

2

Темная звезда

Горацио, — на небе и земле
Есть многое, что и не снилось даже
Науке.

— Уильям Шекспир, *Гамлет**

Первый намек на что-то подобное черной дыре появился в конце XVIII века, когда великий французский физик Пьер-Симон де Лаплас и английский клирик Джон Митчел высказали одну и ту же замечательную мысль. Все физики тех дней серьезно интересовались астрономией. Все, что было известно о небесных телах, выяснялось благодаря свету, который они испускали или, как в случае с Луной и планетами, отражали. Хотя ко времени Митчела и Лапласа со смерти Исаака Ньютона прошло уже полвека, он все равно оставался самой влиятельной фигурой в физике. Ньютон считал, что свет состоит из крошечных частиц — корпускул, как он их называл, — а раз так, то почему бы свету не испытывать действие гравитации? Лаплас и Митчел задумались, может ли существовать звезда, столь массивная и плотная, что свет не сможет преодолеть ее гравитационное притяжение. Должны ли такие звезды, если они существуют, быть абсолютно темными и потому невидимыми?

* Перевод П. Гнедича. — *Примеч. перев.*

Может ли снаряд* — камень, пуля или хотя бы элементарная частица — вырваться из гравитационного притяжения Земли? С одной стороны — да, с другой — нет. Гравитационное поле массы нигде не заканчивается; оно тянется бесконечно, становясь все слабее и слабее по мере увеличения расстояния. Так что брошенный вверх снаряд никогда полностью не избавится от земного притяжения. Но если снаряд брошен вверх с достаточно большой скоростью, он будет удаляться вечно, поскольку убывающая гравитация слишком слаба, чтобы развернуть его и притянуть назад к поверхности. В этом смысле снаряд может вырваться из земного тяготения.

Даже самый сильный человек не имеет шансов выбросить камень в открытый космос. Высота броска профессионального бейсбольного питчера может достигать 70 метров, это около четверти высоты Эмпайр-стейт-билдинг. Если пренебречь сопротивлением воздуха, пуля, выпущенная из пистолета, могла бы достичь высоты 5 километров. Но существует особая скорость — называемая *скоростью убегания*** — которой едва хватает, чтобы вывести объект на вечно удаляющуюся траекторию. Начав движение с любой меньшей скоростью, снаряд упадет обратно на Землю. Стартовав с большей скоростью, он уйдет на бесконечность. Скорость убегания для поверхности Земли составляет 40 000 км/ч (11,2 км/с)***.

Давайте временно станем называть звездой любое массивное небесное тело, будь то планета, астероид или настоящая звезда. Земля — это просто маленькая звезда, Луна — еще меньшая звезда и т. д.

* В оригинале употреблено слово «projectile» (снаряд — *Примеч. перев.*), и к нему дано следующее примечание: «The American Heritage Dictionary of the English Language (4-я ред.) определяет projectile как «выстреленный, брошенный или иным образом приведенный в движение объект, например пуля, не обладающий способностью к самодвижению». Может ли снаряд (projectile) быть отдельной частицей света? Согласно Митчелу и Лапласу, ответ будет утвердительным.

** Скорость убегания также называют второй космической. Первой космической скоростью считается та, которой хватает для выхода на круговую орбиту вблизи поверхности Земли. — *Примеч. перев.*

*** Представление о скорости убегания — это идеализация, в которой пренебрегается такими эффектами, как, скажем, сопротивление воздуха, из-за которого объекту могла бы потребоваться куда более высокая скорость.

По ньютоновскому закону тяготения, гравитационное воздействие звезды пропорционально ее массе, так что совершенно естественно, что и скорость убегания тоже зависит от массы звезды. Но масса — это только полдела. Другая половина — это радиус звезды. Представьте себе, что вы стоите на земной поверхности и в это время некая сила начинает сжимать Землю, уменьшая ее размеры, но без потери массы. Если вы остаетесь на поверхности, то сжатие будет приближать вас ко всем без исключения атомам Земли. При сближении с массой воздействие ее гравитации усиливается. Ваш вес — функция гравитации — будет возрастать, и, как нетрудно догадаться, преодолеть земное тяготение будет все труднее. Этот пример иллюстрирует фундаментальную физическую закономерность: сжатие звезды (без потери массы) увеличивает скорость убегания.

Теперь представьте себе прямо противоположную ситуацию. По каким-то причинам Земля расширяется, так что вы удаляетесь от массы. Тяготение на поверхности будет становиться слабее, а значит, из него легче вырваться. Вопрос, поставленный Митчелом и Лапласом, состоял в том, может ли звезда иметь такую большую массу и столь малый размер, чтобы скорость убегания превысила скорость света.

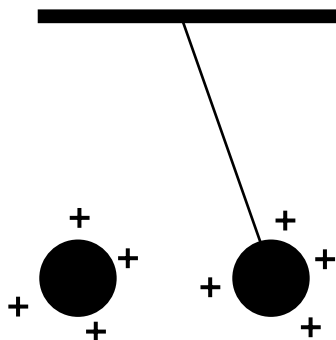
Когда Митчел и Лаплас впервые высказали эти пророческие мысли, скорость света (обозначаемая буквой c) была известна уже более ста лет. Датский астроном Оле Рёмер в 1676 году определил, что она составляет колоссальную величину — 300 000 км (это примерно семь оборотов вокруг Земли) за одну секунду:

$$c = 300\,000 \text{ км/с.}$$

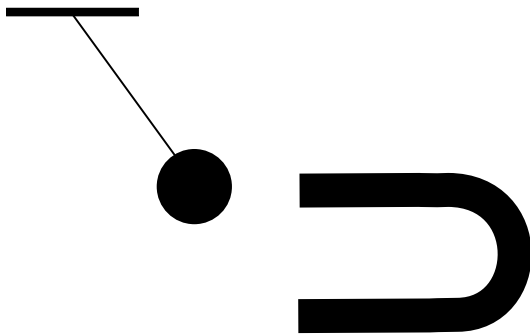
При такой колоссальной скорости, чтобы удержать свет, требуется чрезвычайно большая или чрезвычайно сконцентрированная масса, однако нет видимых причин, по которым такой не могло бы существовать. В докладе Митчела Королевскому обществу впервые упоминаются объекты, которые Джон Уилер впоследствии назовет черными дырами.

