

Тайны АНТИВЕЩЕСТВА

Загадку появления Вселенной можно разгадать, изучая антиматерию. **Фрэнк Клоуз** рассказывает, как получают атомы антивещества, а **Стивен Бакстер** размышляет на тему его применения.

В этом году в рамках эксперимента ALPHA в ЦЕРНе (CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) удалось создать атомы антиводорода — антивещества, соответствующего водороду, — и удержать их более 15 минут.

Как заметил один работающий в ЦЕРНе физик, 15 минут хватит, чтобы выпить чашку кофе. В будущем этого, вероятно, окажется более чем достаточно, чтобы провести эксперименты и проверить, ведет ли себя антиводород так же, как водород. Если обнаружится хоть малейшее отличие, это станет важным шагом к разрешению величайшей научной загадки: почему Вселенная состоит из вещества, а не из антивещества, хотя при Большом взрыве возникли оба вида материи.

Эта загадка — основная причина, заставляющая ученых исследовать антиматерию. Подробности вы найдете в статье профессора Фрэнка Клоуза на странице 68. В будущем антивещество может также получить применение в качестве чрезвычайно эффективного топлива. Научный фантаст Стивен Бакстер анализирует эти возможности на странице 74. ▶

Как создать антивещество

Фрэнк Клоуз



Фрэнк Клоуз (Frank Close) — офицер Ордена Британской Империи, профессор теоретической физики в Оксфордском университете, — отвечает на важнейшие вопросы, связанные с антиматерией.

Антивещество, если получить его в большом количестве, будет выглядеть так же, как и обычное вещество. На глаз вы не разберете, где какое. Даже если присмотреться к отдельным атомам, вещество и антивещество будут неразличимы. Их глубинная взаимодополнительность начинает проявляться лишь внутри атомов.

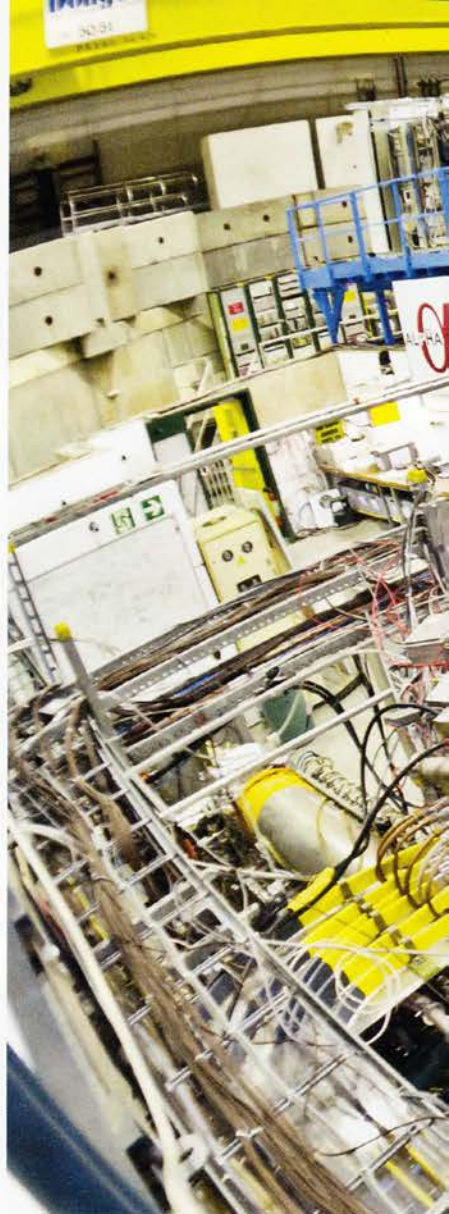
Атомы обычного вещества, из которых сложены мы с вами и всё вокруг, состоят из легких электронов, обращающихся вокруг массивных (по атомным меркам) центральных ядер. Атом простейшего элемента, водорода, состоит из одного электрона и ядра, представляющего собой один протон. Электрон несет отрицательный электрический заряд, а протон — такой же по величине, но положительный заряд. Существует закон, по которому противоположные заряды притягиваются. Он и заставляет эти компоненты держаться вместе, образуя атом.

Одна из задач ЦЕРНа — понять, почему во Вселенной существует асимметрия между веществом и антивеществом



Атом антиводорода — такой же, как атом водорода, за исключением одного момента: электрические заряды его компонентов имеют противоположный знак. То есть центральный массивный отрицательно заряженный антипротон удерживает на некотором расстоянии легкий положительно заряженный «антиэлектрон», называемый позитроном. С точки зрения гравитационных и электромагнитных взаимодействий ничего не меняется. Положительные и отрицательные заряды притягиваются одинаково в обоих случаях. Электромагнитные силы, которые соединяют атомы в молекулы и куски вещества, точно так же действуют и между антиатомами, формируя антимолекулы и антивещество.

Согласно современным космологическим моделям, Большой взрыв должен был породить сопоставимые количества вещества и антивещества. Поэтому отсутствие в нынешней Вселенной значительных запасов антивещества кажется загадочным. Одна из



ЗАГАДКА ОТСУТСТВУЮЩЕЙ АНТИМАТЕРИИ

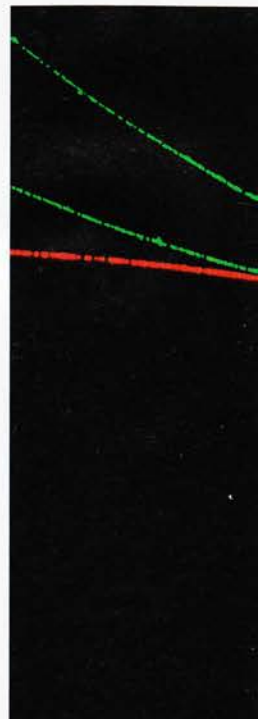
С антивеществом связана одна из величайших загадок: почему во Вселенной его практически нет? Большой взрыв 13,7 млрд лет назад породил материю и антиматерию в примерно равных пропорциях. В «скупенной» горячей Вселенной частицы и античасти-

