



Прочти и передай другому!

ФОТОННЫЕ СФЕРЫ

1. Подлетая к чёрной дыре.

В прошлом номере «Тени» было рассказано о том, как ведёт себя время при движении объекта (а ещё интереснее – субъекта) вблизи горизонта событий модельной чёрной дыры (невращающейся, шварцшильдовской) и более реальной вращающейся, керровской дыры, с которыми можно реально столкнуться в окружающем космосе.

С точки зрения того, кто из безопасного далёка смотрит на такого отчаянного субъекта, тот будет замедляться по мере приближения к горизонту. А с точки зрения самого субъекта вся остальная Вселенная будет ускоряться, и при определённых условиях субъект сможет заглянуть в будущее. Правда, совсем на чуть-чуть и ценой своей жизни.

Газетный формат жёсток, многое из черновой заготовки в те четыре страницы не вошло, и я в течение всего года мало-помалу делал для Сети расширенный вариант 46-й «Тени». Год выдался хлопотным, многое меня от этой приятной работы отвлекало, да и сама работа была для меня не из простых, так что в Сеть до сих пор ничего не выложено, хотя сделано не так мало. Однако очень хочется поделиться, по крайней мере, одной удивительной вещью, которую я осознал во время этой работы и которая стала темой настоящего номера «Тени».

Профессионалам, конечно, то, о чём сейчас пойдёт речь, давно известно. Но почему-то о фотонных сферах мало пишут популяризаторы науки, и этот-то пробел в знаниях широкой публики о чёрных дырах я и постараюсь здесь заполнить.

Традиционно о фотонных сферах пишут то, что вытекает из релятивистской математики: что это область на расстоянии полутора гравитационных радиусов от центральной сингулярности чёрной дыры, где фотоны и любые другие тела, двигающиеся с околосветовой скоростью, могут достаточно долго вращаться на неустойчивой круговой орбите. (На самом деле, кажется, не так-то и долго, но это предмет недописанного ещё раздела моего расширенного обзора, так что о нём лишь упомянем в скобках.)

Ну и что? Ну, примем к сведению, но не загоримся. То ли дело романтика горизонта событий! Точка невозврата; граница иной Вселенной; природная машина времени! А на фотонной сфере что? Ну, допустим, концентрация тех же фотонов в очень узкой области: (сверх?)высокая плотность энергии и информации? Нет, расчёт показывает, что не то что не сверхвысокая, а прямо скажем: довольно ничтожная.

Пишут ещё, что это последний рубеж, где возможны хотя бы неустойчивые и хотя бы только для ультрарелятивистских по скоростям тел орбиты. Любое тело, оказавшееся внутри фотонной сферы, либо стремительно уйдёт под её горизонт, либо ценой реактивной супертяги, перенося чудовищные перегрузки в сотни и тысячи земных g , вырвется из фотонной сферы наружу. Ну, это хотя бы тянет на основу какого-никакого сюжета для фантастического приключения. Но опять-таки, не экстра-класса.

А экстра-класс открылся мне при решении уравнений релятивистской динамики для увеличения к.п.д. машины вре-

мени чёрной дыры. Я искал, какие орбиты (и ценой каких усилий) обеспечат максимально долгое пребывание субъекта в областях наивысшего гравитационного потенциала чёрной дыры (в идеале ещё бы и с возможностью в конце сеанса вернуться домой, или хотя бы удалиться от дыры на безопасное расстояние). Тут примерно как с формулой Лоусона в термоядерном синтезе: чем дольше удержишь плазму в сверхсжатом и сверхгорячем состоянии, тем выше к.п.д. термоядерной реакции. А чем дольше сумеешь без вреда здоровью пробыть в зоне высоких гравитационных потенциалов, тем больше будущего Вселенной увидишь.

Но в работающий термоядерный реактор потребителю залезать не обязательно, а вот машина времени чёрных дыр, к сожалению, требует, чтобы Сталкер лично прошёл через самые экстримы.

Существа мы биологические, нежные, и даже после долгих специальных тренировок способны 20-30 g выдерживать лишь очень недолго, а ещё большее ускорение нас попросту убьёт почти сразу. И это тоже надо было учитывать при решении уравнений движения.

2. Две ипостаси ускорения.