Вас может удивить, что среди всех сил гравитация считается чрезвычайно слабой. Хотя тучный лифтер и прыгун в высоту могут чувствовать себя по-разному, есть простой эксперимент, демонстрирующий, как слаба в действительности гравитация. Начнем

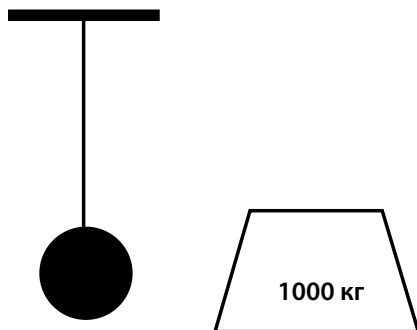
с небольшого веса: пусть это будет маленький шарик пенопласта. Тем или иным способом придадим ему статический электрический заряд. (Можно просто потереть его о свитер.) Теперь подвесим его к потолку на нитке. Когда он перестанет крутиться, нить будет висеть вертикально. Теперь поднесите к висющему шарiku другой подобный заряженный предмет. Электростатическая сила будет отталкивать подвешенный груз, заставляя нить наклоняться.



Того же эффекта можно добиться с помощью магнита, если висящий груз сделан из железа.



Теперь уберите электрический заряд или магнит и попытайтесь отклонить подвешенный груз, поднося к нему очень тяжелые предметы. Их гравитация будет притягивать груз, но воздействие окажется столь слабым, что его невозможно заметить. Гравитация чрезвычайно слаба по сравнению с электрическими и магнитными силами.



Но если гравитация так слаба, почему нельзя допрыгнуть до Луны? Дело в том, что огромная масса Земли, 6×10^{24} кг, с легкостью компенсирует слабость гравитации. Но даже при такой массе скорость убегания с поверхности Земли составляет меньше одной десяти тысячной от скорости света. Чтобы скорость убегания стала больше c , придуманная Митчелом и Лапласом темная звезда должна быть потрясающе массивной и потрясающе плотной.

Чтобы почувствовать масштаб величин, давайте рассмотрим скорости убегания для разных небесных тел. Для покидания поверхности Земли нужна начальная скорость около 11 км/с, что, как уже отмечалось, составляет примерно 40 000 км/ч. По земным меркам это очень быстро, но в сравнении со скоростью света подобно движению улитки.

На астероиде у вас было бы куда больше шансов покинуть поверхность, чем на Земле. У астероида радиусом 1,5 км скорость убегания составляет около 2 м/с: достаточно просто прыгнуть. С другой стороны, Солнце много больше Земли, как по размеру, так и по массе*. Эти два фактора действуют в противоположных направлениях. Большая масса затрудняет покидание поверхности Солнца, а большой радиус, наоборот, упрощает. Масса, однако, побеждает, и скорость убегания для солнечной поверхности примерно в пятьдесят раз больше, чем для земной. Но она все равно остается много ниже скорости света.

* Масса Солнца — около 2×10^{30} кг. Это примерно в миллион раз больше массы Земли. Радиус Солнца — около 700 000 км, то есть около сотни земных.

Но Солнце не будет вечно сохранять свой нынешний размер. В конце концов звезда исчерпает запасы топлива, и распирающее ее давление, поддерживаемое внутренним теплом, ослабнет. Подобно гигантским тискам, гравитация начнет сжимать звезду до малой доли ее первоначального размера. Где-то через пять миллиардов лет Солнце выгорит и сколлапсирует в так называемый *белый карлик* с радиусом примерно как у Земли. Чтобы покинуть его поверхность, потребуется скорость 6400 км/с — это очень много, но все равно лишь 2% от скорости света.

Если бы Солнце было немного — раза в полтора — тяжелее, добавочная масса стиснула бы его сильнее, чем до состояния белого карлика. Электроны в звезде вдавились бы в протоны, образуя невероятно плотный шар из нейтронов. Нейтронная звезда столь плотна, что одна лишь чайная ложка ее вещества весит несколько миллиардов тонн. Но и нейтронная звезда еще не искомая темная; скорость убегания с ее поверхности уже близка к скорости света (около 80% c), но все же не равна ей.

Если коллапсирующая звезда еще тяжелее, скажем, в пять раз массивнее Солнца, тогда даже плотный нейтронный шар не сможет противостоять сжимающему гравитационному притяжению. В результате финального направленного внутрь взрыва звезда сожмется в *сингулярность* — точку почти бесконечной плотности и разрушительной силы. Скорость убегания для этого крошечного ядра многократно превосходит скорость света. Так возникает темная звезда, или, как мы сегодня говорим, черная дыра.

Эйнштейну так не нравилось само представление о черных дырах, что он отрицал возможность их существования, утверждая, что они никогда не смогут образоваться. Но нравится это Эйнштейну или нет, черные дыры — это реальность. Сегодня астрономы запросто изучают их, причем не только одиночные сколлапсировавшие звезды, но и находящиеся в центрах галактик черные гиганты, образованные слиянием миллионов и даже миллиардов звезд.