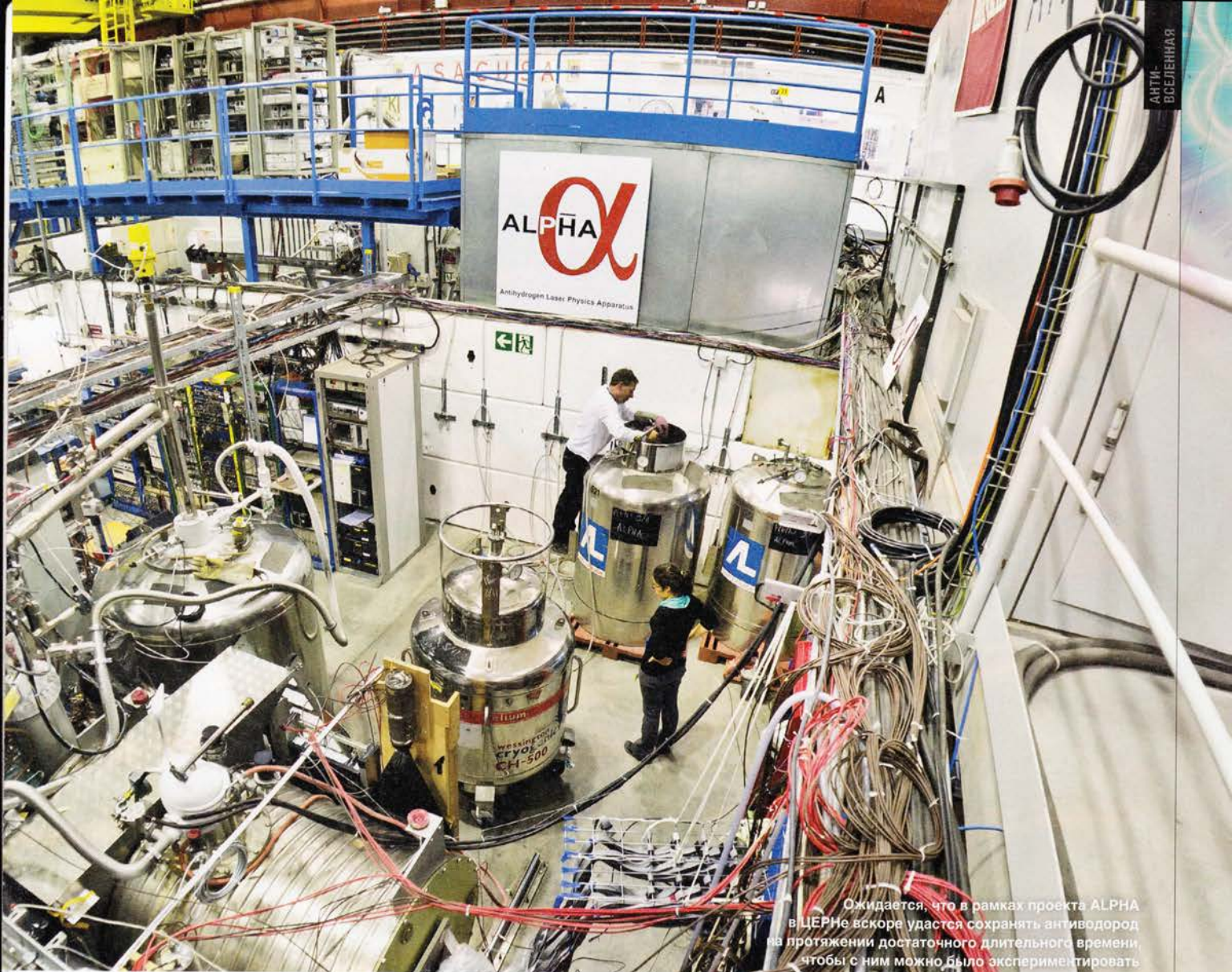
цы неизбежно взаимодействовали друг с другом — аннигилировали, порождая вспышки гамма-излучения. В новорожденной Вселенной такие столкновения происходили постоянно, и едва возникшая материя не должна была просуществовать долго.

Почему же мы теперь живем в материальном мире, а не среди чистой энергии? Одно из объяснений — с самого начала материи было больше, чем антиматерии. Но откуда возникает вопрос: откуда взялась исходная асимметрия?

Другая версия: после аннигиляции избыток вещества остался в нашей части Вселенной, а антивещество преобладает в других местах. Признаком присутствия антивещества тогда станет наличие гамма-излучения, порождаемого аннигиляцией электронов и позитронов в местах «стыков». Ничего подобного не обнаружено.

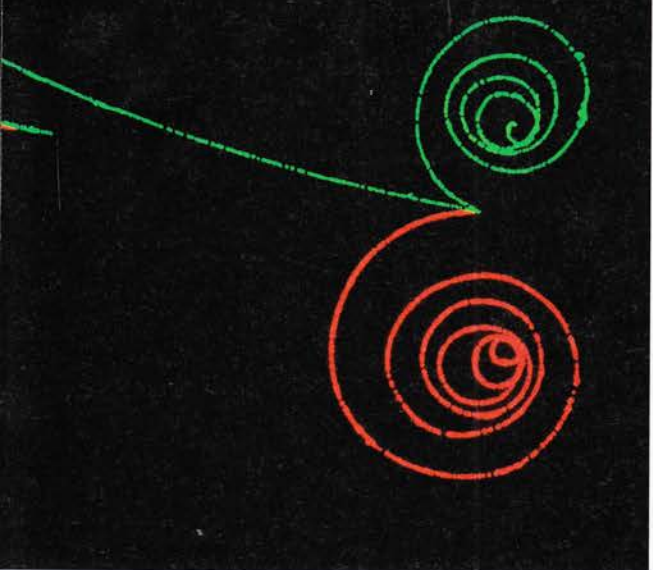
По третьей, наиболее привлекательной гипотезе, существует тонкое различие между материей и антиматерией, и при их аннигиляции сохраняется небольшой избыток вещества — он-то и составляет нашу Вселенную.





