

С.М.Комаров, кандидат физико-математических наук

КРОТОВАЯ НОРА ВО ВСЕЛЕННУЮ



От того, что человек вышел в околоземный космос, звезды не стали ближе. Их разделяют чудовищные расстояния, по сравнению с которыми даже свет летит медленно, а теория относительности, положившая скорость света пределом для путешествий материальных тел, казалась бы, не оставляет никакой надежды.

Однако человеческое любопытство ничто не может остановить. Физики и так и эдак присматривались к уравнениям, описывающим Вселенную, и потихоньку у них начало складываться представление о том, что есть-таки обходной путь, которым можно быстро пробраться к далеким звездам. Самые свежие соображения высказали Ричард Обуса и Джеральд Кливер из Техасского университета Бейлора в статье, которую в феврале 2008 года опубликовал журнал Британского межпланетного общества. Рассказ об этом направлении исследований комментирует кандидат физико-математических наук из Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН С.В. Красников, ведущий отечественный специалист по проблеме. В частности, он рассмотрел один из возможных объектов для сверхсветовых путешествий, который теперь называют «трубой Красникова» (см. «Physical Review D», 1998, т. 57, № 8) — речь о ней пойдет ниже. Ему же принадлежит предложение называть весь класс объектов для быстрых путешествий словом «лаз», что соответствует английскому слову «shortcut».

НОРА В ПРОСТРАНСТВЕ

Типичным примером лаза служит кротовая нора. Этот объект соединяет между собой две области пространства, фактически сложенных, как согнутый пополам листок бумаги. Продолав дырку в обеих его половинках и вклеив в нее трубочку из свернутого в цилиндр пространства, по этой трубочке можно быстро перебраться с одного края листа на другой. Считается, что подобные объекты возникали при рождении Вселенной, когда пространство было очень сильно локально искривлено. Не исключено, что некоторые норы сохранились до наших дней. Обнаружив нору, можно попытаться в нее нырнуть (хотя бы

теоретически) и вынырнуть с другой стороны в совсем другом месте Вселенной. У фантастов это называется порталом, и за обнаружение одного ставят памятник. Правда, чаще всего никто не знает, куда портал приведет и как найти дорогу назад. Более того, неясен ответ не только на вопрос «куда?», но и «когда?» — если одна горловина норы движется, то склеиваемые ею точки пространства могут приобрести разные значения времени. В этом случае получается машина времени.

О создании кротовых нор и их использовании в качестве машины времени рассуждали многие физики. Одну из первых статей на эту тему в 1998 году в «Physical Review Letters» опубликовали Майкл Моррис, Кип Торн и Улви Юртсевер из Калифорнийского технологического института. Вот как они рассуждают о возможном способе создания кротовых нор. Предположим, что есть очень развитая цивилизация. Обладая не сравнимыми с нашими техническими возможностями, она могла бы использовать то обстоятельство, что в вакууме на уровне планковских размеров, то есть порядка 10^{35} м, кипит своеобразная квантовая пена, где постоянно появляются все возможные топологические конфигурации пространства. Если в этой пене найти фрагмент, строение которого соответствует кротовине, и вырастить его до макроскопических размеров, то есть растянуть соответствующую область пространства-времени на 35 порядков, то задача будет решена. Вопрос о том, как это делать, впрочем, не обсуждается.

В соответствии с теоремой о свойствах решений уравнений Эйнштейна (ее именуют «топологическая цензура»), для того, чтобы кротовую нору можно было пересечь, в определенном ее сечении должна находиться так называемая экзотическая материя. Ее главное свойство — отрицательная плотность энергии, она же способность расталкивать пространство, а не сжимать его, как это свойственно обычной материи. Из-за этого экзотическая материя обладает удивительным свойством — ее гравитационная (то есть проявляющаяся в законе тяготения) масса отрицательна. После того как в конце XX века было показано, что во всей Вселенной действует расталкивающая сила, которую называли «темная энергия», «космологический член», «лямбда-член», надежды на существование кротовин несколько усилились.