В популярной релятивистике и небесной механике классического извода можно встретить упоминания о двух как бы разных ускорениях, порождаемых гравитацией: просто ускорении свободного падения и приливном ускорении.

Первое нам всем хорошо знакомо из житейского опыта, мы в нём почти постоянно пребываем (кроме тех редких и редко хорошо кончающихся случаев, когда наше тело в силу тех или иных обстоятельств отдаётся свободному падению). Это ускорение, физиологически ощущаемое нами как вес, и есть плата за неотдачу свободному падению. Например, за житьё-бытьё, фиксированное у поверхности Земли (забудем здесь о крохотном центробежном эффекте от вращения Земли, он отбавляет от нашего веса в средних широтах порядка 0,1%, грамм с килограмма).

Больше приходится платить космонавтам, которые не просто фиксированы в поле земной гравитации, а дерзают двигаться против её вектора. Правда, честно говоря, платить *настолько* много, как в практике полётов, им приходится не столько из-за законов природы, сколько из-за законов бизнеса. Разогнаться до требуемой космической скорости они могли бы и на комфортных 1,5 g , да вот беда, баллистика показывает, что ракета потратит тем меньше топлива, чем сильнее будет стартовое ускорение, оттого героев космоса и заставляют на старте терпеть до 5–7 g , то есть весить несколько центнеров и заставлять сердце качать кровь с плотностью в половину ртутной.

Вторая ипостась начинает проявляться, когда размеры тела, находящегося в поле гравитации (или иной силы), достаточно крупны, чтобы тело ощутило, что разные его точки испытывают в данном поле разное по величине и направлению ускорение. Физиологически это должно проявляться неизвестным нам из житейского опыта ощущением, что нас где-то растягивает, а где-то, возможно, в то же время сплюсчивает. Растягивает, как несложно догадаться, вдоль

оси вектора силы (говоря о чёрных дырах, это вектор направления от нас к ней), а сплющивает в перпендикулярном направлении.

Я разделяю не слишком общепринятую точку зрения, что приливное ускорение – в известном смысле более коренная величина, чем ускорение в первой ипостаси свободного падения. Первую ипостась мысленно устранял ещё Эйнштейн в своём рассуждении, что человек в свободно падающем лифте не может определить, то ли он свободно движется в поле силы, то ли покоится в отсутствие всяких сил. А вот со второй ипостасью этот фокус не проходит. И в лифте ощущения растяжения-сжатия никуда не денутся!

Другое дело, насколько они будут сильны. Относительный перепад гравитационных ускорений в теле размером l зависит от расстояния R между центрами тела и гравитирующей массы M (чёрной дыры и т. п.). Для растяжения вдоль линии, связывающей центры тел, это:

$$a_{\text{дальн}} = \gamma \cdot M / (R + l/2)^2; a_{\text{ближ}} = \gamma \cdot M / (R - l/2)^2;$$

$$a_{\text{центр}} = \gamma \cdot M / R^2; (a_{\text{ближ}} - a_{\text{дальн}}) / a_{\text{центр}} \approx 2 \cdot l / R.$$

А для сжатия в перпендикулярном направлении, если по этой оси тело имеет размер d , можно аналогично получить:

$$a_{\text{сжат}} / a_{\text{центр}} \approx -d / R.$$

Человек ростом $l = 1,7$ м с талией шириной $d = 0,3$ м в падающем лифте, например, у нас в Костроме, где $R = 6.362.923$ м (в системе GPS) и $a_{\text{центр}} = 9,835$ м/с² (с учётом центробежного эффекта), испытывает растяжение:

$$a_{\text{растяж}} = a_{\text{ближ}} - a_{\text{дальн}} \approx 2 \cdot 1,7 \cdot 9,835 / 6.362.923 = 5,26 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2 = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ g}.$$

Соответственно, его сжатие в талии будет равно:

$$a_{\text{сжат}} \approx -0,3 \cdot 9,835 / 6.362.923 = -4,64 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2 = -4,7 \cdot 10^{-8} \text{ g}.$$

В естественных для нас единицах веса, если этот человек при 1 g весил 70 кг, сила его растяжения – порядка 37 мг, а сжатия – порядка 3,3 мг. Без точных приборов, просто нутом, это неощутимо даже для принцессы на горошине.