Ожидается, что в рамках проекта ALPHA в ЦЕРНе вскоре удастся сохранить антиводород на протяжении достаточного длительного времени, чтобы с ним можно было экспериментировать

На этом снимке пузырьковой камеры видно, как возникает электрон (зеленая линия) и позитрон (красная). Третий, едва изогнутый трек — это более массивная частица



основных задач ЦЕРНа — разрешить эту загадку и объяснить, почему во Вселенной возникла асимметрия между веществом и антивеществом.

Одно мы знаем наверняка: вещество и антивещество не могут уживаться вместе. Это касается как отдельных элементарных частиц, так и целых атомов. Когда частица встречается со своим двойником-античастицей, они взаимно уничтожаются — аннигилируют, порождая при этом вспышку чрезвычайно жесткого гамма-излучения.

С античастицами люди имеют дело уже давно и научились применять их на практике. Некоторые радиоактивные элементы самопроизвольно испускают позитроны, и аннигиляция позитронов с электронами, которая сопровождается излучением гамма-квантов, уже десятилетиями используется для медицинской диагностики в так называемой позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ).

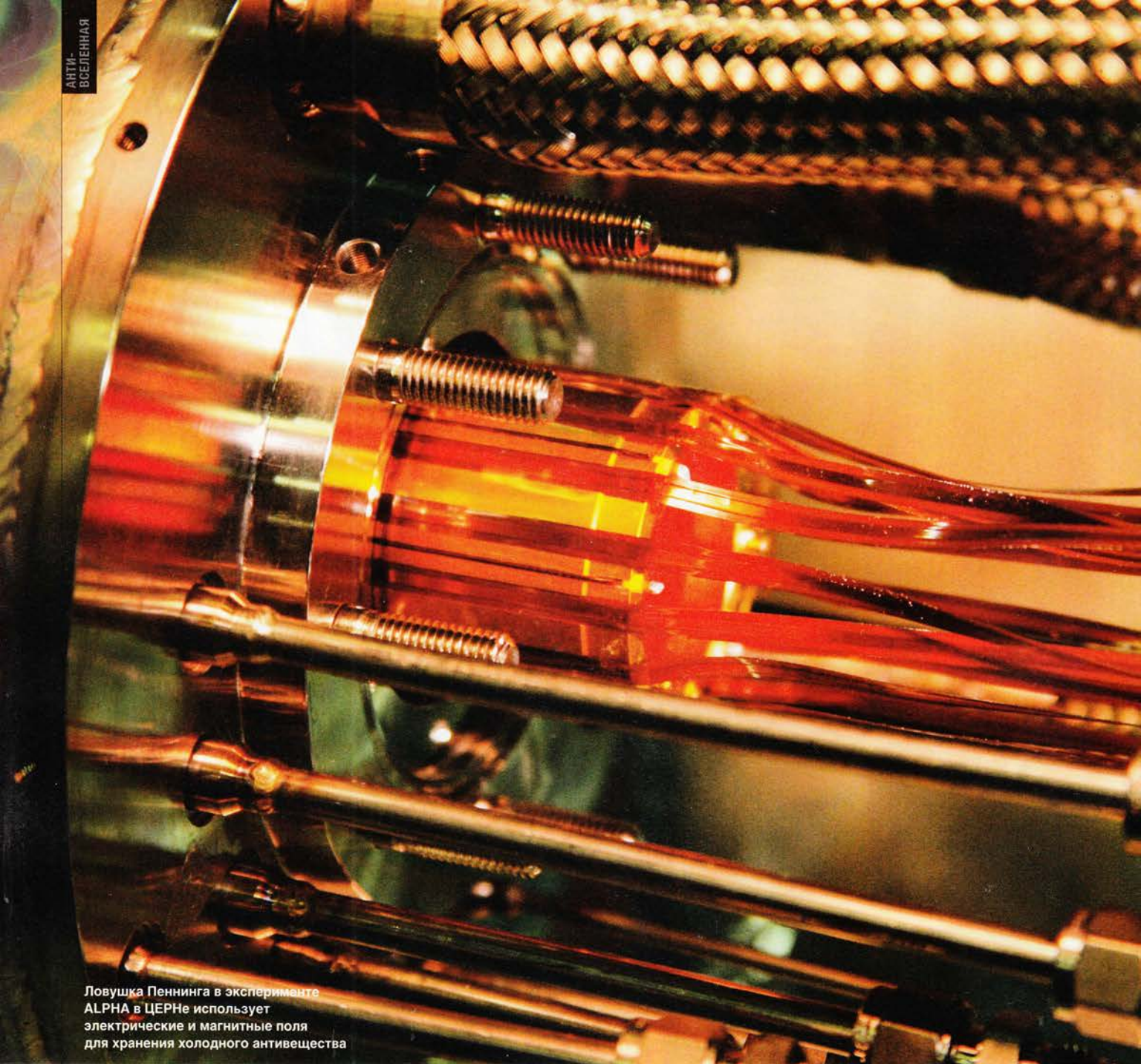
В 90-е годы прошлого века были проведены весьма впечатляющие эксперименты по аннигиляции электро-

нов и позитронов в ускорителе частиц в ЦЕРНе. В Большом электрон-позитронном коллайдере (БЭП, Large Electron-Positron Collider, LEP) пучки электронов и позитронов разогнались почти до скорости света, а затем сталкивались. На какое-то время в объеме менее атомного ядра возникали условия, царившие во Вселенной спустя несколько мгновений после ее рождения.

Изучая продукты распада от таких миниатюрных «больших взрывов», можно судить о процессах формирования вещества при появлении Вселенной. Эксперименты подтвердили, что при столкновениях рождается сбалансированный набор частиц и античастиц. Это говорит в пользу теории, согласно которой вещество и антивещество возникли в ранней Вселенной в сопоставимых количествах, и загадка отсутствия антивещества так и остается неразрешенной.

