



АСТРОФИЗИКА

ЧТО МОЖНО ДОБЫТЬ ИЗ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ?

Адам Браун

Представим себе, что цивилизация будущего задастся целью добыть энергию из черной дыры. Первым шагом будет постройка космического лифта, существование которого может противоречить известным физическим законам

ОБ АВТОРЕ

Адам Браун (Adam Brown) — физик-теоретик Стэнфордского университета, занимается теорией черных дыр и Большого взрыва.



Однажды наше Солнце погаснет. Исчерпается топливо, ведущее ядерные реакции. От неба будет веять только холодом. Если Земля и сможет пережить такой космический катаклизм, то человечество будет обречено на жизнь в вечной зиме. Для существования в таких сложных условиях станут необходимы альтернативные источники энергии. Логичным (с точки зрения научно-фантастической литературы. — Примеч. пер.) решением представляется последовательное использование сначала ресурсов самой Земли, потом Солнечной системы и, наконец, всех звезд в галактиках в видимой части Вселенной. А когда уже не останется ничего, чтобы сжечь, человечество, очевидно, обратит внимание на одни из последних запасов энергии, заключенные в черных дырах. Но есть ли возможность добыть энергию из таких объектов и спасти человечество?

Похоже, план не сработает. Рассмотрим вопрос добычи энергии из этих экзотических объектов в свете теории квантовых струн совместно со старой идеей космического лифта.

Напрасная надежда

На первый взгляд, извлечение чего-либо из черной дыры, в том числе энергии, кажется совершенно невозможным. Черные

дыры окутаны горизонтом событий — воображаемой сферической поверхностью со свойствами мембраны, из-под которой не может вырваться даже свет. Все, что попадает внутрь этой сферы, обречено. Таким образом, все приспособления, которые могли бы попытаться разрушить черную дыру и извлечь из нее энергию, должны быть сами разрушены, падая под горизонт событий.

Например, бомба, брошенная в черную дыру, не приблизит ее уничтожения, а даже наоборот, приведет к увеличению массы черной дыры на массу, равную массе бомбы. То, что попадает внутрь черной дыры, никогда не выходит наружу: ни астероиды, ни космические корабли, ни даже свет. По крайней мере, мы



привыкли так думать. Однако в 1974 г. Стивен Хокинг (Stephen Hawking) теоретически доказал, что такое понимание черной дыры не совсем верно. Основываясь на более ранних идеях Якова Бекенштейна (Jacob Bekenstein), Хокинг показал, что черная дыра может испускать небольшое количество излучения. Так, несмотря на то что попав внутрь черной дыры, любое тело будет уничтожено, частичка его энергии все же сможет уйти наружу из-под горизонта событий.

! ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Зная, что время жизни нашего Солнца ограничено несколькими миллиардами лет, человечество должно отыскать другие источники энергии. На первый взгляд, очень хорошим кандидатом представляется черная дыра, наполненная энергией, поглощаемой ею из окружающего пространства.
- Для добычи энергии из черной дыры можно поставить мысленный эксперимент космического лифта (идея которого принадлежит инженеру из Санкт-Петербурга Ю.Н. Арцутанову (1960). — Примеч. пер.). Он ярко описан Артуром Кларком в научно-фантастическом романе «Фонтаны рая». Применительно к черной дыре это будет означать возможность черпать энергию ее теплового излучения.
- Лифт представляет собой трос с коробкой, которая опускается почти к горизонту событий черной дыры и добывает ее фотоны, излученные согласно механизму Хокинга. Однако даже самый прочный материал, который теоретически можно использовать для такого троса (фундаментальные струны), оказывается недостаточно крепким, чтобы извлечь что-то энергетически значимое из областей вблизи горизонта событий черной дыры.