Астронавт Бевульф Шеффер из рассказа Ларри Нивена «Нейтронная звезда» 1966 года прошёл в перигелии орбиты в 6,5 милях ($R = 1,05 \cdot 10^4$ м) от центра звезды BVS-1 массой 1,3 солнечной ($M_{\text{BVS-1}} = 2,6 \cdot 10^{30}$ кг). Этому соответствует

$$a_{\text{центр}} = \gamma \cdot M / R^2 = 6,674 \cdot 10^{-11} \cdot 2,6 \cdot 10^{30} / (1,05 \cdot 10^4)^2 = 1,57 \cdot 10^{12} \text{ м/с}^2 = 1,60 \cdot 10^{11} \text{ g};$$

$$a_{\text{растяж}} = 2 \cdot 1,7 \cdot 1,57 \cdot 10^{12} / (1,05 \cdot 10^4)^2 = 5,1 \cdot 10^8 \text{ м/с}^2 = 5,2 \cdot 10^7 \text{ g};$$

$$a_{\text{сжат}} \approx -0,3 \cdot 1,57 \cdot 10^{12} / (1,05 \cdot 10^4)^2 = -4,5 \cdot 10^7 \text{ м/с}^2 = -4,6 \cdot 10^6 \text{ g}.$$

Разумеется, ускорения в миллионы и десятки миллионов g тело Шеффера не вынесло бы. Но, поскольку нетрудно заметить, что все приливные ускорения спадают обратно пропорционально кубу расстояния до центра притяжения, Нивен вполне мог бы ограничить ускорение растяжения терпимым уровнем 2g, если бы точку перигелия поместил не в одной миле от поверхности звезды, а в 1920 милях. (Не говоря о том, что при этом его сюжетное допущение о непроницаемости корпуса корабля для всех видов излучений нейтронной звезды тоже на пять порядков понизило бы свой градус фантастичности.)

Приливное ускорение получило своё название от земных приливов и отливов (хотя сейчас понятно, что теория приливов и отливов намного сложнее чисто гравитационной модели). Земля с $d \approx l \approx 6,37 \cdot 10^6$ м, находясь от Луны на

расстоянии $R \approx 3,85 \cdot 10^8$ м, испытывает перепады ускорений в ближайшей и дальнейшей от Луны точках порядка 3,3% (это на растяжение) и в половину от этого на сжатие в перпендикулярной плоскости. Немного, но в сумме порядка 5%, и для образования метровых волн хватает. Если же мы попытались бы объяснить приливы и отливы с помощью обычного ускорения первого рода (считая, что к каждой точке на поверхности Земли, кроме самогравитации нашей планеты, то добавляется, то вычитается гравитация Луны), эффект получился бы на четыре порядка меньше, не говоря о том, что не объяснял бы ничего в поведении реальных приливов и отливов.

3. Где нас вырубит?

Расчёты, представленные выше, сделаны по классическим ньютоновским законам, но в сильных гравитационных полях (например, в сюжете рассказа Ларри Нивена) нужно учитывать, что движение тел становится всё более релятивистским, и для приливных ускорений нужны другие, релятивистские формулы. Для свободно падающих тел их найти легко, а вот для реактивных и прочих несвободных движений их пришлось поискать.

Уже отчаявшись было, я случайно нашёл искомое в работе трёх учёных из Объединённого института ядерных исследований в Дубне. И. Е. Жидкова, И. П. Недялков и В. А. Ростовцев в 1978 году новым тогда методом аналитического тензорного программирования после 2,5-часовой работы ЭВМ CDC-6500 получили для тела, вращающегося на круговой орбите вокруг дыры Шварцшильда с радиусом горизонта R_g , ряд формул и для приливных ускорений по трём осям координат и для критического расстояния от дыры, где тело с характерным размером $2 \cdot l$, плотностью d и прочностью σ будет разорвано приливными силами.

