

ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ

StarChip – чип массой 1 г, содержащий камеры, системы навигации и связи, источник питания и фотонные маневровые двигатели. За счет массового серийного производства стоимость подобных устройств можно приблизить к стоимости современного смартфона.

ПРОЦЕССОРЫ

Быстрые и компактные процессоры, подобные тем, которые стоят в современных смартфонах, – основа цифровой системы управления, навигации и коммуникации.

ЗЕРКАЛЬНАЯ КОРМА

Во время разгона модуль **StarChip** находится в поле излучения мощного 100-Вт лазера. Чтобы защитить чип от перегрева, на заднюю поверхность нанесено многослойное диэлектрическое покрытие с очень высоким коэффициентом отражения.

МАНЕВРОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В качестве маневровых двигателей предполагается использовать 1-Вт лазерные диоды. Такие диоды уже коммерчески доступны, и, в соответствии с законом Мура, каждые два года их мощность возрастает вдвое при той же массе.

БАТАРЕЯ

Радиоизотопная (плутоний-238 или америций-241) батарея с суперконденсатором общей массой 150 мг. Рассматривается также вариант покрытия паруса тонкопленочными солнечными панелями, что при приближении к звезде на расстояние 1 а.е. позволит получить более 2 кВт мощности. Можно покрыть солнечными панелями и сам чип.

ФОТОКАМЕРЫ

Камеры с оптикой на основе линз Френеля или безлинзовые Planar Fourier Capture Array (PFCA – КМОП-матрица, пиксели которой чувствительны к углу падения световых лучей). С помощью преобразования Фурье можно восстановить изображение, не используя оптику. Плюс PFCA – объем в 100000 раз меньше обычных камер.

ЛОБОВАЯ БРОНЯ

Столкновение даже с редкими микроскопическими пылинками и с межзвездным газом на скорости в 20% световой приводит к серьезной эрозии передней поверхности чипа. Поэтому **StarChip** во время полета предполагается так, чтобы минимизировать лобовое сечение. Кроме того, его передняя поверхность защищена на слоем бериллиевой бронзы.

ВПЕРЕД, К ЗВЕЗДАМ!

12 АПРЕЛЯ 2016 ГОДА ЗНАМЕНИТЫЙ БРИТАНСКИЙ ФИЗИК СТИВЕН ХОКИНГ И РОССИЙСКИЙ БИЗНЕСМЕН И МЕЦЕНАТ ЮРИЙ МИЛЬНЕР ОБЪЯВИЛИ О ВЫДЕЛЕНИИ \$100 МЛН НА ФИНАНСИРОВАНИЕ ПРОЕКТА BREAKTHROUGH STARSHOT. ЦЕЛЮ ПРОЕКТА СТАЛА РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, СПОСОБНЫХ СОВЕРШИТЬ МЕЖЗВЕЗДНЫЙ ПОЛЕТ К АЛЬФЕ ЦЕНТАВРА.

Текст: Дмитрий Мамонтов

В десятках фантастических романов описаны гигантские фотонные звездолеты размером с небольшой (или большой) город, уходящие в межзвездный полет с орбиты нашей планеты (реже – с поверхности Земли). Но по замыслу авторов проекта Breakthrough Starshot все будет происходить совсем не так: в один знаменательный день две тысячи какого-то года к одной из ближайших звезд, Альфе Центавра, стартует не один и не два, а сразу сотни и тысячи маленьких звездолетиков размером с ноготь и массой в 1 г. И у каждого из них будет тончайший солнечный парус площадью в 16 м², который и понесет звездолет со все возрастающей скоростью вперед – к звездам.

«Выстрел к звездам»

Основой проекта Breakthrough Starshot стала статья профессора физики Калифорнийского университета в Санта-Барбаре Филипа Любина «План для межзвездных полетов» (A Roadmap to Interstellar Flight).

Основная заявленная цель проекта состоит в том, чтобы сделать межзвездные полеты возможными уже при жизни следующего поколения людей, то есть не через столетия, а через десятилетия.