Солнце недостаточно массивно, чтобы самостоятельно сжаться в черную дыру, но, если помочь ему, сдавив его в космических тисках до радиуса в 3 км, оно стало бы черной дырой. Можно подумать, что, если потом ослабить тиски, оно снова раздуется, скажем,



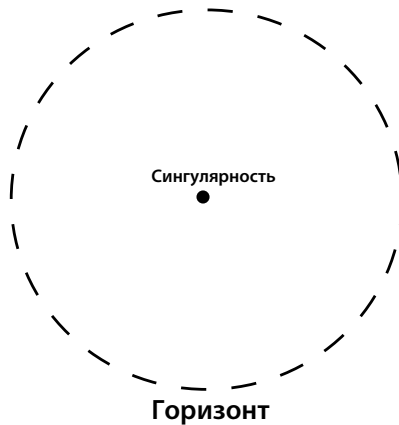
Компьютерная модель черной дыры в 10 солнечных масс

до 100 км, но в действительности будет уже поздно: вещество Солнца перейдет в состояние своего рода свободного падения. Поверхность быстро преодолест радиус в одну милю, один метр, один сантиметр. Никакие остановки невозможны, пока не образуется сингулярность, и этот коллапс необратим.

Представьте, что мы находимся вблизи черной дыры, но в точке, отличной от сингулярности. Сможет ли свет, выйдя из этой точки, покинуть черную дыру? Ответ зависит как от массы черной дыры, так и от конкретного места, из которого свет начинает свое движение. Воображаемая сфера, называемая *горизонтом*^{*}, делит Вселенную на две части. Свет, который идет изнутри горизонта, неминуемо будет затянута в черную дыру, однако свет, идущий извне горизонта, может черную дыру покинуть. Если бы Солнце стало однажды черной дырой, радиус его горизонта составил бы около 3 км.

Радиус горизонта называют *шварцшильдовским радиусом* в честь астронома Карла Шварцшильда, который первым стал изучать математику черных дыр. Шварцшильдовский радиус зависит от массы черной дыры; на самом деле он ей прямо пропорционален. Например, если массу Солнца заменить тысячей солнечных масс, у светового луча, испущенного с расстояния в 3 или 5 км, не будет

^{*} Обычно используется термин «горизонт событий», чтобы не путать с горизонтом на поверхности планеты, однако автор везде использует краткую форму. — *Примеч. перев.*



шансов уйти прочь, поскольку радиус горизонта вырастет тысячекратно, до трех тысяч километров.

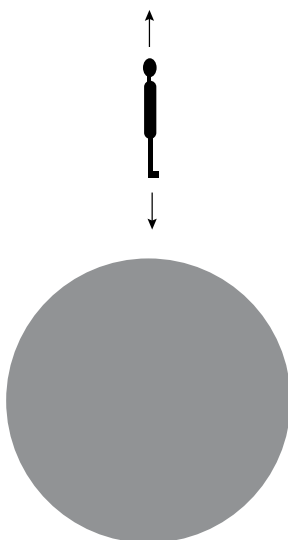
Пропорциональность между массой и радиусом Шварцшильда — первое, что физики узнали о черных дырах. Земля примерно в миллион раз менее массивна, чем Солнце, поэтому ее шварцшильдовский радиус в миллион раз меньше солнечного. Для превращения в темную звезду ее пришлось бы сжать до размеров клюквины. Для сравнения: в центре нашей Галактики притаилась гигантская черная дыра со шварцшильдовским радиусом около 150 000 000 км — примерно как у земной орбиты вокруг Солнца. А в других уголках Вселенной встречаются и еще более крупные монстры.

Приливы и 2000-мильный человек

Что заставляет моря подниматься и отступать, как будто ежедневно они делают два глубоких вдоха-выдоха? Дело, конечно, в Луне, но как она это делает и почему дважды в день? Я сейчас объясню, но сначала расскажу о падении 2000-мильного человека.

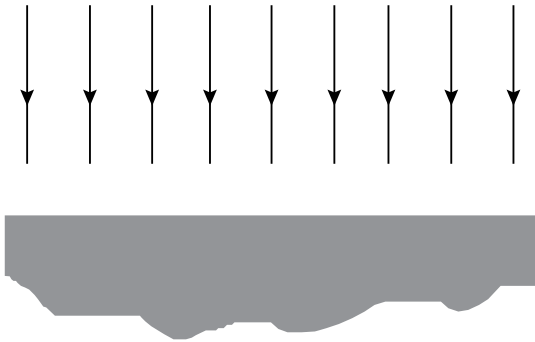
Представьте себе гиганта, ростом от темечка до пяток в 2000 миль (3200 км), который падает ногами вперед из космоса на Землю. Далеко в открытом космосе гравитация слаба, так слаба, что он ничего не чувствует. Однако по мере приближения к Земле в его длинном теле возникает странное ощущение: но это не чувство падения, а чувство натяжения.

Дело не в ускорении гиганта в направлении Земли. Причина его дискомфорта в том, что гравитация в космосе неоднородна. Вдалеке от Земли она почти полностью отсутствует. Но по мере того как он приближается, гравитация возрастает. 2000-мильному человеку это доставляет неприятности, даже когда он находится в свободном падении. Бедняга столь высок, что его ноги притягиваются гораздо сильнее, чем голова. Результирующий эффект — неприятное чувство, как будто его ноги и голову тянут в противоположных направлениях.