Проблема хранения

Чтобы подойти к разгадке этой тайны, было бы неплохо научиться не только создавать атомы ▶



Ловушка Пеннинга в эксперименте ALPHA в ЦЕРНе использует электрические и магнитные поля для хранения холодного антивещества

► антивещества, но и сохранять их продолжительное время. Однако создать антиматерию так, чтобы она немедленно не проаннигилировала с обычным веществом, — большая проблема. Не случайно одна из любимых тем научных фантастов — взрывы, происходящие из-за небрежного хранения антивещества (см. источники энергии в «Звездном пути» или смертоносную бомбу из триллера Дэна Брауна «Ангелы и демоны»). В реальности подобные объемы антивещества будут произведены нескоро (если это вообще произойдет), но и деструкция на атомарном уровне создает изрядные проблемы с хранением: как вы удержите субстанцию, которая разрушает всё, к чему прикасается?

Как хранить субстанцию, которая разрушает всё, к чему прикасается?



Ученые из ЦЕРНа отчасти смогли с этим справиться. Прежде всего потребовалось создать глубокий вакуум, чтобы с антивеществом не сталкивались случайные атомы воздуха. Далее нужно не допустить контакта антивещества с материальными стенками,



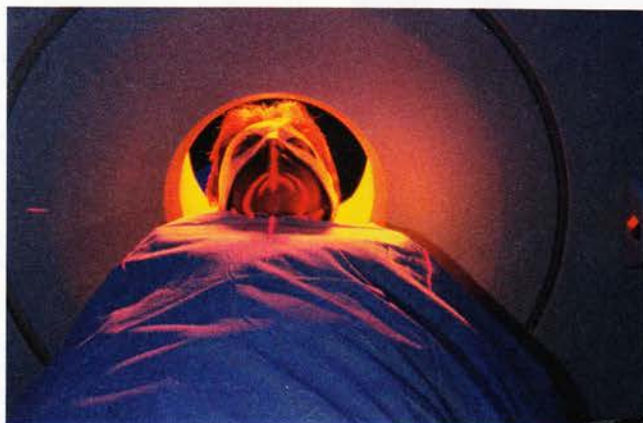
БЭП был предшественником БАКа

поскольку контейнер, естественно, изготовлен из обычного вещества. Хитрость заключается в том, чтобы создать «магнитную бутылку», состоящую не из чего-то твердого, а из комбинации электрических и магнитных полей. Они удерживают антивещество, не давая ему соприкоснуться с веществом самих магнитов.

Магнетизм уже использовался ранее для манипуляции с отдельными античастицами высокой энергии (в том числе с антипротонами и позитронами) на ускорителях вроде БЭП. Магниты вели пучок позитронов по 27-километровому кольцевому туннелю, в котором вакуум был более глубоким, чем в открытом космосе. Пучки заряженных частиц проходили по нему 11 тыс. раз

ПРИЛОЖЕНИЯ

Антивещество: фантастика и реальные возможности



МЕДИЦИНА

Метод позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) основан на регистрации гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов. Пациент принимает препарат, содержащий радиоактивные атомы, испускающие позитроны. Аннигиляция их в обследуемом органе используется для диагностики. Получение атомов антивещества не даст ничего нового для этого метода.

ФОТОННЫЙ ЗВЕЗДОЛЕТ

Может ли антивещество стать топливом для звездолетов? Несколько граммов антивещества достаточно, чтобы долететь до Марса. Но изготовление антивещества для него потребует больше энергии, чем вы сможете произвести. Разве что в открытом космосе удастся найти залежи антивещества, годного в топливо.



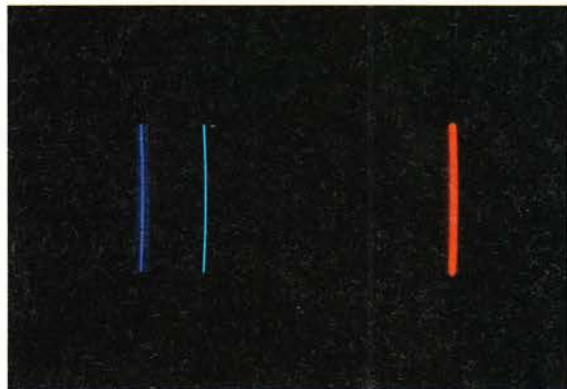
ОРУЖИЕ

Возможна ли бомба из антивещества? Энергия атомного взрыва сопоставима с тем, что даст аннигиляция меньше чем 0,5 г антивещества. Но вряд ли его будут использовать как оружие массового поражения. Даже если кусок антивещества аннигилирует взрывом, а не «тлея», понадобятся миллиарды лет, чтобы наработать этот грамм, и миллиард «магнитных бутылок», чтобы его хранить.

в секунду, почти со скоростью света. БЭП проработал в ЦЕРНе до 2000 года, после чего в том же туннеле был сооружен Большой адронный коллайдер (БАК, Large Hadron Collider, LHC).

Но антивещество с низкой энергией — совсем другое дело. «Холодные» позитроны хранятся в ловушках Пеннинга, названных в честь голландского физика Франа Мишеля Пеннинга (Fran Michel Penning), который придумал, как использовать для этой цели электрические и магнитные поля. Отдельные позитроны удерживаются в ловушках Пеннинга месяцами, что позволяет детально их изучить. Так, например, было подтверждено, что позитрон полностью идентичен электрону, ▶





► если не считать, конечно, что электрический (и лептонный — *Примеч. ред.*) заряд у него противоположного знака. Похожий результат был получен и для антипротонов.

Есть, однако, ограничение на число позитронов и антипротонов, которые можно удержать в ловушке. Чем больше частиц одного вида, тем больше их суммарный электрический заряд. В конце концов заряд настолько возрастает, что разрушает хрупкую систему электрических и магнитных полей, образующих ловушку.