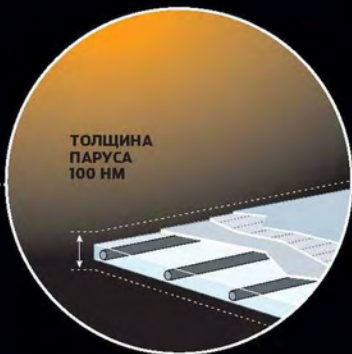
Сразу после официального анонса программы Starshot на авторов проекта обрушилась волна критики со стороны ученых и технических специалистов в различных областях. Критически настроенные эксперты отмечали многочисленные некорректные оценки и просто «белые пятна» в плане программы. Некоторые замечания были приняты во внимание, и план полета был несколько скорректирован в первой итерации.

Итак, межзвездный зонд будет представлять собой космический парусник с электронным модулем **StarChip** массой 1 г, соединенным сверхпрочными стропами с солнечным парусом площадью 16 м², толщиной 100 нм и массой 1 г. Конечно, света нашего

ТАКЕЛАЖ

Для сохранения формы паруса предполагается армировать его графеном. Некоторые композитные материалы на основе графена могут сокращаться под действием приложенного

электрического напряжения для активного управления. Для стабилизации паруса можно раскрутить или придать ему форму обратного конуса для пассивной самостабилизации в поле лазерного излучения.



ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ 50-100 ГВТ

СКОРОСТЬ 20% СВЕТОВОЙ

СОЛНЕЧНЫЙ ПАРУС

Один из главных элементов проекта – солнечный парус площадью в 16 м² и массой всего 1 г. В качестве материала паруса рассматриваются

многослойные диэлектрические зеркала, отражающие 99,999% падающего света (по предварительным расчетам этого должно хватить, чтобы парус не

расплавился в поле излучения 100-ГВт лазера). Более перспективный подход, позволяющий сделать толщину паруса меньшей длины волны отражаемого света, – это использование в качестве основы паруса монослоя метаматериала с отрицательным показателем преломления (такой

материал к тому же имеет наноперфорацию, что еще уменьшает его массу). Второй вариант – это использование материала не с высоким коэффициентом отражения, а с низким коэффициентом поглощения (10⁻⁹), такого как оптические материалы для световодов.

ПОЛЕТНЫЙ ПЛАН

1 Ракета выводит на околоземную орбиту материнский корабль, содержащий десятки, сотни, тысячи зондов.

2 Зонды покидают материнский корабль, разворачивают паруса, ориентируются и занимают стартовую позицию.

3 На Земле начинает работать фазированный массив размерами 1x1 км из 20 млн небольших (с апертурой в 20-25 см) лазерных излучателей, фокусирующий лазерный луч на поверхности паруса.

4 Для компенсации атмосферных искажений используются опорные бакены – «искусственные звезды» в верхних слоях атмосферы, на материнском корабле, а также отраженный сигнал от паруса.

5 Зонд разгоняется лазерным лучом в течение нескольких минут до 20% от скорости света, ускорение при этом достигает 30 000 g. На протяжении всего полета, который продлится около 20 лет, лазер периодически отслеживает положение зонда.

6 По прибытии к цели, в систему Альфа Центавра, зонды пытаются обнаружить планеты и сделать их снимки во время пролета.

7 Используя парус как линзу Френеля и лазерный диод в качестве передатчика, зонд ориентируется и передает полученные данные в направлении Земли.

8 Через пять лет на Земле принимают эти данные.

Солнца недостаточно, чтобы разогнать даже столь легкую конструкцию до скоростей, при которых межзвездные путешествия не будут длиться тысячелетиями. Поэтому главная изюминка проекта StarShot – это разгон с помощью мощного лазерного излучения, которое фокусируется на парусе. По оценкам Любина, при мощности лазерного луча 50–100 ГВт ускорение составит около 30 000 g, и за несколько минут зонд достигнет скорости в 20% световой. Полет к Альфе Центавра продлится около 20 лет.