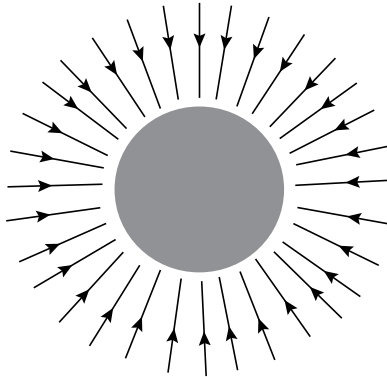
Пожалуй, он мог бы избежать растяжения, падая в горизонтальном положении, так, чтобы ноги и голова были на одной высоте. Но когда гигант это попробует, то столкнется с другим неудобством: чувство натяжения сменяется равным чувством сжатия. Он чувствует, что его голова придавливается к ногам.

Чтобы понять, почему так происходит, представим на время, что Земля плоская. Вертикальные линии со стрелками указывают направление гравитационных сил, тянущих, естественно, прямо вниз.

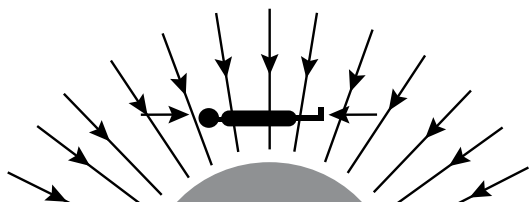


Более того, сила гравитационного притяжения совершенно одинакова. У 2000-мильного человека в таких условиях не было бы проблем, падай он в вертикальном положении или в горизонтальном, — по крайней мере, пока он не долетит до земли.

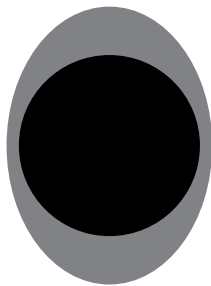
Но Земля не плоская. Как сила, так и направление ее тяготения меняются. Вместо того чтобы тянуть в одном направлении, гравитация притягивает прямо к центру планеты, как показано здесь:



Это порождает новые проблемы для гиганта, когда он падает горизонтально. Силы, действующие на его голову и ноги, не будут одинаковыми, поскольку гравитация, тянущая их к центру Земли, будет прижимать его голову к ногам, вызывая странное ощущение сдавливания.



Вернемся к вопросу об океанских приливах. Причина двукратных ежедневных подъемов и спадов моря та же, что вызывает дискомфорт у 2000-мильного человека: неоднородность гравитации. Только в данном случае это гравитация лунная, а не земная. Лунное притяжение сильнее всего действует на океаны на той стороне Земли, которая обращена к Луне, а слабее всего — на противоположной стороне. Может показаться, что Луна должна порождать один океанский горб на ближней стороне, но это ошибка. По той же причине, по которой голова высокого человека оттягивается от его ног, вода с двух сторон Земли — ближней и дальней — выпячивается над ее поверхностью. Один из способов понять это — считать, что на ближней стороне Луна оттягивает воду от Земли, а на дальней — Землю от воды. В результате получается два горба на противоположных сторонах Земли, обращенных к Луне и от нее. Пока Земля делает один оборот под этими горбами, каждая точка на ее поверхности испытывает два прилива.



Деформирующие силы, вызванные изменениями величины и направления гравитационного притяжения, называют *приливными силами*, будь они вызваны Луной, Землей, Солнцем или любым другим массивным небесным телом. Может ли человек обычных размеров почувствовать приливные силы, например, когда прыгает с трамплина в воду? Нет, но лишь потому, что мы так малы, что земное гравитационное поле практически не меняется в пределах тела.

Схождение в преисподнюю

Низшел путем лесистым в мрак пучин.

— Данте. *Божественная комедия**

Для человека, падающего в черную дыру солнечной массы, приливные силы уже не будут столь слабыми. Огромная масса, сжатая в крошечный объем черной дыры, делает гравитацию вблизи горизонта не только очень сильной, но еще и крайне неоднородной. Задолго до подлета к радиусу Шварцшильда, на расстоянии более 100 000 км от черной дыры, приливные силы вызовут сильнейший дискомфорт. Подобно 2000-мильному человеку, вы окажетесь слишком велики для быстро меняющегося гравитационного поля черной дыры. К моменту сближения с горизонтом вы деформируетесь — почти как зубная паста, выдавливаемая из тюбика.

Есть два способа справиться с приливными силами на горизонте черной дыры: уменьшиться самому или сделать больше черную дыру. Бактерия не заметила бы приливных сил на горизонте черной дыры солнечной массы, но и вы не почувствовали бы приливных сил на горизонте черной дыры в миллион солнечных масс. Это может показаться странным, поскольку воздействие гравитации более массивной черной дыры сильнее. Но в этом суждении игнорируется важный факт: горизонт крупной черной дыры настолько велик, что будет казаться почти плоским. Вблизи горизонта гравитационное поле будет очень сильным, но практически однородным.

* Перевод Д. Мина. — *Примеч. перев.*

Если вы немного знакомы с ньютоновской теорией гравитации, то сможете рассчитать приливные силы на горизонте темной звезды. И тогда окажется, что чем она больше и массивнее, тем меньше приливные силы на горизонте. Поэтому пересечение горизонта очень большой черной дыры будет ничем не примечательным событием. Но в итоге от приливных сил не спастись даже в величайшей из черных дыр. Ее размеры лишь отсрочат неизбежное. В конце концов неминуемое падение к сингулярности будет столь же ужасным, как и любая попытка, придуманная Данте или примененная Торквемадой в процессах испанской инквизиции. (В памяти всплывает дыба.) Даже мельчайшая бактерия будет разорвана на части вдоль вертикальной оси и сплющена по горизонтальной. Небольшие молекулы проживут дольше бактерий, а атомы еще немного дольше. Но рано или поздно сингулярность одержит верх даже над отдельным протоном. Не знаю, прав ли Данте, утверждая, что ни один грешник не избежит адских мук, но я совершенно уверен: ничто не сможет устоять против чудовищных приливных сил вблизи сингулярности черной дыры.