Если позитрон окажется захвачен электрическим полем антипротона, то получится атом антиводорода. Хотя в целом атом электрически нейтрален, у него есть магнитный момент и собственное магнитное поле, значит, на него оказывают влияния и сторонние магнитные поля. Благодаря этому атомы антиводорода тоже можно удерживать в ловушке, хотя это намного сложнее, чем в случае отдельных позитронов и антипротонов. Лучший достигнутый на сегодня результат — удержание трех антиатомов одновременно.

Что можно узнать, исследуя антиатомы?

Для применения в качестве бомбы или топлива для космического корабля потребуются триллионы и триллионы антиатомов, и поэтому ясно, что всё это долго еще останется уделом научной фантастики. Однако удержание даже небольшого числа антиатомов открывает путь для исследования их методами спектроскопии — анализируя спектр излучаемого ими света.

В атоме водорода поведение электрона подчиняется жестким ограничениям, которые накладывают принципы квантовой механики. Получается что-то вроде лестницы: электрон может «стоять» только на одной из ее ступеней (в определенном дискретном состоянии), но никак не в промежутке между ступенями. Существует фундаментальная закономерность, согласно которой каждой ступени «лестницы»

Спектр излучения обычного водорода — в «штрих-коде» закодирована информация об энергетических состояниях электрона

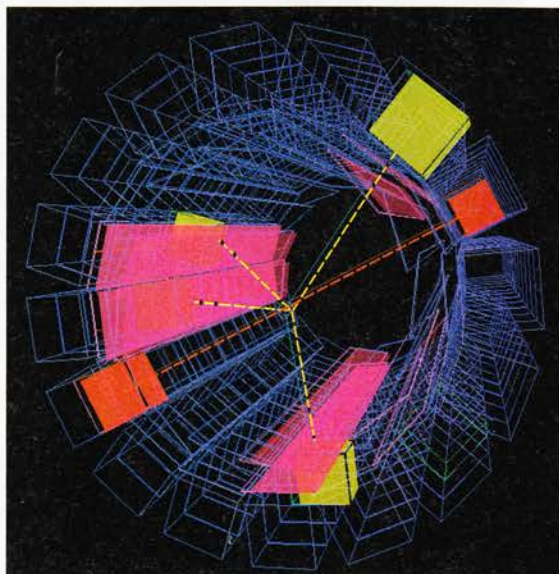
соответствует строго определенное значение энергии. Когда электрон соскакивает с высокоэнергичной ступени на одну из нижележащих, избыток энергии уносится квантом света.

Цвет этого испускаемого фотона определяется его энергией, которая равна разности энергий начального и конечного уровней. Получается спектр — последовательность цветных линий, на вид напоминающая штрих-код. Изучая спектр, можно узнать, какие «ступени» доступны для электрона в атоме.

То же самое происходит в атоме антиводорода, но «антиэлектрон» заряжен положительно, а «антипротон» — отрицательно. Согласно теоретическим предсказаниям поведение позитрона в атоме антиводорода будет таким же, как и поведение электрона в водороде. Атомный «штрих-код» антиводорода должен быть в точности таким же, как у водорода.

Для измерения спектра антиводорода необходимо сначала получить достаточно много его атомов. Новый эксперимент ALPHA, осуществляемый в ЦЕРНе, удерживает антиатомы в течение более 15 минут, и может показаться, что прорыв уже близок. Но, хотя это и впечатляющее достижение, необходимо сделать кое-что еще.

Трудность состоит не в производстве позитронов и антипротонов — ускорители ЦЕРНа получают их уже давно. Но свести позитрон и антипротон так близко, чтобы взаимное электрическое притяжение соединило их в атом антиводорода, прежде чем отдельные частицы аннигилируют с обычным веществом, никак не удается.