Под звездными парусами

Одна из ключевых деталей проекта – это солнечный парус. В исходном варианте площадь паруса изначально составляла всего 1 м², и из-за этого он мог не выдерживать нагрева при разгоне в поле лазерного излучения. Новый вариант использует парус площадью 16 м², так что тепловой режим будет хотя и довольно жестким, но, по предварительным оценкам, не должен расплавить или разрушить парус. Как пишет сам Филип Любин, в качестве основы для паруса планируется использовать не металлизированные покрытия, а полностью диэлектрические многослойные зеркала: «Такие материалы характеризуются умеренным коэффициентом отраже-

ния и чрезвычайно низким поглощением. Скажем, оптические стекла для волоконной оптики рассчитаны на большие световые потоки и имеют поглощение порядка двадцати триллионных на 1 км толщины». Добиться хорошего коэффициента отражения от диэлектрика при толщине паруса в 100 нм, а это много меньше длины волны, не просто. Но авторы проекта возлагают некоторые надежды на использование новых подходов, таких как монослои метаматериала с отрицательным показателем преломления. «Кроме того, нужно учитывать, что отражение от диэлектрических зеркал настраивается на узкий диапазон длин волн, а по мере ускорения зонда эффект Доплера сдвигает длину волны более чем на 20%, – говорит Любин. – Мы это учитывали, поэтому отражатель будет настроен примерно на двадцатипроцентную ширину полосы излучения. Мы спроектировали такие отражатели. Если необходимо, доступны и отражатели с большей шириной полосы».

Лазерная установка

Основная силовая установка звездолета не полетит к звездам – она будет расположена на Земле. Это наземная фазиремая решетка лазерных излучателей размером 1x1 км. Суммарная мощность лазеров должна

ОСНОВНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА ЗВЕЗДОЛЕТА НЕ ПОЛЕТИТ К ЗВЕЗДАМ – ОНА БУДЕТ РАСПОЛОЖЕНА НА ЗЕМЛЕ. ЭТО НАЗЕМНАЯ ФАЗИРУЕМАЯ РЕШЕТКА ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ РАЗМЕРОМ 1X1 КМ.

МЕЖЗВЕЗДНЫЙ ПОЛЕТ – ВОПРОС НЕ ВЕКОВ, А ДЕСЯТИЛЕТИЙ

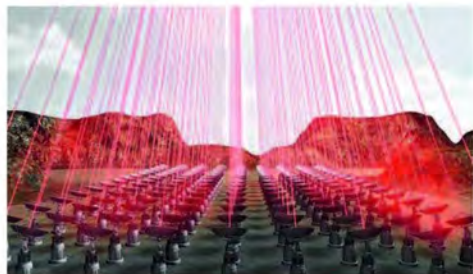
ЮРИЙ МИЛЬНЕР, РОССИЙСКИЙ БИЗНЕСМЕН И МЕЦЕНАТ, ОСНОВАТЕЛЬ ФОНДА BREAKTHROUGH INITIATIVES



За последние 15 лет произошли существенные, можно сказать, революционные продвижения по трем технологическим направлениям: миниатюризация электронных компонентов, создание нового поколения материалов, также удешевление и увеличение мощности лазеров. Сочетание этих трех тенденций приводит к теоретической возможности разогнать наноспутник до почти релятивистских скоростей. На первом этапе (5–10 лет) мы планируем провести более углубленное научно-инженерное исследование, чтобы понять, насколько этот проект реализуем. На сайте проекта есть список из примерно 20 серьезных технических проблем, без решения которых мы не сможем идти дальше. Это не окончательный список, но, опираясь на мнение научного совета, мы считаем, что первый этап проекта имеет

достаточную мотивацию. Я знаю, что проект звездного паруса подвергается серьезной критике со стороны специалистов, но думаю, что позиция некоторых критически настроенных экспертов связана с не совсем точным пониманием того, что же мы реально предлагаем. Мы финансируем не полет к другой звезде, а вполне реалистичные многоцелевые разработки, связанные с идеей межзвездного зонда лишь общим направлением. Эти технологии найдут применение и для полетов в Солнечной системе, и для защиты от опасных астероидов. Но постановка столь амбициозной стратегической цели, как межзвездный полет, представляется оправданной в том смысле, что развитие технологий за последние 10–20 лет, вероятно, делает реализацию подобного проекта вопросом не веков, как многие предполагали, а скорее – десятилетий.

