system would allow a flyby mission to reach Alpha Centauri in just over 20 years from launch, beaming home images of [its recently discovered planet Proxima b](#), and any other planets that may lie in the system, as well as collecting other scientific data such as analysis of magnetic fields.

Breakthrough Starshot aims to demonstrate proof of concept for ultra-fast light-driven nanocrafts, and lay the foundations for a first launch to Alpha Centauri within the next generation. Along the way, the project could generate important supplementary benefits to astronomy, including solar system exploration and detection of Earth-crossing asteroids.

A number of hard engineering challenges remain to be solved before these missions can become a reality. They are listed [here](#), for consideration by experts and public alike, as part of the initiative's commitment to full transparency and [open access](#). The initiative will also establish a research grant program, and will make available other funding to support relevant scientific and engineering research and development.

For information for all Starshot solicitations [click here](#).

BREAKTHROUGH
PRIZE

BREAKTHROUGH
JUNIOR
CHALLENGE

[ABOUT](#) [BOARD](#) [ARE WE ALONE?](#) [NEWS](#) [EVENTS](#) [CONTACTS](#)

SUBSCRIBE
YouTube f t

Официальная страница проекта "Breakthrough Starshot"

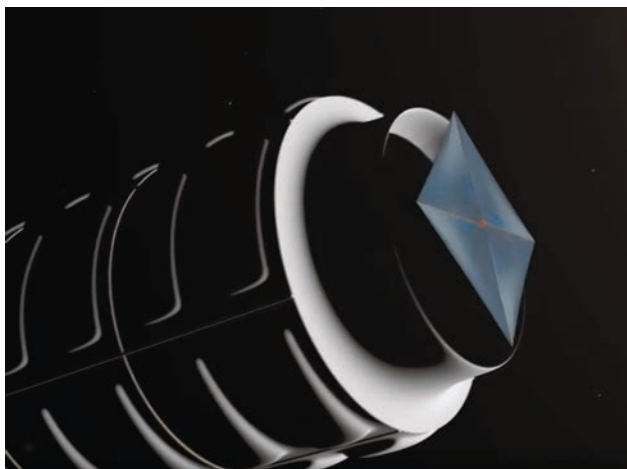
покинул Солнечную систему в августе 2007 г. Пятым КА, запущенным в 2004 г. с третьей космической скоростью (он тоже в будущем покинет Солнечную систему), стала АМС "Новые горизонты". Для того чтобы достигнуть планет в других звездных системах, таким аппаратам потребуются миллионы лет.

В настоящее время предложен прорывной проект, позволяющий преодолеть эту трудность. В 2016 г. русский миллиардер Ю. Мильнер (выпускник физического факультета МГУ по специальности "теоретическая физика") заявил о своем намерении финансировать программу "Breakthrough Initiatives" (с англ. яз. – "Прорывные инициативы") для поиска внеземной жизни

во Вселенной. В ее рамках был объявлен проект "Breakthrough Listen", в процессе реализации которого арендуется время наблюдений на нескольких радиотелескопах, после чего идет обработка получаемых данных. 12 апреля 2016 г. на пресс-конференции в Нью-Йорке Ю. Мильнер и С. Хокинг объявили о самом амбициозном новом проекте – "Breakthrough Starshot", который направлен на разработку межзвездных космических аппаратов, оснащенных световым парусом. О финансовой поддержке этого проекта объявил основатель "Facebook" М. Цукерберг.

Инициаторы программы планируют отправить несколько тысяч межзвездных зондов с камерами для передачи снимков планет в разные районы

Вселенной, но в первую очередь – к звездной системе Альфа Центавра, удаленной на 4,37 св. года от Земли. Предполагается, что этот путь межзвездного зонда, двигающегося со скоростью примерно 15–20% от скорости света, займет около 20 лет. Базовый аппарат доставит около тысячи таких зондов (каждый массой в 1 г) на высокоэллиптическую орбиту, а затем запустит их один за другим в разные районы Вселенной. Каждый зонд будет представлять собой StarChip (наночип), имеющий массу примерно 0,5 г, он будет соединен сверхпрочными наностропами с парусом размерами в несколько метров и толщиной 100 нм. StarChip включает в себя микропроцессор, электронику для фотокамер и миниатюрный радиоактивный источник питания. После вылета каждого зонда из базового аппарата наземные лазеры в течение нескольких минут будут направлять лучи, которые должны сойтись в суммарный луч мощностью 50–100 ГВт и сфокусироваться на парусе. Лазерная энергетическая установка будет представлять собой фазированную решетку (размером 1×1 км), составленную из 20 млн лазерных излучателей с апертурой 20–25 см. В процессе фазирования (синхронизация фазы луча на каждом отдельном лазере) предполагается сфокусировать излучение (длина волны 1,06 мкм), идущее со всей решетки, в пятно диаметром в несколько метров на расстояниях до 2 млн км (предельная точность фокусировки составляет 10^{-9} рад). Это обеспечит ускорение зонда около 30 000 g, что позволит ему достигнуть целевой скорости – около 60 тыс. км/с (20% от