Через безразмерный зазор от центра тела до фотонной сферы $\delta\phi = (R - 1,5 \cdot R_g) / R_g$ и безразмерную массу дыры $\mu_d = M_{\text{дыры}} / M_{\text{Солнца}} = R_g / R_{\text{Солнца}}$ приливные ускорения растяжения и сжатия тела, отнесённые к одному g (то есть выраженные в единицах g), при подстановке размера l в метрах будут выглядеть так:

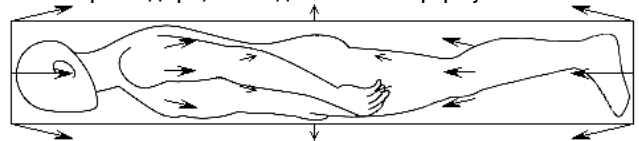
$$a_{\text{раст}} / g = (1,57 \cdot 10^9 / \mu_d^2) \cdot l_{\text{раст}} \cdot (\delta\phi + 0,5) / [\delta\phi \cdot (\delta\phi + 1,5)^3];$$

$$a_{\text{сжат}} / g = -(1,05 \cdot 10^9 / \mu_d^2) \cdot l_{\text{сж}} / [\delta\phi \cdot (\delta\phi + 1,5)^2].$$

Меня в дубнинском решении несколько настораживает, что оно не стремится к классическому пределу при $R \gg R_g$. Отношение удельного растягивающего ускорения к сжимающему у них стремится не к 2, а к 1,5, а третий осевой компонент приливного ускорения у них нулевой, хотя интуитивно кажется, что релятивистские эффекты не должны бы нарушать симметрию в плоскости сжатия, то есть, как и в классическом случае, второй и третий осевые компоненты должны быть идентичны (или это у них не оси, а углы?..).

Но критики их результатов я не нашёл, а интуиция и ОТО трудно совместимы, так что будем исходить из презумпции правильности их формул. Что же они нам говорят о действии приливных ускорений на человеческое тело?

Для орбит, лежащих дальше $5 \div 10 R_g$, распределение ускорений в области человеческого тела, лежащего животом к чёрной дыре, выглядит по этим формулам так:



Как видим, хотя растягивающее ускорение больше, но из-за несферичности типичного человеческого тела, при показанной здесь ориентации к дыре, силы сжатия количественно преобладают. Впрочем, эта схема тут же наводит на идею, что достаточно Сталкера поместить в центрифугу, чтобы идеально скомпенсировать сжимающие ускорения. (В

центрифуге ускорения будут точно так же расти пропорционально удалению от центра вращения.)

В этом случае достаточно рассмотреть влияние растягивающего ускорения. (Дубнинские авторы иным путём, но приходят к такому же решению.)

Если одеть Сталкера в хороший компрессионный скафандр, то наиболее уязвимым звеном, видимо, окажутся сосуды, особенно внутри мозга. Разрыв материала, по дубнинских авторам, происходит, когда радиус орбиты R_σ , или, в безразмерном виде $\rho = R_\sigma/R_g$, будет удовлетворять уравнению:

$$(\rho - 1)/[\rho^3 \cdot (\rho - 1,5)] = 4 \cdot \sigma \cdot R_g^2 / (3 \cdot d \cdot c^2 \cdot l^2) = k_\sigma \cdot \mu_d^2.$$

Здесь введена константа тела k_σ ; для человеческого мозга с прочностью сосудов $\sigma \approx 10^{4-5} \text{ Н/м}^2$, плотностью $d \approx 10^3 \text{ кг/м}^3$ и характерным размером $2 \cdot l \approx 0,2 \text{ м}$ она имеет величину порядка $k_\sigma \approx 1,3 \cdot 10^{-6-7}$. Решая уравнение для дыр с $\mu_d = 5, 10, 100, 10^6, 10^9$, получим, что разрыв сосудов начнётся на орбитах, соответственно, $463 \div 1012, 585 \div 1275, 1332 \div 2812 \text{ км}$, считая от центра дыры, а в двух последних случаях – на расстояниях $0,3 \div 3,5 \text{ км}$ и $0,3 \div 3,5 \text{ м}$ от фотосферы.

4. Бесконечное ускорение???

Найдя ответ на свои вопросы, я отложил дубнинские формулы, но потом, вернувшись к ним, обнаружил весьма неординарную вещь, которая поначалу привела меня к заключению, что эти формулы явно неверны.

Дело было в том, как ведёт себя по этим формулам приливное ускорение **у фотонной сферы (ФС) и под ней**.