РАССУЖДЕНИЕ О ПУЗЫРЕ

Альтернативой кротовой норе служит «пузырь Алькубьерре». Его предложил Мигель Алькубьерре, работавший в то время в Университете Уэльса. Примечательно, что в его статье, которая была опубликована в 1994 году в журнале «Classical and Quantum Gravity» и без упоминания которой не обходится ни одна статья о перемещениях со сверхсветовыми скоростями, есть только четыре ссылки, и те на классические статьи по теории относительности и строению пространства-времени. То есть Алькубьерре фактически стал основателем исследований движения со сверхсветовой скоростью, и именно ему, если идея окажется воплощенной (на что надежды, правда, почти нет), благодарные потомки должны будут ставить памятник. Вот как рассуждает:

«Представим себе, что речь идет об инфляционной стадии Вселенной (она приходится на первые несколько миллионов лет после Большого Взрыва, когда расширение шло с ускорением. — Примеч. ред.), и рассмотрим относительные скорости удаления двух наблюдателей друг от друга. Очевидно, что если мы просто подсчитаем изменение разделяющего их расстояния за некий промежуток времени, то получим значение гораздо больше скорости света. Однако это не значит, что наблюдатели будут путешествовать со сверхсветовой скоростью: каждый из них движется внутри своего светового конуса. Огромная скорость удаления будет лишь следствием быстрого расширения пространства-времени. Кстати, это хороший пример того, как интуиция, основанная на специальной теории относительности, может приводить к заблуждениям, когда рассматривают динамическое пространство-время». Сейчас радиус сферы, которая удаляется от нас со сверхсветовой скоростью, то есть отправленный с Земли сигнал ее никогда не достигнет, насчитывает 4,74 гигапарсеков, при том, что современный радиус Вселенной оценивают в 13,7 гигапарсеков.

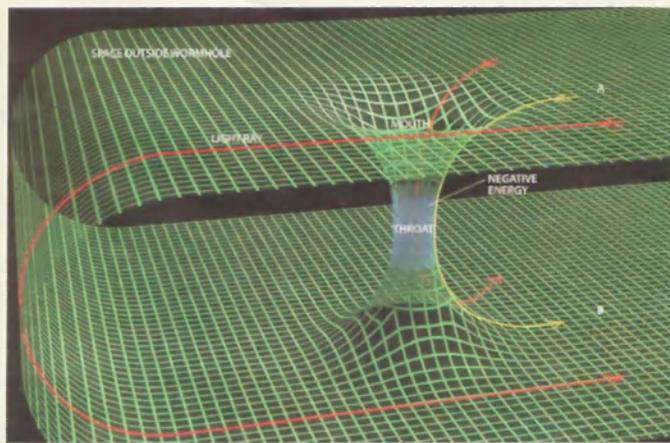
Из рассуждения Алькубьерре следует, что, обладая возможностью по своему желанию расширять или сжимать пространство-время, человек может соответственно удаляться или приближаться к выбранному объекту с какой угодно скоростью.

Чтобы проверить алгеброй гармонию своих рассуждений, Алькубьерре применил излюбленный прием специалистов по теории относительности, а именно — придумал пространство с особой метрикой. Этим словом физики определяют следующее понятие. Представим себе, что у нас есть поверхность, на которую нанесена сетка координат. Возьмем две точки на ней и попытаемся ответить на вопрос: каково расстояние между ними?

В 1994 году Мигель Алькубьерре предложил использовать для сверхсветового движения особый вид искривления пространства-времени.

В предложенной им метрике пространство плоско везде, кроме стенок некоторого пузыря, который движется быстрее света во внешнем пространстве Минковского. При этом оказывается (за счет необычной геометрии стенок пузыря), что мировая линия центра пузыря остается тем не менее времениподобной. Т. о. состоящий из обычной материи пилот может, сидя в центре подобного пузыря, двигаться быстрее света.

Среди ряда теоретических трудностей, с которыми столкнулась эта идея, одна состоит в необходимости для такого двигателя наличия областей пространства с отрицательной плотностью энергии («экзотической материи»). На сегодняшний день экспериментально подтвержден только один пример такой субстанции — это вакуум Казимира, получение которого в макроскопических масштабах для создания двигателя Алькубьерре было рассмотрено Чарльзом Риджли



Двумерная кротовая нора

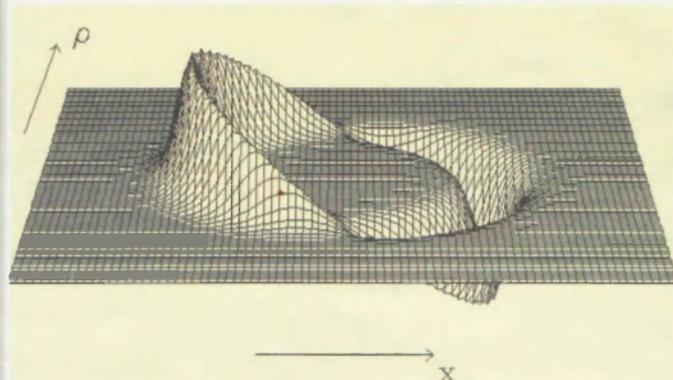
Правило, которое позволяет определить ответ, а также задать уравнение движения по любой кривой, и есть метрика. В обычной жизни мы пользуемся метрикой Евклида — расстояние есть корень из суммы квадратов разностей координат, которые отсчитывают вдоль трех взаимно перпендикулярных осей.