Но, несмотря на всю чуждость и брутальность свойств сингулярности, не в ней заключены глубочайшие загадки черной дыры. Мы знаем, что происходит с любым объектом, который угораздило попасть в черную дыру, — судьба его незавидна. Однако нравится нам сингулярность или нет, она и близко не подходит по парадоксальности к горизонту. В современной физике практически ничто не вызывало большей путаницы, чем вопрос о том, что происходит с материей, когда она проваливается сквозь горизонт? Любой ваш ответ, вероятно, будет ошибочным.

Митчел и Лаплас жили задолго до рождения Эйнштейна и не могли знать о двух открытиях, совершенных им в 1905 году. Первым из них была специальная теория относительности, в основе которой лежит принцип: *ничто* — ни свет, ни что-либо другое — никогда не может превысить скорость света. Митчел и Лаплас понимали, что от темной звезды не может уйти свет, но они не догадывались о невозможности этого ни для чего другого.

Вторым открытием Эйнштейна, сделанным в 1905 году, было то, что свет *действительно* состоит из частиц. Вскоре после того, как

Митчел и Лаплас выдвинули свои соображения относительно темных звезд, ньютоновская корпускулярная теория света оказалась в опале. Накопились доказательства того, что свет состоит из волн, подобных звуковым или тем, что бегут по поверхности моря. К 1865 году Джеймс Клерк Максвелл показал, что свет состоит из колеблющихся *электрического и магнитного полей*, которые распространяются сквозь пространство со скоростью света, и корпускулярная теория вовсе перестала подавать признаки жизни. Похоже, никто и не задумывался, что электромагнитные волны тоже могут притягиваться гравитацией, так что темные звезды были забыты.

Забыты, пока в 1917 году астроном Карл Шварцшильд не решил уравнения новой, общей теории относительности Эйнштейна и не переоткрыл темные звезды*.

Принцип эквивалентности

Как и большинство эйнштейновских работ, общая теория относительности была сложной и изысканной, но она строилась на исключительно простых наблюдениях. Фактически они настолько элементарные, что были доступны каждому, но никто их не сделал.

Это было в стиле Эйнштейна — делать далеко идущие выводы из простейших мысленных экспериментов. (Лично меня этот способ мышления восхищает более всех прочих.) В случае общей теории относительности в мысленном эксперименте участвовал наблюдатель в лифте. Учебники часто модернизируют эксперименты, заменяя лифт ракетой, но в эпоху Эйнштейна лифты были захватывающей новой технологией. Он первым представил себе лифт, свободно плавающий в открытом космосе, вдали от любых тяготеющих объектов. Всякий, кто находится в таком лифте, будет испытывать полную невесомость, а снаряды будут пролетать мимо по идеально прямым траекториям с постоянной скоростью.

* Черные дыры бывают разных видов. В частности, они могут вращаться вокруг своей оси, если вращалась исходная звезда (в той или иной мере вращаются все звезды), и они могут быть электрически заряжены. Сбросив электрон в черную дыру, мы ее зарядим. Шварцшильдовскими черными дырами принято называть только те, которые не вращаются и не имеют заряда.



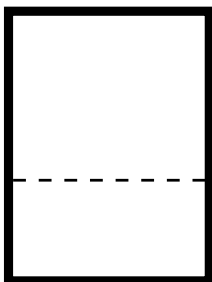
С лучами света будет происходить то же самое, но, конечно, на скорости света.

Далее Эйнштейн представил, что случится, если начать ускорять лифт вверх, скажем, с помощью кабеля, прикрепленного к какому-то далекому якорю, или посредством укрепленных под днищем ракет. Пассажиры начнут прижимать к полу, а траектории снарядов станут загибаться вниз, образуя параболические орбиты. Все будет в точности так же, как и под воздействием гравитации. Все знают об этом со времен Галилея, но Эйнштейну выпало превратить этот простой факт в новый мощный физический принцип. Принцип эквивалентности гласит, что не существует абсолютно никакой разницы между воздействием гравитации и воздействием ускорения. Никакой эксперимент, проведенный внутри лифта, не позволит отличить, покоится лифт в гравитационном поле или ускоряется в открытом космосе.

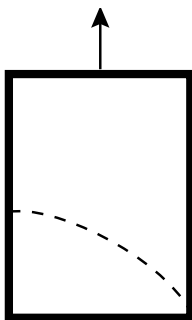
Само по себе это не было удивительно, однако имело важнейшие следствия. В то время, когда Эйнштейн сформулировал принцип эквивалентности, было очень мало известно о том, как гравитация влияет на другие явления, такие как течение электричества, поведение магнитов или распространение света. Согласно эйнштейновскому подходу, начинать следовало с того, чтобы разобраться, как на все эти явления воздействует ускорение. При этом обычно не появлялось какой-то новой физики. Все, что делал Эйнштейн, — это представлял себе, как известные явления будут выглядеть в ускоряющемся лифте. А затем принцип эквивалентности подсказывал ему, каково будет влияние гравитации.

В первом примере рассматривалось поведение света в гравитационном поле. Представьте себе световой луч, движущийся горизонтально слева направо поперек лифта. Если бы лифт свободно

двигался вдали от любых тяготеющих масс, свет шел бы по идеально прямой горизонтальной линии.



Но теперь допустим, что лифт ускоряется вверх. Свет начинает движение с левой стороны лифта в горизонтальном направлении, но из-за того, что лифт ускоряется, ко времени прихода на другую его сторону у света появится составляющая движения, направленная вниз. С одной точки зрения, лифт ускоряется вверх, но, с другой, — его пассажирам кажется, что свет ускоряется вниз.