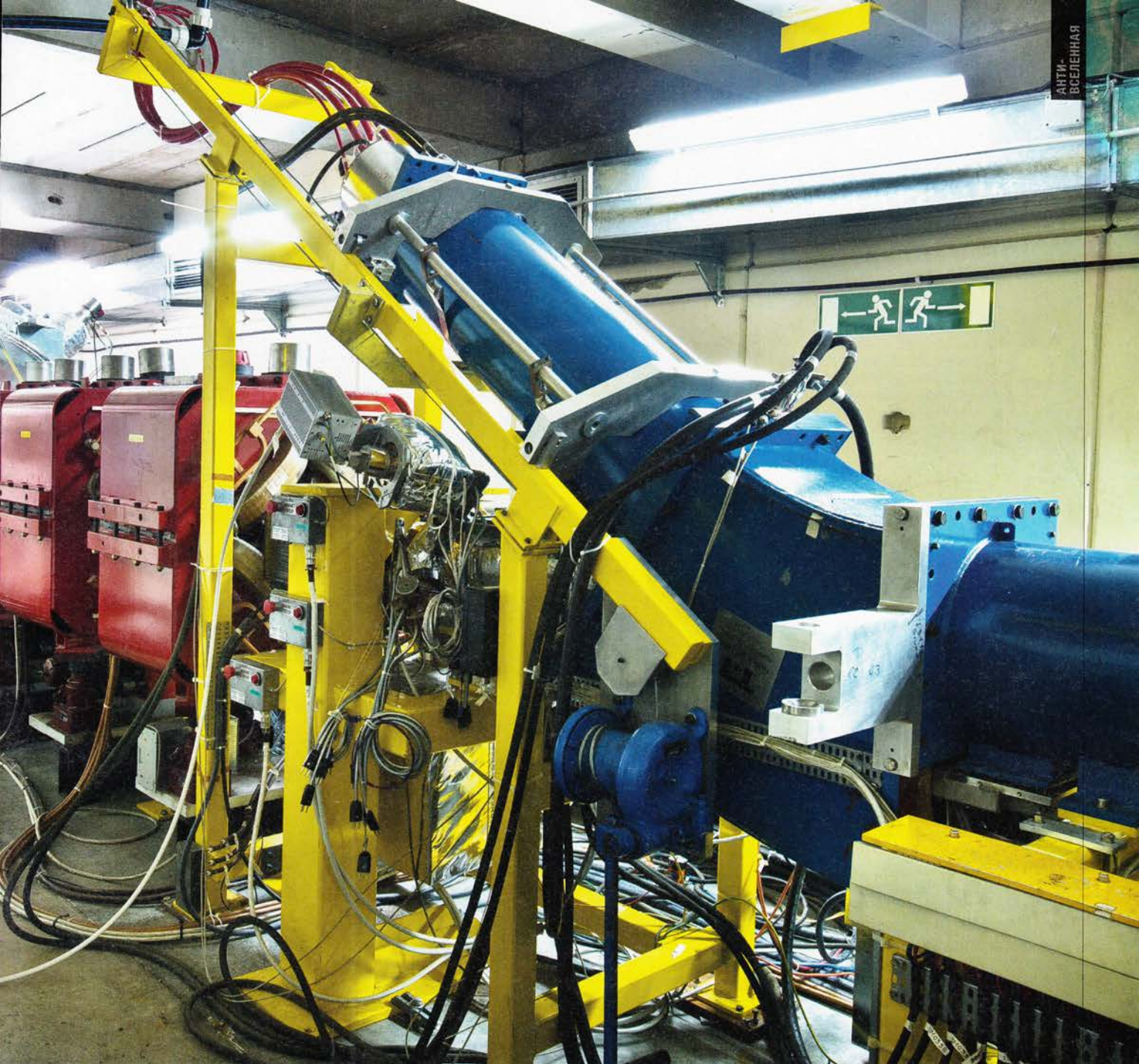


Аннигиляция антиводорода, отображенная на экране компьютера: красные линии — фотоны, желтые линии — частицы, порожденные антипротоном



Сначала антипротоны тормозятся в устройстве, называемом антипротонным замедлителем (Antiproton Decelerator, AD), а затем при помощи электрических и магнитных полей их сближают с позитронами. Атомы антиводорода при этом образуются примерно в 10% случаев. Начиная с 2009 года в эксперименте ALPHA захват антиатомов в «магнитную бутылку» происходил около 300 раз.

Захваченные атомы антиводорода обнаруживаются при выключении магнитного поля, в результате чего антиатомы рано или поздно аннигилируют с обычным веществом, и процесс этот сопровождается вспышкой излучения. Поначалу многие атомы выжидали только долю секунды, но в семи



случаях за последнее время их удавалось удерживать в течение четверти часа. В 2012 году исследователи ЦЕРНа надеются начать эксперименты с облучением антиатомов при помощи лазеров и микроволн, чтобы перевести электроны в возбужденное состояние, заставить их излучать фотоны и исследовать затем спектр этих фотонов.

Если всё пойдет по плану, то в ближайший год-два мы сможем увидеть «штрих-код» антиводорода. А когда же мы обнаружим разницу между спектрами антиводорода и водорода (если она, конечно, есть)? Все зависит от того, насколько велико это различие. Чтобы надежно установить его, понадобится удержать очень много атомов антиводорода.

Несовпадение в атомных «штрих-кодах» будет означать, что обнаружено различие между материей и антиматерией. Но надо будет еще выяснить его причину. Но когда мы это поймем, загадка отсутствующего антивещества, возможно, будет разрешена, и мы сможем ответить на вопрос, почему существует нечто, а не ничто.

Практические приложения, однако, остаются уделом научной фантастики. Космический корабль на антиматерии представить себе можно, но изготовление антивещества для него потребует больше энергии, чем вы сможете произвести. Аналогичная ситуация и с бомбой из антивещества: понадобится миллиарды лет, чтобы изготовить один грамм «взрывчатки» и мил-

Замедлитель антипротонов используется, чтобы позитроны и антинейтроны смогли сблизиться на достаточно малое расстояние и образовать антиатом

лиард магнитных бутылок, чтобы ее сохранить. Что касается медицинских приложений, то аннигиляция позитронов уже сегодня лежит в основе важнейшего метода диагностического сканирования, и антиводород ничего нового к этому не добавит.

Вот если бы большое количество античастиц было обнаружено в доступной нам части космоса, и мы научились бы добывать их, то это дало бы человечеству принципиально новый источник энергии.

А если мы научимся производить антивещество? Стивен Бакстер на следующей странице рассуждает, к чему это могло бы привести. ▶

Что с ним можно сделать?