Дело в том, что уходящая от черной дыры энергия подчиняется законам квантовой теории. Один из знаковых феноменов этой теории заключается в том, что частицы иногда способны преодолевать запрещенный для них энергетический барьер, «туннелировать». Иногда частица, расположенная по одну сторону барьера, может вдруг оказаться по другую его сторону. Никогда не пробуйте проверить такой трюк на себе: бросившись на стену, вы вряд ли окажетесь по другую ее сторону. А вот микроскопические частицы частенько такое проделывают.

Квантовое туннелирование — это процесс, который позволяет альфа-частице (ядро гелия) покинуть ядро радиоактивного урана, и еще это процесс, обеспечивающий «излучение Хокинга» для черной дыры. Применяя к искривленному пространству-времени, математически можно показать, что частица преодолевает горизонт событий, туннелируя сквозь него наружу.

Казалось бы, поскольку черная дыра теряет энергию, есть надежда как-то ее заполучить. Однако вне зависимости от того, как именно будет извлекаться энергия, при детальном рассмотрении этой задачи все оказывается не так просто.

Самое очевидное решение — подождать достаточно долго. Спустя какое-то время черная дыра должна «испарить» почти всю свою энергию, отдавая в окружающее пространство фотон за фотоном. С каждой частичкой потерянной энергии черная дыра становится все меньше и меньше. *(Вопрос о финальной стадии испарения черной дыры остается открытым, поскольку ее полное исчезновение может приводить к ряду квантовых парадоксов, в том числе парадоксу потерянной информации. — Примеч. пер.)* Можно привести аналогию с чашкой кофе, которую вам очень хочется

выпить, но поверхности налитого кофе касаться категорически нельзя: остается только подождать, пока кофе испарится, а потом подышать его парами.

Выловить энергию таким образом можно, но вопрос в том, как долго придется ждать. Черная дыра невероятно тусклая: обладая солнечной массой, она светится с температурой около 60 нК. До 80-х гг. прошлого века не было известно, как получить нечто настолько холодное в лаборатории. Чтобы испариться полностью, черной дыре с массой, равной массе Солнца, понадобилось бы время, на 57 порядков больше возраста нашей Вселенной. Вообще говоря, время жизни черной дыры пропорционально кубу ее массы. Хотелось бы как-то ускорить процесс добычи энергии из черной дыры, чтобы суметь ею воспользоваться в разумные промежутки времени.

Во-первых, вовсе не обязательно ожидать, когда ушедшая от черной дыры частица достигнет бесконечности. Более того, фактически ни одна частица на бесконечность и не уйдет — она все равно будет захвачена черной дырой. Если бы удалось собрать, «отнять» у черной дыры частицы, которые туннелировали сквозь горизонт, но еще не были захвачены этой черной дырой снова, то процесс извлечения энергии протекал бы гораздо быстрее.

Для того чтобы понять, как можно «отвоевать» фотоны, нужно подробно рассмотреть силы, действующие вблизи черной дыры. Важно отметить, что фотоны движутся не по прямым линиям. Представьте лазерный луч, испущенный в непосредственной близости от горизонта событий. Для того чтобы уйти от черной дыры, луч должен быть направлен строго вертикально — даже при малейшем отклонении луч света начнет путь вокруг черной дыры и спустя какое-то время будет неизбежно поглощен.



Может показаться странным, что вращение нарушает планы по «эвакуации» частицы. Орбитальная скорость как раз удерживает тела — например, спутники — на орбите, предотвращая их падение. Однако вблизи горизонта событий черной дыры ситуация ровно обратная: орбитальная скорость не дает телу уйти на бесконечность. Этот



эффект — следствие общей теории относительности (ОТО). И масса, и энергия тела подчиняются гравитационным силам, т.е. не только масса покоя, но и его орбитальная кинетическая энергия. Чем ближе к черной дыре (более точно — с расстояния в полтора радиуса черной дыры), тем гравитационное притяжение орбитальной кинетической энергии будет сильнее центробежного отталкивания. С еще более короткого расстояния увеличение угловой скорости приведет только к более быстрому падению в черную дыру.