Фактически световой луч искривляется так же, как и траектория очень быстрой частицы. Этот результат никак не зависит от того, состоит свет из волн или из частиц; это просто эффект направленного вверх ускорения. Но, рассуждал Эйнштейн, если ускорение заставляет изгибаться траекторию светового луча, то же самое должна делать и гравитация. В действительности можно сказать, что гравитация притягивает свет и заставляет его падать. Это полностью совпадает с догадками Митчела и Лапласа.

Есть, однако, и другая сторона медали: если ускорение способно сымитировать воздействие гравитации, то оно может его и уничтожить. Представьте себе тот же лифт уже не бесконечно далеко в открытом космосе, а наверху небоскреба. Если он стоит, пассажиры наблюдают все эффекты гравитации, включая искривление лучей света, идущих поперек лифта. Но затем трос лопаается, и лифт начинает ускоряться в направлении земли. В течение короткого времени свободного падения кажется, что гравитация внутри лифта полностью исчезла*. Пассажиры плавают по кабине, утратив чувство верха и низа. Частицы и пучки света движутся по идеально прямым линиям. Это оборотная сторона принципа эквивалентности.

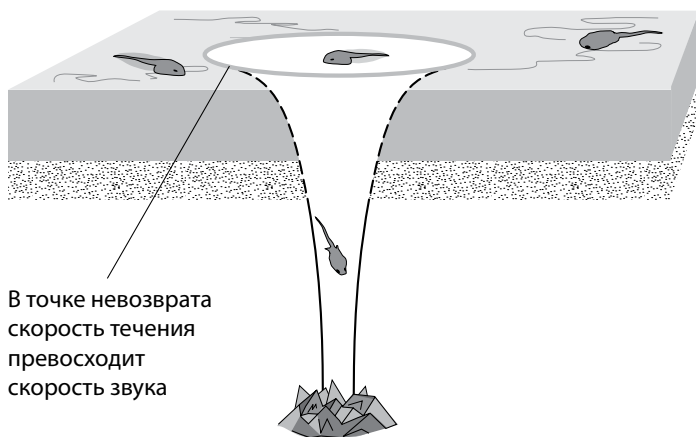
Сточные, глухие и черные дыры

Всякий, кто пытается описать современную физику без математических формул, знает, насколько полезными бывают аналогии. Например, очень удобно думать, что атом — это миниатюрная планетная система, а использование обычной ньютоновской механики для описания темных звезд помогает тем, кто не готов погружаться в высшую математику общей теории относительности. Но аналогии имеют свои ограничения, и темная звезда в качестве аналога черной дыры перестает работать, если зайти достаточно глубоко. Существует другая, более удачная аналогия. Я узнал о ней от одного из пионеров квантовой механики черных дыр Билла Унру. Возможно, она мне особенно нравится потому, что по своей первой специальности я — водопроводчик.

Представьте себе бесконечное мелководное озеро. Его глубина всего несколько футов, но оно неограниченно простирается в горизонтальной плоскости. По всему озеру обитают слепые головастики, они проводят здесь всю жизнь, не видя света, но отлично пользуются звуком для локации предметов и общения. Есть одно нерушимое правило: ничто не может двигаться в воде быстрее, чем со скоростью звука. Для большинства задач это ограничение скорости несущественно, поскольку головастики движутся гораздо медленнее.

* Я предполагаю, что лифт достаточно мал, чтобы пренебречь приливными силами.

Но в озере есть опасность. Многие головастики обнаруживают ее слишком поздно, чтобы спастись, и никто еще не возвращается назад, чтобы рассказать, что с ним случилось. В центре озера находится сточное отверстие. Вода через него попадает в подземную пещеру, где разбивается о смертельно острые скалы.



Если взглянуть на озеро сверху, то видно, что вода движется к стоку. Вдали от него скорость воды необнаружимо мала, но чем ближе, тем она становится больше. Предположим, что сток отводит воду так быстро, что на некотором расстоянии ее скорость достигает скорости звука. Еще ближе к стоку течение становится сверхзвуковым. Это действительно очень опасный сток.

Плавающие в воде головастики, знакомые только со своей жидкой средой обитания, никогда не знают, насколько быстро они в действительности движутся; все вокруг них утягивается водой с одной и той же скоростью. Большая опасность состоит в том, что их может затянуть в сток и они погибнут на острых камнях. В действительности, как только один из них пересек радиус, на котором скорость течения превышает звуковую, он обречен. Пройдя эту точку невозврата, он не сможет ни преодолеть течение, ни даже послать предупреждение другим, кто еще находится в безопасной области (никакой акустический сигнал не может двигаться в воде быстрее звука). Унру называет такое сточное отверстие и его точку

невозврата *глухой дырой* — глухой в смысле молчащей, поскольку никакой звук выйти из нее не может.

Одно из самых интересных свойств точки невозврата состоит в том, что неосторожный наблюдатель, проплывая через нее, поначалу не заметит ничего необычного. Нет никаких предупреждающих указателей или сирен, нет препятствий, которые могли бы остановить его, ничто не подскажет ему о надвигающейся опасности. В какой-то момент кажется, что все замечательно, и в следующий момент — тоже. Прохождение точки невозврата — это не-событие.