составлять от 50 до 100 ГВт (это эквивалентно мощности 10–20 Красноярских ГЭС). Предполагается с помощью фазирования (то есть изменения фаз на каждом отдельном излучателе) сфокусировать излучение с длиной волны 1,06 мкм со всей решетки в пятно диаметром несколько метров на расстояниях вплоть до многих миллионов километров (предельная точность фокусировки 10^{-9} радиана). Но такой фокусировать излучение сильно мешает турбулентная атмосфера, размывающая луч в пятно размером примерно в угловую секунду (10^{-5} радиана). Улучшения на четыре порядка предполагается достичь с помощью адаптивной оптики (АО), которая будет компенсировать атмосферные искажения. Лучшие системы адаптивной оптики в современных телескопах



уменьшают размытие до 30 угловых миллисекунд, то есть до намеченной цели остается еще примерно два с половиной порядка. «Чтобы победить мелкомасштабную атмосферную турбулентность, фазиремая решетка должна быть разбита на очень мелкие элементы, размер излучающего элемента для нашей длины волны должен составлять не более 20–25 см, — объясняет Филип Любин. — Это минимум 20 млн излучателей, но такое количество меня не пугает. Для обратной связи в системе АО мы планируем использовать много опорных источников — бакенов — и на зонде, и на материнском корабле, и в атмосфере. Кроме того, мы будем отслеживать зонд на пути к цели. Мы также хотим использовать звезды как бакен для настройки фазирования решетки при приеме сигнала от зонда по прибытии, но для надежности будем отслеживать зонд».

Прибытие

Но вот зонд прибыл в систему Альфа Центавра, сфотографировал окрестности системы и планеты (если они есть). Эту информацию нужно каким-то образом передать на Землю, причем мощность лазерного передатчика зонда ограничена единицами ватт. А через пять лет этот слабый сигнал нужно принять на Земле, выделив из фонового излучения звезды. По замыслу авторов проек-

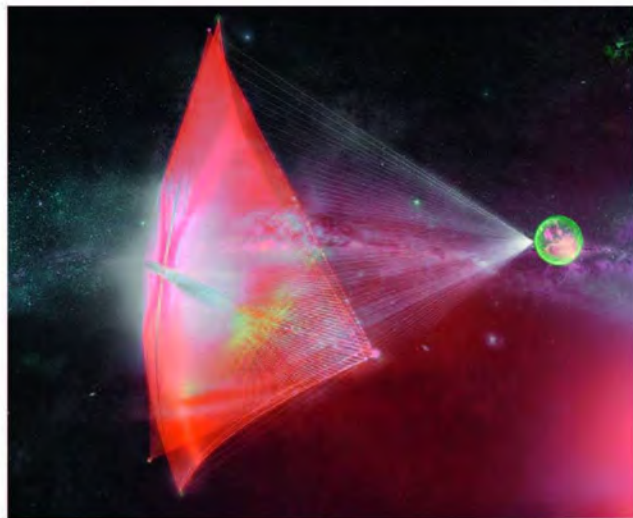
ПРОХОЖДЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ ВЫЗЫВАЕТ ПРИЛИВНУЮ СИЛУ (ОБЫЧНЫЕ ЛУННЫЕ ИЛИ СОЛНЕЧНЫЕ ПРИЛИВЫ — ЭТО ОТДЕЛЬНОЕ ЯВЛЕНИЕ, И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ТУТ НИ ПРИ ЧЕМ).