С одной стороны, такая постановка вопроса не вполне корректна, ведь формулы были выведены для случая вращения тела по стационарной круговой орбите, а стационарные орбиты **под** ФС, как известно с 1920-х гг., невозможны.

С другой стороны, в итоговых формулах ничто не мешает их применению и под ФС, а насколько существенно для их вывода нахождение тела на стационарной орбите, это вопрос сложный, ответа на который у меня нет. Так отчего бы и не попробовать?

Продление формул до **ФС снаружи** её (а это мы вправе делать) приводит к быстрому росту обоих ускорений (растягивающего и сжимающего) до бесконечности. Это уже неординарно, потому что в релятивистской литературе можно встретить утверждения, что бесконечной величины приливные ускорения (для свободно падающего тела) достигают не на ФС, а на горизонте или в центре дыры.

Насчёт горизонта это явно не так, расчёты есть почти в любом учебнике. Да и вообще горизонт для падающего в дыру наблюдателя никак субъективно не ощутим. Ничего с ним и с окружающей Вселенной в его субъективном восприятии не происходит на этом самом горизонте, как всё до этого шло, так и продолжает идти.

А вот пересечение **ФС**, если правы авторы из Дубны, Сталкер очень даже должен ощутить, ведь приливные ускорения, как мы уже знаем, никакими фокусами не спрячешь и не обнулишь, их хребтом и брюхом чувят, в самом буквальном смысле слова! Если тебя с бесконечной силой рвут на части, это, конечно, не прозеваешь!

А если продлить дубнинские уравнения **под** ФС, то там будет ещё удивительнее: **оба ускорения меняют знаки**, то есть в том направлении, где Сталкера или его мелкодисперсные останки только что с бесконечной силой растаскивало, начинает с той же бесконечной силой сплющивать, и наоборот!

* Ближайшие данные я нашёл для прочности аорты на продольный разрыв: $\sigma = 7 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$. У гладких клеток прочность может быть ещё в несколько раз меньше.

Бесконечность, правда, существует только один лишённый продолжительности миг на самой **ФС**, дальше ускорения быстро спадают, но знак остаётся тем же антиподным вплоть до сферы горизонта событий. На горизонте на миг ускорения делаются нулевыми, под горизонтом опять меняют знаки, возвращаясь к тому, что было до **ФС**, и довольно быстро стремятся к бесконечности при движении к центральной сингулярности дыры.

Вот такие, стало быть, чудеса.

И, заметьте, никаких сенсаций в прессе, никаких Нобелевских премий, тишина и забвение. Авторы тему развивать не стали. И. Е. Жидкова в 2000-х гг. ратовала за холдную трансмутацию ядер, в 2010-х объясняла тунгусский феномен глобальным резонансом, и т. д. И. П. Недялков был автором более академичных работ, а В. А. Ростовцев – программистом, оставившим след в анналах ОИЯИ. Ссылка на их статью, и то по пальцам пересчитаешь. Вот отчето и я в ней совсем разуверился.

5. Выверт центробежности.

Но спустя некоторое время я наткнулся на другую, тоже не вошедшую в учебники и топы цитируемости (хотя тоже нигде и не оспоренную) статью Абрамовича и Прасанны 1990 года – о поведении центробежных сил на фотонной сфере. Собственно, эта статья подводила итог нескольким открытиям, сделанным в 1970-х – 1980-х годах разными авторами и касающимся тех или иных особенностей динамики тел и сред вокруг чёрных дыр.

В 1974 г. М. Абрамович и Ж.-П. Ласота, перепроверяя парадоксальную работу своей студентки Б. Мухотржеб, пришли к выводу, что тело, вращающееся вокруг дыры Шварцшильда по круговой орбите на фотонной сфере, притягивается к дыре с силой, не зависящей от орбитальной скорости. Для тела массой m сила равна $m \cdot c^4 / (6 \cdot \gamma \cdot M)$. (Замечу, что ускорение от такой силы в единицах g равно $10^{12} / \mu_d$, то есть даже у максимальных известных галактических дыр с $\mu_d = \sim 3 \cdot 10^9$ это сотни g . Для нахождения на этой орбите нужно прилагать и выдерживать такую же тягу. Наши тела на это не способны.)