И вот свободно дрейфующий головастик по имени Алиса плывет к стоку, напевая песенку для своего приятеля Боба, оставшегося на отдалении. Как и у всех ее слепых сородичей, у Алисы, довольно бедный репертуар. Единственная нота, которую она может петь, — это «до» средней октавы с частотой 262 колебания в секунду, или, на техническом языке, 262 герца (Гц)*. Пока Алиса находится вдали от стока, ее движение почти неощутимо. Боб прислушивается к звуку Алисиного голоса и слышит «до» первой октавы. Но когда Алиса набирает скорость, звук становится ниже, по крайней мере в восприятии Боба; «до» сменяется на «си», потом на «ля». Вызвано это так называемым доплеровским сдвигом, его можно заметить, когда мимо вас проходит скорый поезд со включенным свистком. Пока поезд приближается, звук свистка кажется вам более высоким, чем машинисту в кабине. Когда же свисток проходит мимо вас и начинает удаляться, звук понижается. Каждое последующее колебание вынуждено проходить немного больший путь, чем предыдущее, и оно достигает вашего уха с небольшой задержкой. Время между последовательными звуковыми колебаниями увеличивается, и вы слышите более низкую частоту. Более того, если поезд, удаляясь от вас, набирает скорость, то воспринимаемая частота будет становиться все ниже и ниже.

То же самое происходит с музыкальной нотой Алисы по мере приближения к точке невозврата. Сначала Боб слышит частоту 262 Гц. Потом она снижается до 200 Гц, затем до 100 Гц, до 50 Гц и т. д.

* Единица частоты герц названа в честь немецкого физика Генриха Герца. Один герц — это то же самое, что одно колебание в секунду.

Звуку, испущенному совсем рядом с точкой невозврата, понадобится очень много времени, чтобы уйти прочь; движение воды почти полностью гасит направленную наружу скорость звука, замедляя его почти до полной остановки. Вскоре звук становится таким низким, что без специального оборудования Боб уже не может его расслышать.

У Боба может быть специальное оборудование, позволяющее фокусировать звуковые волны и получать изображения Алисы по мере ее приближения к точке невозврата. Но последовательным звуковым волнам требуется все больше и больше времени, чтобы дойти до Боба, из-за чего все, что касается Алисы, выглядит замедленным. Ее голос становится ниже; движения ее лапок замедляются почти до полной остановки. Самый последний взмах, замеченный Бобом, растягивается до бесконечности. Фактически Бобу кажется, что для достижения точки невозврата Алисе понадобится вечность.

Между тем Алиса не замечает ничего необычного. Она безмятежно дрейфует за точку невозврата, не чувствуя никакого замедления или ускорения. Опасность она осознает только потом, уже падая на смертоносные скалы. Здесь мы видим одну из ключевых особенностей черных дыр: разные наблюдатели парадоксальным образом совершенно по-разному воспринимают одни и те же события. Бобу, судя по приходящим звукам, кажется, что Алисе потребуется вечность, чтобы достичь точки невозврата, но для Алисы это может случиться в мгновение ока.

Вы уже наверняка догадались, что точка невозврата — это аналог горизонта черной дыры. Замените звук светом (напоминаю, ничто не может двигаться быстрее света), и получится очень точная иллюстрация свойств шварцшильдовской черной дыры. Как и в случае сточного отверстия, все, что пересекло горизонт, уже не может вырваться назад или даже оставаться в покое. Опасность же в черной дыре — это не острые скалы, а находящаяся в центре сингулярность. Вся материя внутри горизонта стягивается к сингулярности, где ее сожмет до бесконечного давления и плотности.

Вооружившись аналогией глухой дыры, можно прояснить для себя многие парадоксальные свойства черных дыр. Пусть, например, Боб уже не головастик, а астронавт на космической станции,

обращающейся на безопасном расстоянии вокруг черной дыры. Алиса же, падая к горизонту, не поет — в открытом космосе нет воздуха, чтобы донести ее голос, — а подает сигналы голубым фонариком. По мере ее падения Боб видит, как свет смещается по частоте от голубого к красному, затем к инфракрасному, микроволновому излучению и, наконец, становится низкочастотными радиоволнами. Сама же Алиса выглядит все более вялой, замедляясь почти до полной остановки. Боб никогда не увидит, как она пересекает горизонт; с его точки зрения, на то, чтобы достичь точки невозврата, Алисе понадобится бесконечное время. Но Алиса в своей системе отсчета спокойно проваливается сквозь горизонт и начинает чувствовать что-то странное, лишь приближаясь к сингулярности.

Горизонт шварцшильдовской черной дыры располагается на радиусе Шварцшильда. Хотя Алиса и обречена после его пересечения, тем не менее у нее остается, как и у головастика, немного времени, прежде чем она погибнет в сингулярности. Но сколько именно? Это зависит от размера, то есть от массы, черной дыры. Чем больше масса, тем больше шварцшильдовский радиус и тем больше времени в запасе у Алисы. В черной дыре с массой Солнца у нее будет всего лишь десять микросекунд. В черной дыре, которая располагается в центре галактики и может иметь массу в миллиард раз больше, у Алисы будет миллиард микросекунд, то есть примерно полчаса. Можно вообразить еще более крупную черную дыру, в которой Алиса сможет прожить целую жизнь и, возможно, даже несколько поколений ее потомков успеют состариться и умереть, прежде чем их уничтожит сингулярность.

Разумеется, по наблюдениям Боба, Алиса никогда не доберется до горизонта. Так кто же прав? Достигнет она горизонта или нет? Что реально происходит? И *реально* ли это? В конце концов, физика — это наблюдательная и экспериментальная наука, так что можно было бы отдать предпочтение надежным наблюдениям Боба, пусть они и находятся в очевидном противоречии с Алисиным описанием событий. (Мы еще вернемся к Алисе и Бобу после того, как обсудим удивительные квантовые свойства черных дыр, открытые Якобом Бекенштейном и Стивеном Хокингом.)