Чем ближе вы оказываетесь к черной дыре, тем горячее становится, и это тепло переносит энергию



Вышесказанное означает, что если вы медленно приближаетесь к горизонту черной дыры, то вам будет становиться все жарче. Вы будете не только погружены в фотоны, испущенные согласно механизму Хокинга, но и испытывать воздействие тех фотонов, которые так и не смогут уйти на бесконечность. Таким образом, черная дыра окутана некоей тепловой атмосферой, которая способна переносить энергию. Тот факт, что некоторая энергия оказывается снаружи от горизонта событий, наводит на мысль о возможности соорудить «шахту» по добыче энергии из этой атмосферы: опустить некую емкость к черной дыре (но не под горизонт), собрать горячий газ и поднять его «наверх». Часть фотонов, согласно механизму Хокинга, ушла бы от черной дыры самостоятельно, но остальная часть попала бы со временем в черную дыру, если бы не вмешалось наше устройство по захвату и поднятию их подальше от горизонта. После того как емкость с горячим фотонным газом будет отведена на достаточное расстояние от черной дыры, не составит труда транспортировать его

на Землю: просто взять на борт ракеты или преобразовать в лазерный луч и направить в желаемом направлении.



В качестве аналогии вернемся к примеру с чашкой кофе. Описываемая процедура похожа на сдувание с чашки горячего пара. Большая часть этого водяного пара без должного управления снова окажется в чашке, но равномерное сдувание со всей поверхности приведет к тому, что пар не вернется в чашку. Как



следствие получаем, что, лишая черную дыру тепловой атмосферы, мы сможем довольно быстро ее исчерпать за промежуток времени, пропорциональный массе дыры, а не ее кубу, как в случае испарения.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту, идея такого лифта нереализуема. Проблема таится не в сложных рассуждениях в рамках квантовой теории или квантовой гравитации. Для того чтобы изъять атмосферу от черной дыры с помощью космического лифта, необходимо опустить трос почти к горизонту событий, однако технологически невозможно создать достаточно крепкий трос для такого подъема.

Лифт в небо

Космический лифт — это сооружение будущего, описанное в научно-фантастическом произведении Артура Кларка «Фонтаны рая» (1979). Оно представляет собой кабину с тросом, опущенные из космоса к поверхности Земли. В отличие от небоскреба, устойчивость верхних этажей которого обеспечивают нижние этажи, каждый последующий сегмент космического лифта служит опорой тем, которые расположены ниже. Верхний конец троса приделан к огромной массе, медленно движущейся по орбите выше геостационарной. Орбитальная масса тянет трос «вверх», придавая устойчивость всей конструкции. Нижний конец троса опущен почти к самой поверхности — плавает возле нее, как будто подчиняясь магии, хотя на самом деле просто под воздействием компенсирующих друг друга сил. Как замечал сам Кларк, достижения высокотехнологической цивилизации на первый взгляд неотличимы от волшебства.

Технологическая суть заключается в существенном упрощении подъема грузов с поверхности планеты на орбиту. Отпадает необходимость в использовании опасной, малоэффективной и выбрасывающей большое количество отходов ракеты, которая вынуждена поднимать прежде всего топливо для себя самой. Вместо этого можно было бы приделать к тросу электрический

лифт. Стоимость поднятия груза на низкую орбиту вместо десятков тысяч долларов будет равняться цене только электрической энергии, т.е. составлять всего несколько долларов. Путешествия в космос будут стоить как поездки в метро.



Технологические трудности при построении космического лифта огромны. Одна из самых важных проблем — подбор материала для троса. Идеальный трос должен быть одновременно и прочным, и легким — настолько прочным, чтобы не растягиваться и не рваться при транспортировке грузов, и настолько легким, чтобы не давить верхними сегментами на нижние. Сталь далеко не так прочна, как требуется. Чем выше, тем каждый сегмент стального троса должен становиться все толще и толще, чтобы удерживать как собственный вес, так и вес той части троса, которая находится ниже этого сегмента. Вблизи поверхности Земли трос должен удваивать свою толщину каждые несколько километров, в итоге задолго до того, как трос достигнет геостационарной орбиты, он станет непрактично толстым.