Конструкция базового аппарата с установленными в нем многочисленными межзвездными зондами (с официального сайта проекта "Breakthrough Starshot": <https://breakthroughinitiatives.org/page/14>)

скорости света). Предполагается применять компоненты "Breakthrough Starshot" в будущем для полетов зондов в Солнечной системе и за ее пределами.

Для успешного осуществления миссии необходимо решить ряд невероятно сложных технических задач: например, материал паруса должен выдерживать большие нагрузки при ускорении и столкновении с частицами космической пыли во время полета и иметь возможность отражать луч лазера практически зеркально (при доле поглощенного света не более 10^{-5}). При этом парус должен быть не только сверхпрочным, но и обладать сверхмалым удельным весом. Для того чтобы парус не расплавился в поле излучения лазера, он должен отражать 99,999% падающего света. Инициаторы проекта связывают надежды на возможность создания такого материала для паруса с развитием нанотехнологий конструирования метаматериалов.



Предполагаемый вид зонда с парусом (из статьи "NASA's First Solar Sail NanoSail-D Deploys in Low-Earth Orbit"/ Wikimedia: https://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/11-010.html)

Пленка паруса будет содержать структуры, напоминающие оптические кристаллы. Подбирая различные искусственные элементы в качестве имплантатов-вставок, размещенных в заданном периодическом порядке в оптической среде, можно получать материалы с разнообразными электромагнитными дисперсионными свойствами. Первые успехи в этом направлении были достигнуты еще на рубеже нашего тысячелетия. Особенно плодотворным оказалось использование нанорезонаторов типа емкостно-индуктивных элементов. Однако задача создания сверхтонких пленок с толщиной, удовлетворяющей требованиям межзвездного перелета и с подавленным (более чем на пять порядков) коэффициентом поглощения пока далека от решения.

Предполагается, что для достижения необходимой мощности излучения (100 ГВт) в течение 100 с лазер может работать в режиме накопления мощности и последующего излучения коротких импульсов (примерно по 20 ГВт). Кроме того, необходимо сконструировать

систему лазеров на базе задающих генераторов, большая часть элементов которой – усилители мощностью от 0,1 до 3 кВт. Но если даже суммарный луч от всех лазеров будет создан, то возникнет проблема его фокусировки на парусе размером в несколько метров с расстояния 2 млн км, что потребует решить задачу, знакомую всем астрономам: как избавиться от рассеяния и отклонения (или хотя бы уменьшить их) луча при прохождении через атмосферу. В последние десятилетия с этой целью пытаются использовать адаптивную оптику. Для решения такой проблемы источник лазерного света в проекте "Starshot" – фазированная решетка, составленная из 20 млн отдельных излучателей, – должна иметь систему обратной связи с адаптивной оптикой. Для этого потребуются использовать ряд опорных источников: на отдельных зондах, на базовом аппарате и в атмосфере – в дополнение к звездам, служащим источниками опорных сигналов для настройки фазирования решетки (в том числе сигнала от зонда, когда он достигнет цели полета).