ВОПРОСЫ БЕЗ ОТВЕТОВ: ВОЛНА КРИТИКИ



ФИЛИП ЛЮБИН, ПРОФЕССОР ФИЗИКИ КАЛИФОРНИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА В САНТА-БАРБАРЕ, АВТОР СТАТЬИ «ПЛАН ДЛЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПОЛЕТОВ», ЧЛЕН НАУЧНОГО СОВЕТА BREAKTHROUGH STARSHOT

Филип Любин в своей статье приводит численные оценки пунктов плана, однако многие ученые и специалисты относятся к этим данным весьма критически. Конечно, для проработки столь амбициозного проекта, как Breakthrough Starshot, требуются годы работы, да и \$100 млн — не такая уж и большая сумма для работы подобного масштаба. В особенности это касается наземной инфраструктуры — фазированной решетки лазерных излучателей. Установка такой мощности (50–100 ГВт) потребует гигантского количества энергии, то есть рядом нужно будет построить как минимум десяток крупных электростанций. Помимо этого, потребуются отводить от излучателей огромное количество тепла на протяжении нескольких минут, и как это делать — пока что совсем неясно. Таких вопросов без ответов в проекте Breakthrough Starshot огромное количество, однако пока что работа только началась. «В научный совет нашего проекта входят ведущие специалисты, ученые и инженеры в различных релевантных областях, включая двух нобелевских лауреатов, — говорит Юрий Мильнер. — И я слышал весьма сбалансированные оценки реализуемости этого проекта. При этом мы, безусловно, полагаемся на совокупную экспертизу всех членов нашего научного совета, но в то же время открыты для более широкой научной дискуссии».



та, у цели зонд маневрирует таким образом, что парус превращается в линзу Френеля, фокусирующую сигнал зонда в направлении Земли. Согласно оценкам, идеальная линза при идеальной фокусировке и идеальной ориентации усиливает сигнал мощностью 1 Вт до 10^{13} Вт в изотропном эквиваленте. Но как рассмотреть этот сигнал на фоне гораздо более мощного (на 13–14 порядков!) излучения звезды? «Свет от звезды на самом деле довольно слаб, поскольку ширина линии нашего лазера очень мала. Узкая линия – ключевой фактор в сокращении фона, – говорит Любин. – Идея сделать из паруса линзу Френеля на основе тонкопленочного дифракционного элемента достаточно сложна и требует большой предварительной работы, чтобы понять, как именно лучше сделать это. Этот пункт на самом деле – один из главных в нашем плане проекта».

С другой стороны, фазированная решетка оптических излучателей / приемников излучения общей апертурой в километр – это инструмент, способный видеть экзопланеты с расстояния десятков парсек. Используя приемники с перестраиваемой длиной вол-

ны, можно определить состав атмосферы экзопланет. Нужны ли вообще в таком случае зонды? «Конечно, использование фазированной решетки как очень большого телескопа открывает новые возможности в астрономии. – Но, – добавляет Любин, – мы планируем добавить к зонду инфракрасный спектрометр в качестве более современной программы в дополнение к камере и другим датчикам. У нас отличная группа фотоники в Калифорнийском университете в Санта-Барбаре, которая является частью коллаборации».

Но в любом случае, по словам Любина, первые полеты будут совершаться в пределах Солнечной системы: «Поскольку мы можем послать огромное количество зондов, это дает нам много разных возможностей. Мы также можем послать подобные маленькие (wafer-scale, то есть на чипе) зонды на обычных ракетах и использовать те же технологии для изучения Земли или планет и их спутников в Солнечной системе».

TIM
 Редакция благодарит газету «Троицкий вариант – наука» (www.trv-science.ru) и ее главного редактора Бориса Штерна за помощь в подготовке статьи

ЧТО ПОМОГАЕТ ЗАЩИТИТЬ
 ВАШУ КОЖУ ОТ ЖЖЕНИЯ
 ПОСЛЕ БРИТЬЯ?*

НАША НОВАЯ БРИТВА
 MACH3 TURBO?*

ИЛИ НАШ НОВЫЙ ГЕЛЬ ДЛЯ
 БРИТЬЯ С БОЛЕЕ ГУСТОЙ
 ПЕНОЙ?*

И ТО, И ТО.



РЕКЛАМА

Gillette
MACH3

* По сравнению с Gillette® Multi Plus®
 ** По сравнению с гелем для бритья
 Gillette® MACH3

Gillette
 ПЕНОЕ ДЛЯ ВОЗДУШНОЙ ПЕНА*