В 1985 г. Б. Картер при обсуждении этого парадокса выдвинул идею, что у всякого тела, движущегося равномерно по траектории светового луча, будет исчезать зависимость силы от скорости, а в 1988 г. Абрамович, Картер и Ласота показали, что это верно для статичных гравитационных полей.

В том же 1988 г. Андерсон и Лемос вывели, что для частиц, плотно окружающих дыру наподобие вязкой жидкости (а это адекватно реальной картине окрестностей дыр, как их себе представляют астрофизики), такая важная мера интенсивности вращения как угловой момент передаётся вблизи дыры не наружу, а внутрь. Хотя, казалось бы, частицы, ступаясь по мере приближения к дыре, испытывают трение, тормозятся, в итоге теряют угловой момент, а поскольку для него, как и для энергии, существует закон сохранения, то это и означает, что во внешних слоях угловой момент растёт на столько же, на сколько во внутренних слоях он падает.

Марек Абрамович с рядом соавторов и сам по себе опубликовал серию работ, в которых, в конечном итоге, выяснил, что для дыры Шварцшильда на фотонной сфере происходит **смена знака (направления) центробежной силы при круговом вращении**. Этому были приведены и аналитические доказательства (их вполне принял рецензент из авторитетного журнала «Nature») и наглядное физическое истолкование через понятие кривизны траекторий.

Тело на круговой орбите или вообще при любом непрямолинейном движении испытывает действие центробежной силы, направленной куда? Учебники отвечают: перпендикулярно касательной к траектории. Абрамович же сформулировал так: перпендикулярно касательному световому лучу. В плоском ньютоновском пространстве свет распространяется по прямому, и это одно и то же. В геометрии ОТО лучи искривляются, и Абрамович подметил, что за фотонной сферой их кривизна всегда остаётся меньше, чем у любой круговой орбиты,

поэтому и вектор силы остаётся, как в классическом случае, центробежным. А вот внутри ΦC для любой круговой орбиты кривизна касательного к ней светового луча окажется больше кривизны самой орбиты, и вектор силы из центробежного становится центростремительным. На самой же ΦC кривизна одинакова, и зависимость центробежной силы от орбитальной скорости отсутствует.

Но это же прекрасно увязывается с главным парадоксом дубнинских авторов! На ΦC происходит скачок: сила, которая извне от ΦC вычиталась из гравитации, внутри одно-моментно начинает с гравитацией суммироваться. То есть сила в точке меняется не на бесконечно малую, а на конечную (кстати, огромную по модулю) величину, — а это и есть бесконечность в приливном ускорении. И смена знака ускорения при прохождении через эту точку.

6. Системы измерений и ценностей.

Возможно, сдержанное отношение к этим работам объясняется тем, что в них используются понятия, которые в ОТО в лучшем случае заковычивают, а то и вовсе отвергают: «гравитационная сила», «центробежная сила», «сила Кориолиса». Всё это в ОТО химеры, таких сил там нет, и отказ от той же гравитационной силы есть, пожалуй, главный постулат ОТО.

Тем не менее, в некоторых специальных системах отсчёта (а в работах Абрамовича с соавторами используется статическое пространство-время и система координат, вращающаяся вместе с телом) все эти силы физически ощущаются телом именно как некие действующие на него силы. Более того, их может измерить сторонний наблюдатель с помощью вполне реализуемой методики. (Да и любой релятивист, взваливая, например, грузный рюкзак на плечи или вдавливая вбок в резко поворачивающем автомобиле, вряд ли утешает себя мыслью, что гравитации и центробежной силы не существует, а есть только святая Кривизна Пространства-Времени.)

Нельзя сказать, что эти работы остались сектантскими. В 1993 г. Н. Векс развил эти идеи для вращающихся чёрных дыр (с ними ситуация оказалась гораздо сложнее), а в 1999 г. Ч. Вишешвара, который в Индии был авторитетом № 1 по чёрным дырам (это он в 1968 г. открыл эргосферы), вывел общие уравнения для сил инерции и шварцшильдовских и керровских чёрных дыр, показав, что у вторых это происходит не на фотонной сфере.