Строительство космического лифта вокруг Земли с имеющимися материалами технологического уровня XIX в. невозможно. Однако материалы века XXI обнадёживают. Углеродные нити, длинные соединения углерода, расположенные в гексагональной сотовой решетке, которые в тысячу раз прочнее стали, — вот кандидаты для построения космического лифта. Такой проект, безусловно, обошелся бы во многие миллиарды долларов, потребовал бы умения «прясть» углеродные нити длиной в десятки тысяч километров, однако с точки зрения теоретической физики в такой структуре нет ничего принципиально невозможного: физические законы разрешают такую структуру, остальное же, как говорится, дело техники и финансирования. Точно так же теоретически решена и задача создания термоядерной электростанции, хотя до сих пор мы не видели ни одной — кроме нашего Солнца.

Лифт для черной дыры

Возвращаясь теперь к исходной задаче построения космического лифта у черной дыры, отметим, что эта задача гораздо более сложна, чем то, о чем говорилось у Артура Кларка. Из-за большего напряжения гравитационного поля то, что пригодно для Земли, становится совсем не пригодным для черной дыры.

Даже при использовании в качестве троса сверхпрочной и сверхлегкой углеродной нити гипотетический космический лифт должен обладать невозможными даже с теоретической точки зрения свойствами. Так,

опустившись в окрестность горизонта событий черной дыры, трос должен быть настолько тонким, что даже один излученный фотон его разрушит. Вдали же от черной дыры трос должен быть настолько толст, что сожмется под воздействием собственной гравитации и станет черной дырой.

Такой результат, полученный математическим расчетом для углеродной нити, очевидно, исключает этот материал. С одной стороны, подобно тому, как за бронзовым веком последовал железный, так и за эпохой использования стали должно последовать время сверхпрочных углеродных соединений. Таким образом, человечество вправе рассчитывать на изобретение все более прочных и легких материалов. С другой стороны, прогресс не может продолжаться вечно. Существует конечный, устанавливаемый законами природы предел технологических возможностей — в частности, на отношение прочности растяжения тела к его весу. Этот предел — следствие широко известной формулы Альберта Эйнштейна $E = mc^2$.

Величина натяжения троса характеризует, сколько энергии нужно затратить, чтобы его растянуть. Чем больше натяжение, тем больше энергии нужно, чтобы растягивать его. Например, эластичная резинка обладает натяжением потому, что для того, чтобы ее растянуть, нужно затратить энергию по перестановке ее молекул. Если молекулы легко (т.е. с небольшими затратами энергии) поддаются перегруппировке, то натяжение мало. Если для перегруппировки молекул требуется много энергии, то натяжение велико. Вместо того чтобы менять местами структурные элементы (молекулы) троса, мы можем просто прикрепить к его концу уже готовый сегмент, обладающий нужными свойствами. Энергетические затраты для такой процедуры

эквивалентны энергии, содержащейся в массе нового сегмента троса согласно формуле Эйнштейна: энергия равна массе нового сегмента троса, умноженной на квадрат скорости света.

Рассмотренный способ удлинить трос энергетически очень затратен, но зато безотказен. Этот способ позволяет определить максимально возможное количество энергии для растяжения троса и, таким образом, максимально возможное натяжение самого троса. Натяжение никогда не может быть больше массы на единицу длины, умноженной на квадрат скорости света. Два троса, скрепленные в один, окажутся в два раза прочнее, но и в два раза тяжелее — следовательно, отношение прочности к весу не изменится.

Фундаментальный предел на натяжение материалов оставляет, тем не менее, много свободного пространства для разнообразных технологических решений. Дело в том, что этот предел в сотни миллиардов раз выше, чем та прочность, которой обладает сталь, и в сотни миллионов раз сильнее, чем возможности углеродных нитей. Но все же до бесконечности улучшать технологические свойства материалов нельзя. Подобно тому как невозможно разогнать обладающее массой тело до сверхсветовой скорости, усилия человечества по созданию сверхпрочных материалов ограничены формулой $E = mc^2$.