Стивен Бакстер

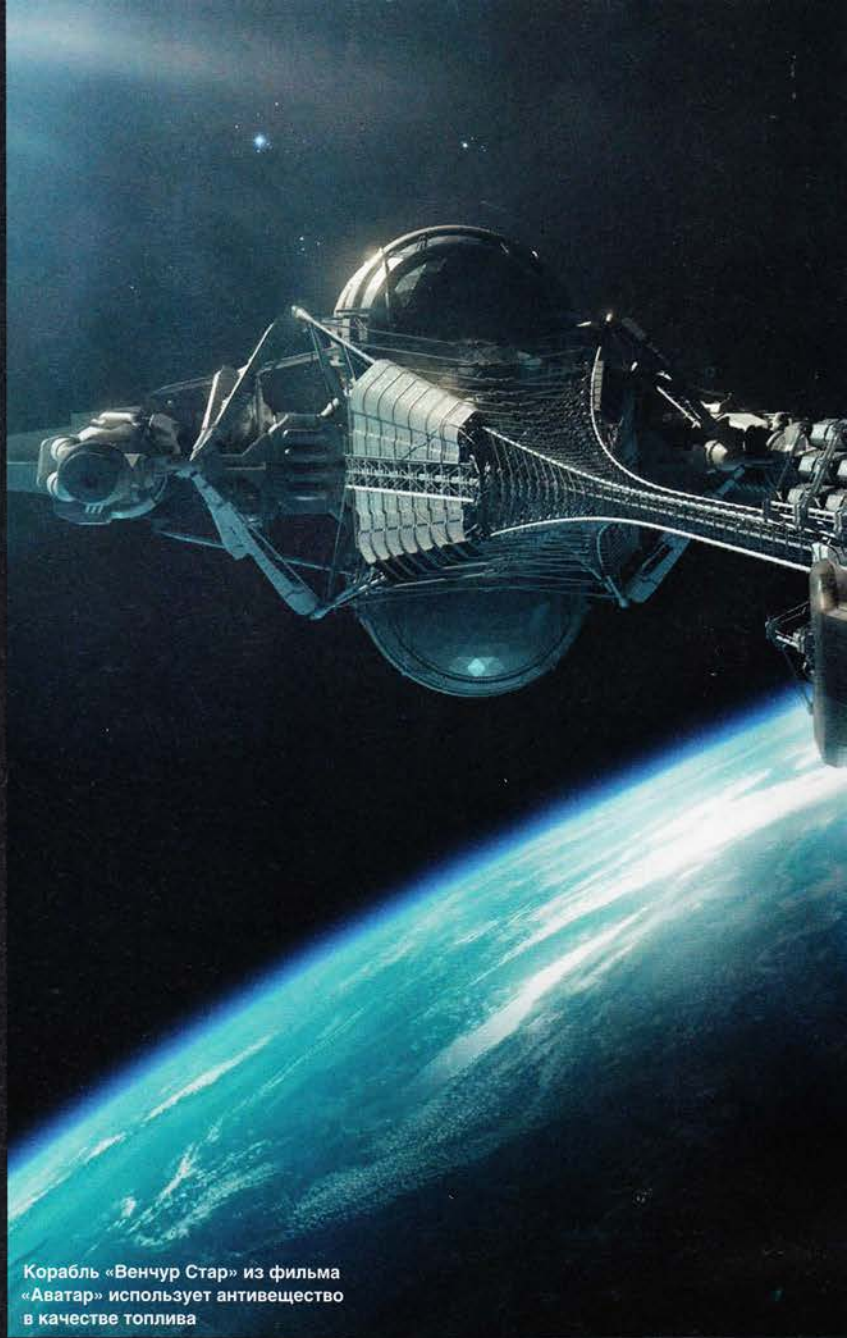


Известный писатель-фантаст Стивен Бакстер (Stephen Baxter) размышляет о возможном применении антивещества для межзвездных космических путешествий.

В фильме «Аватар» фигурирует фотонный звездолет «Венчур Стар» (Venture Star), работающий на антивеществе.

Ракетчикам антивещество кажется весьма привлекательным видом топлива по двум простым причинам. Во-первых, ракета с фотонным приводом была бы практически идеальной по величине удельного импульса. Ведь предельная скорость любой ракеты определяется главным образом скоростью истечения ее рабочего тела. Кислородно-водородное топливо шаттлов — одно из самых лучших возможных химических сочетаний — обеспечивает скорость истечения несколько километров в секунду, в то время как у идеальной ракеты она равна скорости света. Это теоретическая верхняя планка для скорости, и она примерно в сто тысяч раз выше, чем скорость истечения рабочего тела — водяного пара — из сопла двигателя шаттла. И антивещество может обеспечить такую скорость. Конечными продуктами аннигиляции вещества и антивещества становятся фотоны, которые и разлетаются со скоростью света. Конечно, это не позволит вашей ракете лететь со скоростью света, но можно сколь угодно приблизиться к этому пределу. Например «Венчур Стар» разогнался до 70% скорости света.

Всего грамм антивещества был бы эквивалентен бомбе, разрушившей Хиросиму



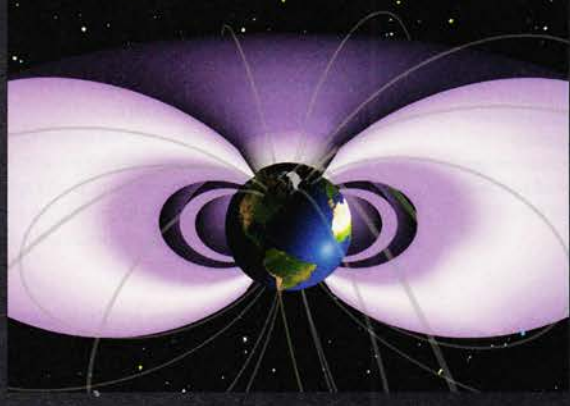
Корабль «Венчур Стар» из фильма «Аватар» использует антивещество в качестве топлива

Во-вторых, антивещество — невероятно эффективный источник энергии. Поскольку оно аннигилирует с веществом, вся масса топлива превращается в энергию; даже ядерные реакции на Солнце перерабатывают лишь десятые доли процента массы топлива. Один грамм антивещества может выделить больше энергии, чем десяток топливных баков шаттла.