Аналогия со стоком хороша для многих целей, но, как и все аналогии, имеет свои границы. Например, когда объект проваливается сквозь горизонт, его масса добавляется к массе черной дыры. Рост массы означает расширение горизонта. Это, несомненно, можно смоделировать в аналогии со сточным отверстием, скажем, установив в нем насос для управления потоком. Каждый раз, когда в сток что-то падает, насос должен немного повышать мощность, ускоряя поток и отодвигая точку невозврата немного дальше. Но такая модель быстро теряет свою простоту*.

Еще одно свойство черных дыр заключается в том, что они сами способны двигаться. Если поместить черную дыру в гравитационное поле другой массы, она будет ускоряться, как и любой другой массивный объект. Она даже может упасть в более крупную черную дыру. Если попытаться отразить все эти свойства реальных черных дыр в аналогии со сточным отверстием, она станет сложнее той математики, применения которой она позволяет избежать. Но, несмотря на эти ограничения, сток — это очень полезное представление, позволяющее понять основные свойства черных дыр без овладения уравнениями общей теории относительности.

Несколько формул для тех, кто их любит

Я написал эту книгу для читателей, не склонных к математике, однако для тех, кому по душе немного математических выкладок, здесь приведено несколько формул и пояснен их смысл. Если вам это неинтересно, просто переходите к следующей главе. Это же не экзамен.

Согласно ньютоновскому закону тяготения, каждый объект во Вселенной притягивает все другие объекты, причем сила гравитации пропорциональна произведению их масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = \frac{mMG}{D^2}.$$

* Профессор Джордж Эллис напомнил мне об одной тонкости, связанной с переменным потоком. В этом случае точка невозврата не совпадает в точности с тем местом, где скорость воды совпадает со скоростью звука. В случае черных дыр существует аналогичная тонкая разница между видимым горизонтом видимости и истинным.

Это одно из самых знаменитых физических уравнений, оно почти так же широко известно, как и $E = mc^2$ (это прославленное уравнение связывает энергию E с массой m и скоростью света c).

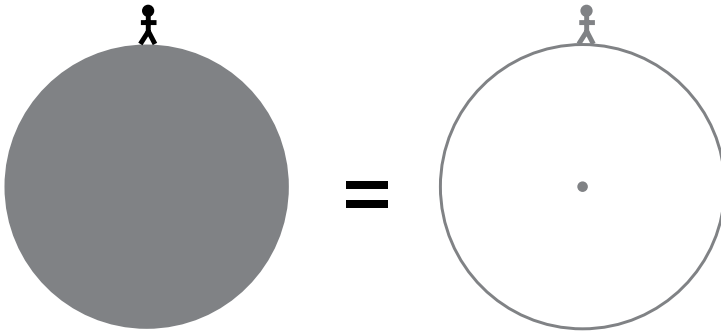
В левой части стоит сила F , действующая между двумя массами, такими как Луна и Земля или Земля и Солнце. С правой стороны большая масса M и меньшая масса m . Например, масса Земли 6×10^{24} кг, а масса Луны — 7×10^{22} кг. Расстояние между массами обозначено D . Расстояние от Земли до Луны составляет около 4×10^8 м.

Последнее обозначение в уравнении, G , — это числовая константа, называемая ньютоновой гравитационной постоянной. Эту величину нельзя вывести чисто математически. Чтобы найти ее значение, необходимо измерить силу притяжения между двумя известными массами, находящимися на некотором известном расстоянии. Как только это сделано, можно вычислить силу, действующую между любыми двумя массами на любом расстоянии. По иронии судьбы, Ньютон так никогда и не узнал величину своей собственной постоянной. Дело в том, что гравитация так слаба, а величина G , соответственно, так мала, что измерить ее не удавалось до конца XIX столетия. К тому времени английский физик Генри Кавендиш разработал хитроумный способ измерения чрезвычайно малых сил. Кавендиш обнаружил, что сила, действующая между парой килограммовых масс, разнесенных на один метр, составляет примерно $6,7 \times 10^{-11}$ ньютона. (Ньютон — это единица силы в метрической системе Си. Она составляет примерно десятую долю веса одного килограмма.) Таким образом, значение гравитационной постоянной в системе Си составляет:

$$G = 6,7 \times 10^{-11}.$$

Изучая следствия из своей теории, Ньютон совершил одно важное открытие, касающееся особых свойств закона обратных квадратов. Когда вы измеряете собственный вес, часть гравитационной силы, тянущей вас к Земле, вызвана массой, находящейся прямо у вас под ногами, еще часть связана с массой глубоко внутри Земли, а часть составляет вклад масс на противоположной стороне Земли на расстоянии в 12,5 тысячи километров. Но благодаря математическому

чуду можно считать, будто вся масса сосредоточена в одной точке непосредственно в геометрическом центре планеты.



Гравитация массивного шара точно такая же, как если бы вся масса была сосредоточена в его центральной точке

Этот удобный факт позволил Ньютону вычислять скорость убегания от крупного объекта, заменяя его протяженную массу крошечной массивной точкой. И вот результат:

$$\text{скорость убегания} = \sqrt{2MG / R} .$$

Эта формула четко показывает, что чем больше масса и меньше радиус R , тем выше становится скорость убегания.

Теперь уже легко вычислить радиус Шварцшильда R_s . Все, что нужно для этого сделать, — это подставить скорость света в качестве скорости убегания и затем разрешить полученное уравнение относительно радиуса:

$$R_s = \frac{2MG}{c^2} .$$

Отметим тот важный факт, что радиус Шварцшильда прямо пропорционален массе.

Вот и все, что касается темных звезд, по крайней мере на том уровне, который был доступен Лапласу и Митчелу.