Однако существует гипотетический объект, который в точности достигает предела, — и это самый прочный материал из всех возможных. Этот материал никогда не был получен в лабораториях. Одни физики сомневаются, существует ли он вообще, а другие посвящают его изучению всю жизнь. Самый прочный природный трос называется струной. Изучают ее специалисты теории струн, полагая этот объект фундаментальным кирпичиком всей материи. В применении к задаче

космического лифта нас интересует не фундаментальность струны, а ее натяжение.

Струны прочны. Секция троса, сделанная из струн таких же длины и веса, как у шнурка ботинка, может выдержать Эверест. Жесткие технологические вызовы требуют столь же жестких материалов, поэтому если человечество захочет построить космический лифт вблизи черной дыры, то кандидатов лучших, чем струны, не найти. Если такой лифт можно реализовать в принципе, то только с помощью струн, а если и струны не помогут, то можно считать, что черные дыры в полной безопасности: никто никогда не сможет у них ничего отнять.

Однако оказывается, что, несмотря на феноменальную прочность струн, их прочности все-таки недостаточно. Скорее всего, струны всего лишь очень близки к желаемым характеристикам. Окажись их прочность чуть-чуть больше расчетной, и космический лифт даже вблизи черной дыры стал бы теоретически возможен. Окажись прочность чуть меньше — и проект стал бы безнадежен, потому что струна сломалась бы под действием собственного веса. Свойства струн таковы, что сделанный из них трос может быть опущен к черной дыре и не разорвется, но вот ничего поднять он уже не сможет.

Таким образом, получается, что законы природы защищают черную дыру от изъятия из нее энергии. Человечество ограничено в технологических возможностях, в характеристиках строительных материалов. Хотя космический лифт и может достичь тепловой атмосферы черной дыры, но ничего взять он уже не способен. Поскольку прочность струн ограничена, единственное, на что можно скромно рассчитывать с их помощью, — это на извлечение ограниченного количества энергии из разреженной верхней тепловой атмосферы черной дыры, уменьшив длину троса.

Такая скромная фотонная «диета» оказывается немногим лучше описываемого ранее решения просто подождать испарения черной дыры. Время жизни черной дыры пропорционально массе в третьей степени, так же как и время испарения. «Утаскивая» по фотону из верхней разреженной тепловой атмосферы черной дыры, мы совсем чуть-чуть сократим время ее жизни, а промышленной добычи энергии добиться не сможем. Голодной цивилизации, жаждущей мощных энергетических запасов за разумное время, несколько фотонов ничем не смогут помочь.

Тот факт, что скорость постоянна и не превышает строго определенного предела, губит на корню замыслы человечества по освоению дальнего космоса. Действительно, во-первых, мы не можем путешествовать быстрее света; во-вторых, невозможно извлекать энергии больше, чем масса, умноженная на квадрат скорости света; и, наконец, попытавшись обратиться за дополнительными энергетическими ресурсами к черным дырам, мы снова наталкиваемся на непреодолимое ограничение. Поскольку трос невозможно сделать прочнее, чем квадрат скорости света, умноженный на массу единицы длины троса, то нам не суждено попить за счет энергии черной дыры.

Когда наше Солнце погаснет, человечество погрузится в вечную зиму. Исполненное отчаяния, оно может обратиться к великому энергетическому кладу, который содержится в тепловой атмосфере черной дыры, цепляясь на свой страх и риск за эту последнюю надежду. Слишком рьяно и слишком глубоко прорываясь к ее недрам, человечество, возможно, только ускорит катастрофу. Не мы зачерпнем энергию черной дыры, но черная дыра поглотит всех нас без остатка. Зима будет очень холодной. ■

Перевод: О.С. Сажина