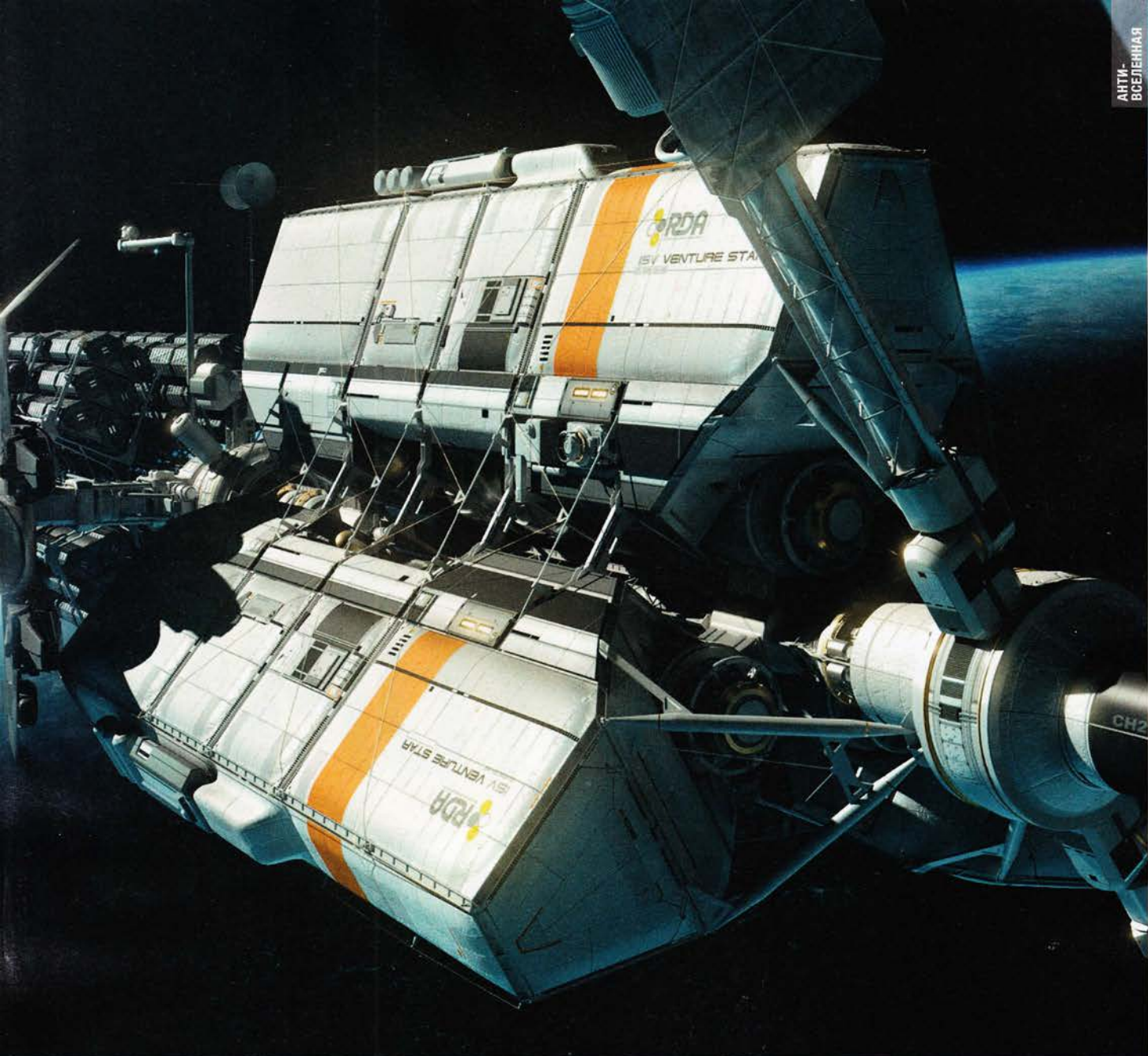
Но ракета на антивеществе — это огромная инженерная проблема. Первый концепт, основанный на аннигиляции позитронов с электронами, был предложен немецким инженером Ойгеном Зенгером (Eugene Sänger) в 50-х годах прошлого века. Проблема однако была в том, чтобы придать направление «выхлопу». Если бы он состоял из заряженных частиц, можно было бы магнитными полями направить их назад. Но поскольку у фотонов нет электри-

ческого заряда, не было и способа управлять ими (разве что с помощью какого-то идеального зеркала. — *Примеч. ред.*) В 1980-х годах физик Роберт Форвард (Robert Forward) предложил работоспособную конструкцию, основанную на протонах и антипротонах. Они аннигилируют в две стадии, порождая на первом этапе заряженные частицы (наряду с нейтральными), которые можно завернуть к хвосту ракеты с помощью магнитных полей.

Но всё равно практических трудностей остается море. Мы не знаем, как обращаться с большим количеством антивещества, причем «большое количество» — это даже не граммы (а меньше). Но современные ловушки Пеннинга удерживают лишь считанное число атомов. Не исключено, что решение будет найдено на пути развития технологии сверхпроводников. Они способны



Частицы антивещества были обнаружены в геомагнитном поле



генерировать мощные магнитные поля, однако нынешние сверхпроводники работают только при очень низких температурах, что делает их малоприспособными для поставленных задач. Возможно, удастся разработать вещества, сохраняющие сверхпроводимость при комнатной температуре. Им нашлось бы и другое применение: например, нам нужны большие магнитные «бутылки» для того, чтобы построить термоядерный реактор типа токамака.

И наконец, нам потребуется огромное количество антивещества. Чтобы достичь хотя бы доли скорости света, потребуется примерно столько же антивещества, сколько весит наш корабль. Масса «Венчур Стар» могла составлять сотни тонн. Откуда взять столько антивещества? В природе оно встречается исчезающе редко. Возможно, у нас появятся технологии, позволяющие

нарабатывать очень небольшое его количество. NASA изучает возможность использования крошечных добавок антивещества в качестве катализатора более привычных термоядерных реакций.

Можем ли мы производить антивещество? Да, но современному ускорителю элементарных частиц потребуются миллиарды лет, чтобы наработать один грамм! Однако Роберт Форвард считает, что фабрики, специально предназначенные для производства антивещества, а не для экспериментов в области ядерной физики, где оно возникает в качестве побочного продукта, могут быть намного более эффективными. А может быть, однажды мы построим чудовищных размеров ускорители вдоль лунного экватора.

Или быть может, мы решим проблему, научившись «добывать» антивещество. Недавно античастицы

были обнаружены в земном магнитном поле. В сверхмощном магнитном поле Юпитера электрический ток между планетой-гигантом и ее ближайшим крупным спутником Ио образует колоссальный естественный ускоритель частиц гораздо большего масштаба. Не исключено, что там-то и удастся извлекать антивещество.

Благодаря антивеществу наши энергетические возможности могут превзойти самые смелые мечты. Мы увидим взрывной рост промышленности, а масштабные геоинженерные проекты изменят земную среду обитания. Мы легко доберемся до планет, а потом и до звезд. Но мысль об использовании антивещества в качестве оружия вызывает такой ужас, что об этом не хочется даже и думать: менее 0,5 г антивещества было бы эквивалентно бомбе, разрушившей Хиросиму. ■