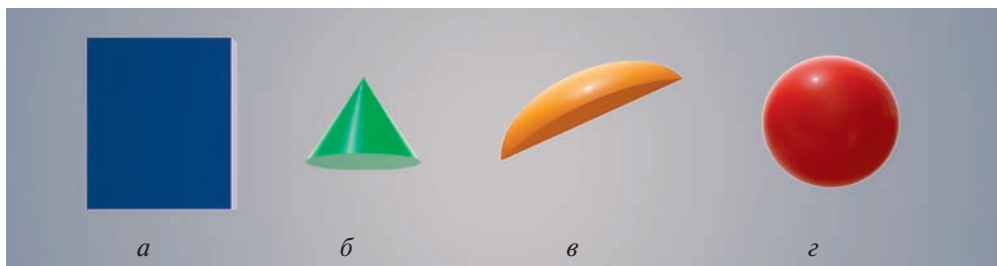
Лазерная силовая установка с фазированной решеткой для передачи лазерного луча на парус зонда (с официального сайта проекта "Breakthrough Starshot": <https://breakthroughinitiatives.org/page/14>)

По оценкам С. Перлмуттера (лауреата Нобелевской премии по физике 2011 г.), С. Чу (лауреата Нобелевской премии по физике 1997 г.), академика Р. Сагдеева и других ученых, на первый план вышла проблема устойчивости ориентации зонда в пространстве: нужно определить, какими должны быть форма самого паруса и тип луча лазера для того, чтобы зонд в процессе ускорения не вышел из зоны действия луча. Авторы предложенной статьи в рамках оптико-механической задачи исследовали устойчивость ориентации зонда, оснащенного парусом, при

малых возмущениях этой его способности во время действия интенсивного лазерного луча.

Как и в проекте "Breakthrough Starshot", в задаче рассматривался зонд, имеющий массу 1 г и парус радиусом 200 см, на поверхность которого действует луч лазера с силой света, равной $5 \times 10^7 \text{ г} \times \text{см}/\text{с}^2$; при этом отражение света от поверхности паруса – зеркальное. В условиях такой постановки задачи зонд будет чувствителен к крутящим моментам и к действию поперечных сил, влияющих на ориентацию паруса и на его боковые смещения. Движение зонда

Формы паруса для межзвездного зонда: а – плоская, б – коническая, в – часть сферы, г – сферическая





Так, в представлении художника, межзвездный зонд достигнет экзопланеты у какой-либо ближайшей звезды

под действием лазерного луча описывается с помощью уравнений Эйлера и второго закона Ньютона. Полученная система уравнений исследована аналитически на устойчивость, построены траектории движения каждого из зондов.

Были рассмотрены разные формы конструкции паруса: плоская, коническая и сферическая (часть сферы с радиусом кривизны, много бóльшим, чем радиус паруса). Плоский парус быстро выходит из зоны действия луча, не успев получить необходимое ускорение. Ориентация паруса конической и сферической форм будет стабильной, если расстояние от центра паруса до центра масс больше, чем радиус кривизны паруса. Американские ученые из Гарвардского университета З. Манчестер и А. Леб нашли другую его устойчивую конфигурацию: парус должен иметь сферическую форму, а лазерный луч – состоять из четырех отдельных составляющих

гауссова профиля (профиль луча должен иметь форму в виде четырех холмиков). Эта форма паруса позволяет экранировать полезную нагрузку от действия лазерного луча. Зонд с таким парусом оказывается устойчивым: будучи “захваченным” в некую потенциальную яму, он попадает в некую силовую ловушку.

Однако даже при проявлении парусом критерия

устойчивости в поле электромагнитной волны возможны новые неприятности. В рассматриваемой системе, в которой парус и корпус зонда совершают колебания в вакууме, отсутствуют эквиваленты сил трения, приводящих к затуханию. Это значит, что колебания зонда с парусом, “захваченные” в эффективную потенциальную яму, не затухают. При случайных внешних толчках они могут возрастать. Так, если присутствует дрожание лазерного луча – может нарушиться условие адиабатичности и сила инерции будет подталкивать парус. Такое стохастическое ускорение может “выбросить” парус “из луча”. Во всяком случае, это может добавить требование к компенсации остаточного дрожания луча в атмосфере.

Новизна почти всех элементов проекта “Breakthrough Starshot” открывает новые возможности для стимулирования развития разных технологий и направлений исследований – как прикладных, так и фундаментальных*.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли РАН.

* Отметим, что на официальном сайте проекта “Breakthrough Starshot” (<https://breakthroughinitiatives.org/research/3>) для дальнейшего ознакомления с темой читатели могут найти обширный список литературы по научным проблемам проекта “Breakthrough Starshot”: технические книги и статьи по вопросам межзвездных полетов (в том числе по технике использования лазерных пучков), статьи по конструированию материала для паруса, чипов, по лазерной филаментации; научные обзоры, в которых обсуждается вопрос обитаемости планет в системе Альфа Центавра.