Характерная черта метрики Алькубьерре — наличие пузыря. Посредине плоского пространства есть область, вокруг которой пространство деформировано. Причем с точки зрения наблюдателя, расположенного внутри этого пузыря, спереди по направлению движения пространство в тонком слое сильно сжато, а сзади — наоборот, сильно расширено. Анализ закона движения в пространстве с такой метрикой показывает, что пузырь будет двигаться с какой угодно скоростью, причем скорость эта прямо пропорциональна толщине стенки пузыря и степени деформации пространства в ней. При этом появляется возможность совершенно невиданного в механике дела — безопорного движения: двигатель на деформированном пространстве перемещается сам по себе, не расходуя рабочее тело и ни от чего не отталкиваясь.

Замечательное свойство всей этой конструкции состоит в том, что космический корабль, помещенный внутри пузыря, не испытает никаких нагрузок, хотя по ее границам действуют чудовищные приливные силы, способные разорвать любой материальный объект. Время внутри пузыря течет так же, как и снаружи, у стороннего наблюдателя. Более того, в каждой точке корабля, коль скоро он находится внутри пузыря и не соприкасается с его границами, время будет течь одинаково, то есть экипаж избежит тех приключений, которые выпали Иону Тихому, попавшему по воле Станислава Лема в зону темпоральных вихрей. В общем,

путешественник на этом корабле имеет все шансы слетать к далекой звезде и вернуться обратно за сколь угодно короткое время, если ему позволят энергетические ресурсы, речь о которых пойдет дальше.

«На самом деле это не совсем так, — рассказывает С.В. Красников. — Одна из главных проблем пузыря Алькубьерре состоит в том, что когда решено послать с его помощью экспедицию, скажем, к альфе Центавра, его, строго говоря, строить уже поздно. Более того, сам корабль не может создавать вокруг себя пузыря: он должен быть создан заранее. Проблема вот в чем. Посмотрите на передний край пузыря. Он сжимает пространство, то есть в этой стенке расположена экзотическая материя с отрицательной плотностью энергии. Если пузырь полетит со сверхсветовой скоростью, то окажется, что расположенная на его границе материя тоже движется со сверхсветовой скоростью. Это не то



На рисунке, выполненном самим Мигелем Алькубьерре, показано возмущение пространства-времени, которое будет создавать его двигатель. На гребне этого возмущения корабль движется в направлении, указанном стрелкой. Перед кораблем пространство сжимается, делая доступными самые дальние звезды, позади расширяется, унося корабль все дальше от Земли

чтобы запрещено, но равносильно использованию тахионов — частиц, летящих со сверхсветовой скоростью. Однако сама возможность их существования не доказана, а если окажется, что такие частицы существуют, то и пузырь строить не понадобится. Значит, экзотическая материя, пригодная для создания пузыря, должна быть заранее распределена по всему пути следования корабля. Поэтому пузырь Алькубьерре, если его удастся создать, подойдет лишь для быстрых перемещений по уже созданным трассам. А создавать их придется с помощью обычного медленного транспорта.

Модификация пузыря Алькубьерре — пузырь Жозе Натарио из португальского Высшего технического института. Этот пузырь не создает впереди и позади себя областей сильного сжатия и растяжения. Вся деформация сконцентрирована внутри пузыря и организована таким образом, что растяжение в одних направлениях компенсируется сжатием в других. Он решает некоторые проблемы пузыря Алькубьерре, однако и в пузыре Натарио тоже должна быть экзотическая материя.

Альтернативой служит труба Красникова. В ней предложена другая хитрая метрика, и благодаря ей корабль может создавать трубу по мере движения. А воспользуется он ею для движения со сверхсветовой скоростью на обратном пути. В результате полет выглядит следующим образом. Возьмем за цель опять-таки альфу Центавра. Двигаясь с субсветовой скоростью, корабль будет лететь до нее три с лишним тысячи лет по земным часам. Из-за лоренцовского сокращения времени, однако, на корабле пройдет лишь несколько дней. Затем, воспользовавшись созданной во время полета трубой, корабль полетит назад не только в пространстве, но и во времени и вернется примерно через год после старта. При этом не возникает никаких нарушений причинности, не образуются никакие контрамоты, корабль нигде не встречается сам с собой. В общем, никаких петель времени, что не может не радовать.

