

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, преодолевать 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 превосходила скорость света.

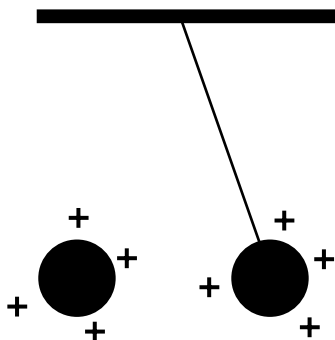
Когда Митчел и Лаплас впервые высказали эти пророческие мысли, скорость света (обозначаемая буквой c) была известна уже более ста лет. Датский астроном Оле Рёмер в 1676 году определил, что она составляет колоссальную величину — 300 000 км (это примерно семь оборотов вокруг Земли) за одну секунду:

$$c = 300\,000 \text{ км/с.}$$

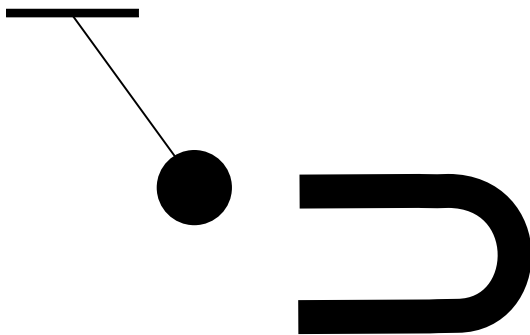
При такой колоссальной скорости, чтобы удержать свет, требуется чрезвычайно большая или чрезвычайно сконцентрированная масса, однако нет видимых причин, по которым такой не могло бы существовать. В докладе Митчела Королевскому обществу впервые упоминаются объекты, которые Джон Уилер впоследствии назовет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

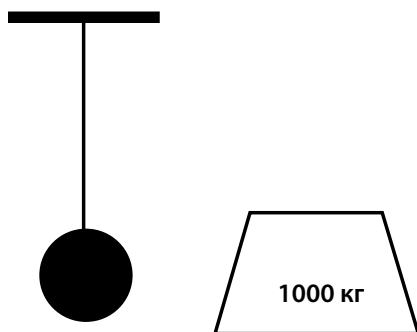
с небольшого веса: пусть это будет маленький шарик пенопласта. Тем или иным способом придадим ему статический электрический заряд. (Можно просто потереть его о свитер.) Теперь подвесим его к потолку на нитке. Когда он перестанет крутиться, нить будет висеть вертикально. Теперь поднесите к висящему шарiku 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 десятичной 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.

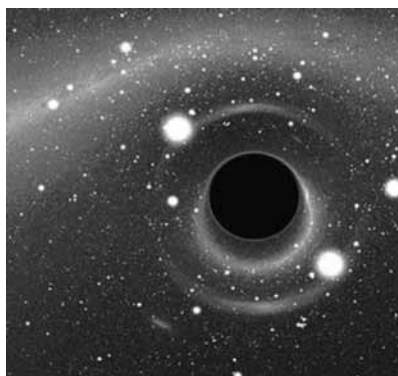
Но Солнце не будет вечно сохранять свой нынешний размер. В конце концов звезда исчерпает запасы топлива, и распирающее ее давление, поддерживаемое внутренним теплом, ослабнет. Подобно гигантским тискам, гравитация начнет сжимать звезду до малой доли ее первоначального размера. Где-то через пять миллиардов 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,



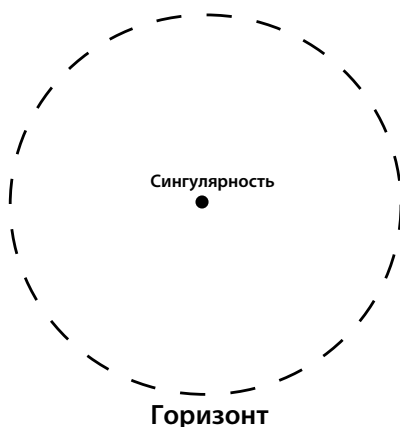
Компьютерная модель черной дыры в 10 солнечных масс

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 затянут 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 тысящей 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.

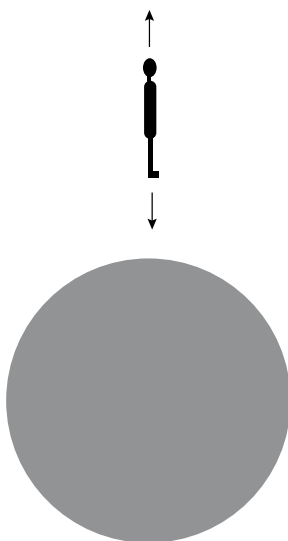
Пропорциональность между массой и радиусом Шварцшильда — первое, что физики узнали о черных дырах. Земля примерно в миллион раз менее массивна, чем Солнце, поэтому ее шварцшильдовский радиус в миллион раз меньше солнечного. Для превращения в темную звезду ее пришлось бы сжать до размеров клюквины. Для 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.

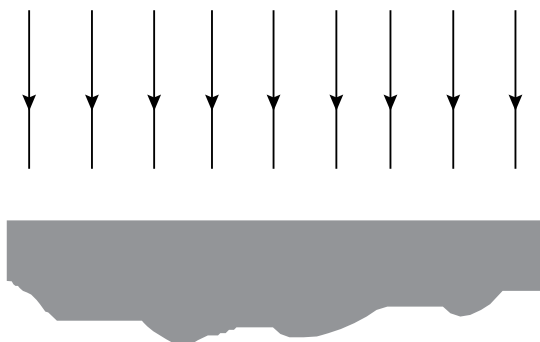
Представьте себе гиганта, ростом от темечка до пяток в 2000 миль (3200 км), который падает ногами вперед из космоса на Землю. Далеко в открытом космосе гравитация слаба, так слаба, что он ничего не чувствует. Однако по мере приближения к Земле в его длинном теле возникает странное ощущение: но это не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



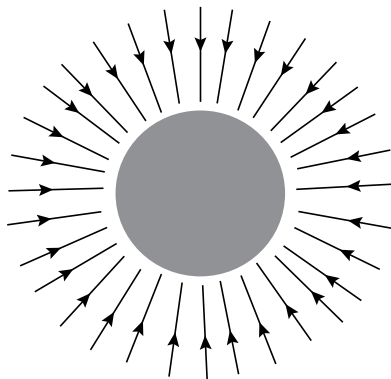
Пожалуй, он мог бы избежать растяжения, падая в горизонтальном положении, так, чтобы ноги и голова были на одной высоте. Но когда гигант это попытается, то столкнется с другим неудобством: чувство натяжения сменяется равным чувством сжатия. Он чувствует, что его голова придавливается к ногам.

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

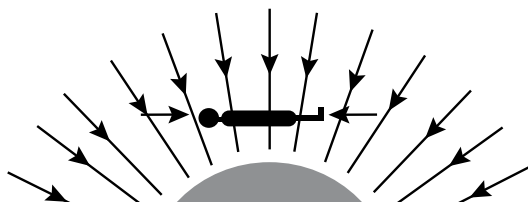


Более того, сила гравитационного притяжения совершенно одинакова. У 2000-мильного человека в таких условиях не было бы проблем, падай он в вертикальном положении или в горизонтальном, — по крайней мере, пока он не долетит до земли.

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.