Таким образом, правдоподобной гипотезой, а если лучше порыться в литературе, не ограничиваясь той, что доступна в онлайн, то, вполне возможно, что и не гипотезой, а уже доказанным (*эм... или опровергнутым!*) фактом может быть то, что всякое тело вблизи чёрной дыры испытывает скачкообразное обращение на 180° вектора сил инерции в тот момент, когда кривизна орбиты тела совпадает с кривизной касательного к орбите светового луча.

В этой точке приливные ускорения, действующие на тело, проходят через бесконечность и меняют знаки.

7. Проход через бесконечность.

Как физически выглядит проход материального тела через точку с бесконечным приливным ускорением?

Во-первых, обратим внимание, что сама формулировка вопроса внутренне противоречива. Ускорение бесконечно **в точке** (например, на фотонной сфере для движения по круговой орбите), но по своему же определению приливное ускорение **в точке** равно нулю. Оно возникает, когда мы рассматриваем не точку, а некое расстояние АВ, вот тогда на крайние точки А и В оно действует пропорционально длине АВ (и то в первом, линейном, приближении).

Можно формализовать задачу весьма общим образом: пусть тело движется (не обязательно свободно; в общем случае и под действием реактивной тяги, электромагнитных сил и т. п.) в поле гравитации. В некоторой точке оно разрывается приливными силами, далее его фрагменты, возможно, продолжают рваться на ещё более мелкие части, если в направлении их движения гравитационное поле (его потенциал) растёт.

Тем не менее мы зададим, что этот процесс каскадных разрывов на каком-то шаге остановится, и фрагменты последнего дробления, например, А и В, уже не смогут разорваться, пересекая точку, где формально приливное ускорение бесконечно. (Нужно оговорить, как для каждого *неточечного* тела определяется его *точечная* координата, например, по координате центра масс, или конечной точки тела, и т. п.; это не принципиально.) Бесконечность же мы формально введём так, что ускорение тела В относительно тела А становится равно бесконечности при достижении телом В критического значения некоей координаты Х.

Так вот, оказывается, что если все эти условия записать математически, в виде уравнений движения, то бесконечность будет проявляться интегралом, который вблизи точки достижения бесконечности ведёт себя как интеграл от функции $[\ln(x)]^{-0,5}$ при $x \rightarrow 1$, а это интеграл сходящийся. Физически это означает, что расстояние между А и В будет конечным и после прохождения точки бесконечного приливного ускорения.

8. Возвращаясь к машине времени.

Итак, если мы хотим как можно ближе и дольше налесть вблизи дыры Шварцшильда без фатального вреда здоровью и с возможностью вернуться домой, то оптимальной стратегией будет кружить по равновесной круговой орбите чуть дальше фотонной сферы. Там центробежная сила скомпенсирует гравитацию, центрифуга скомпенсирует приливное сжатие, а приливное растяжение будет терпимым, если это дыра сверхмассивная. Обычно такие сидят в центрах галактик, окружены аккреционными дисками и, как следствие, главным вредоносным фактором там будут мощнейшие жёсткие излучения вещества диска, а вовсе не гравитация.

Однако есть космогонические модели, в которых дыригиганты могут рождаться и сами по себе, и, по-видимому, только такая схема и даёт тень надежды, что такую машину времени можно эксплуатировать.

Но всё же дыр Шварцшильда во Вселенной быть практически не должно. Реальные дыры должны быть дырами Керра, с заметным собственным вращением.

Для дыр Керра, вероятно, должно существовать что-то похожее. Нужно выбрать такую из разрешённых стабильных орбит, чтобы её кривизна была как можно ближе к кривизне касательных к ней световых лучей (на всём протяжении орбиты). Главное, не заскочить в область, где кривизна орбиты станет меньше кривизны луча.

Световые лучи в случае дыр Керра имеют устойчивые орбиты, которые при определённых сочетаниях параметров вплотную приближаются в отдельных местах к горизонту событий дыры. Это даёт надежду, что и устойчивые орбиты для капсулы Сталкера с соблюдением требований кривизны смогут пролечь почти так же выгодно. Можно рассчитывать, что и с приливными ускорениями там можно совладать при помощи тех же приёмов, как в случае дыр Шварцшильда. Одним из важных требований здесь является разгон капсулы до субсветовых скоростей, но это «дело техники».

Тогда будущего можно будет увидеть больше. Насколько больше, это ещё нужно считать.

А пока — с Новым годом, братцы!