Гипотетические частицы тахионы, в случае их существования, могут двигаться быстрее света. Они не могут передавать информацию, иначе их наличие противоречило бы принципу причинности. В толковании специальной теории относительности, если считать энергию и импульс действительными числами, тахион описывается мнимой массой. Скорость тахиона не может быть меньше скорости света, поскольку при этом энергия бы бесконечно увеличивалась.

В некоторых вариантах теории струн, в спектре масс частиц появляется тахион. Однако такие модели, как правило, признаются нефизическими, что является основанием для модификации соответствующей теории.

Теоретически рассматривалась также возможность наличия сверхсветовых скоростей у некоторых видов нейтрино.

в него помещать корабль. Проблему с большим количеством экзотической материи, которая нужна для создания пузыря, авторы статьи не пытались решить. Пафос был в другом в попытке установить зависимость предельной скорости корабля от его массы. По-моему, эта попытка была неудачной», — говорит С.В. Красников.

Впрочем, идеи о том, как сократить массу экзотической материи, которая нужна для организации пузыря, имеются. Один из способов предложил бельгиец Крис ван ден Брук из Католичес-

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Необходимость использовать экзотическую материю — Один из серьезных недостатков пузыря Алькубьерре и Натарио. Расчет показывает, что ее количество весьма велико: для создания движущегося со скоростью света пузыря первого типа, способного вместить метровый объект, масса такой материи должна составлять порядка 10^{62} килограмм, что превышает (если брать это значение по модулю) массу Вселенной.

Однако анализ, который провели португалец Франсиско Лобо из Лиссабонского университета и новозеландец Мэтт Виссер из Веллингтонского университета Виктории в своей статье, опубликованной в журнале «Classical and Quantum Gravity» за 2004 год, показал, что оба пузыря обладают отрицательной энергией, причем независимо от скорости движения. Иначе говоря, причина в самой по себе процедуре деформации пространства. Впрочем, при малых скоростях есть шанс эту энергию компенсировать. Для этого надо вспомнить, что у космического корабля есть масса. И у Алькубьерре, и у Натарио корабль внутри пузыря, строго говоря, отсутствует.

Лобо и Виссер рассчитали пузырь с кораблем для малых скоростей, когда можно в соответствующих уравнениях пренебречь подавляющим большинством членов. Главный физический смысл полученного результата состоит в том, что, как было предложено еще Эйнштейном сто лет тому назад, масса сжимает пространство-время. Вполне естественно, что помещение массивного корабля в растянутое пространство компенсирует это растяжение и, с точки зрения стороннего наблюдателя, деформация внутри пузыря может оказаться равной нулю. Правда, для выполнения этого условия изначальное растяжение внутри пузыря должно быть совсем небольшим. А поскольку, как было сказано выше, скорость движения прямо пропорциональна этой деформации, двигаться такой пузырь будет чрезвычайно медленно и заявленной цели — быстрого перемещения к далеким звездам — достичь не сможет.

«На самом деле в этой статье есть серьезный подвох. Ход рассуждения такой. Есть пузырь. Можно написать метрику. А потом сделать «естественное» предположение, что надо просто приравнять, взяв их по модулю, массы корабля и стенок пузыря. На самом деле это совсем не естественное предположение, потому что пузырь Алькубьерре нельзя создать вокруг корабля; его надо создавать заранее, а потом уж

кого университета Левина. В статье, опубликованной в журнале «Classical and Quantum Gravity» за 1999 год, он предлагает взять пузырь Алькубьерре микроскопического размера, а внутри него надуть макроскопический пузырь, в котором можно разместить большой объект. Если предположить, что способ вольного обращения с пространством-временем, допускающий его многочисленные деформации, найден, то в таком предложении нет ничего фантастического. Для стороннего наблюдателя все, что происходит внутри пузыря ван ден Брука, не представляет интереса: он видит лишь микроскопический пузырь Алькубьерре и соответственно обнаруживает, что его отрицательная энергия незначительна. По оценкам С.В. Красникова, опубликованным в журнале «Physical Review D» за 2003 год, пузырь ван ден Брука можно удержать от схлопывания, поместив в его горловину всего лишь миллиграммы экзотической материи, причем независимо от того, сколь велика внутренняя область, занятая пассажиром.

ДЕФОРМАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

В принципе пространство для создания пузыря Алькубьерре можно деформировать, распределив в его стенках определенным образом экзотическую материю. В упомянутой в начале статьи Ричарда Обуса и Джеральда Кливера предпринята попытка получить то же самое за счет манипуляций с дополнительными измерениями. Напомним, что дополнительные измерения возникли из желания ответить на несколько неприятных вопросов вроде: отчего мощность гравитационного взаимодействия оказывается существенно ниже, чем у трех остальных — слабого, сильного и электромагнитного? Или — почему расчетная плотность энергии вакуума на 119 порядков (!) больше, чем измеряемая? Одно из решений этой задачи состоит в том, что гравитация, и только она, распространяется в другие, скрытые измерения, а если бы померить ее и там, то все взаимодействия оказались бы сравнимы по своей силе. Вопрос о существовании этих измерений столь сильно волнует физиков, что их поиск будет одним из главных экспериментов на Большом адронном коллайдере.

Среди множества следствий наличия во Вселенной скрытых измерений есть и такое, весьма интересное: уменьшение размера одного из них способно породить увеличение размеров всех остальных. В частности, об этом подробно рассуждали Алан Ходос и Стивен Детвейлер из Йельского университета в статье, опубликованной в «Physical Review D», 1980, т. 21. Они показали, что в начале времен Вселенная, обладающая одним лишним измерением, могла быть фактически одномерной, а затем, по мере уменьшения размера этого измерения, остальные три выросли до нынешних размеров. А то самое, исходное, сократилось до размеров порядка 10^{-33} м. Правда, оценки, полученные из гравитационных соображений, дают размер на 27 порядков больший, порядка микрона.

В 1995 году Яна Левина из Канадского института теоретической астрофизики вернулась к этому вопросу и показала, что изменениям размеров скрытых измерений можно вполне объяснить развитие пространства в нашей Вселенной, в частности, и начальную инфляцию, и последующее замедление расширения. Дополнительные измерения служат одним из следствий теории суперструн (справедливость которой, впрочем, как и наличие самих измерений, никто пока не доказал, а размер последних — доподлинно не измерил). И в рамках этой теории появляется слабая надежда на управление размером измерений: согласно воззрениям ее адептов, именно струна, «накрутившись» на измерение, определяет его размер. Струна при всей своей загадочности — материальный объект, и есть небольшая надежда, что, как-то воздействуя на нее, можно менять ее упругость, вызвав тем самым локальное изменение размера скрытого измерения и соответственно расширение либо сжатие реального



В модели американских ученых, описанной в статье «Putting the «Warp» into Warp Drive», опубликованной в базе данных Корнельского университета, для строительства модели ворм-двигателя используется дополнительное измерение, манипуляции с которым теоретически ведут к искривлению пространства-времени и созданию необходимого «пузыря».

Исследователи подсчитали, что при этом затраты энергии для достижения сверхсветовой скорости космическим кораблем объемом 1 тыс. кубических метров составят 10^{45} Джоулей, что сравнимо со значением энергии покоя Юпитера

пространства-времени. В общем, построить-таки вокруг космического корабля пузырь Алькубьерре.

Способ построения пузыря Алькубьерре, который предлагают Обуса и Кливер, чрезвычайно экзотичен. Совершенно непонятно, как можно изменять параметры струны, ведь это фундаментальная константа. Более того, в тензоре Эйнштейна, который описывает деформацию пространства, есть десять компонент. А изменение размера измерения дает лишь одну переменную. Где взять остальные девять? Когда Алькубьерре рассказывал о своей идее, он решал совсем другую задачу: показать, что нечто экзотическое — полет со сверхсветовой скоростью — в принципе не противоречит действительности. Тот факт, что для его существования нужна экзотическая материя, гораздо менее экзотичен, чем управление размером скрытых измерений.

Если же все-таки окажется, что измерениями управлять можно, сколько энергии потребуется на создание пузыря? Вот как Обуса и Кливер пытаются ответить на этот вопрос.

Если предположить, что размер корабля 10 метров, а операция по деформации пространства проводится над всем объемом заключающего его пузыря, то потребуется 10^{36} ГДж энергии. Такое ее количество может выделиться при аннигиляции планеты, подобной Юпитеру, нельзя сказать, что это мало, но в то же время это гораздо лучше, чем потребность сжечь всю Вселенную.

А что будет, если пространство деформировать не по всему объему пузыря, но только в его тонкой стенке? Минимальная толщина стенки — планковская длина, 10^{-35} м. Объем стенки сферического пузыря диаметром 10 м тогда составит 10^{-32} м. На деформацию такого объема пространства со скоростью света надо будет затратить 100 ГДж энергии. Для выработки этого количества энергии уже не надо устраивать катастрофу космического масштаба: можно вполне обойтись имеющимися ресурсами.

