

Содержание

Предисловие	11
Часть I. Свидетельства существования черных дыр, больших и маленьких	15
1. Сердце тьмы	17
Английский священник выдумывает темные звезды	18
Вклад великого французского математика	20
Понимание ткани пространства и времени	22
Сингулярность и внезапно прерванная жизнь	29
Повелитель сжатий и расширений	31
Поиск названия для непостижимого	34
Гений сражается с гравитацией и болезнью	37
Пари о черных дырах	44
Золотой век теории черных дыр	48
2. Черные дыры, рожденные смертью звезд	53
Силы света и тьмы	54
Гравитация и тьма окончательно побеждают	57
Поиски первого черного лебедя	63
Как взвесить невидимого партнера по вальсу	67
Подлинные черные дыры	70
Использование гравитационной оптики	76
Физика на краю Мальстрема	79
Экскурсия в бестиарий двойных звезд	83
3. Сверхмассивные черные дыры	89
Единственный радиоастроном в мире	90
Галактики с яркими ядрами	93
Радиоастрономия достигает зрелости	96
Астроном из Нидерландов открывает квазары	103
Астрономы коллекционируют далекие светящиеся точки	107
Выдвижение гипотезы о массивных черных дырах	112
Картирование радиоджетов и лепестков	114
«Зоопарк» активных галактик	120
Вопрос восприятия	125

4. Гравитационные двигатели	129
Большая черная дыра по соседству	130
Звезды на краю бездны	136
Темное ядро в каждой галактике	139
Рис, барон из Ладлоу, укрощает чудовище	144
Как изучать Вселенную с помощью квазаров	148
Черные дыры: счет на тысячи	152
Энергия аккреции в космосе	161
Массивные черные дыры — не страшные	165

Часть II. Черные дыры: прошлое, настоящее и будущее **169**

5. Жизнь черных дыр	171
Семена Вселенной	172
Первый свет и первая тьма	174
Рождение черной дыры в звездном катаклизме	179
Поиск недостающих звеньев	185
Компьютерное моделирование экстремальной гравитации	190
Как растут черные дыры и галактики	198
Вселенная как черная дыра	204
Лабораторная черная дыра	206
6. Черные дыры как проверка теории гравитации	211
Гравитация от Ньютона до Эйнштейна и далее	212
Как черные дыры влияют на пространство-время	218
Как черные дыры влияют на излучение	223
По ту сторону железного занавеса	229
Рентгеновское мерцание на краю бездны	231
Когда черная дыра съедает звезду	234
Swift J1644+57: возникновение релятивистского джета	235
Вращение черной дыры	238
Телескоп горизонта событий	243
7. Учимся смотреть глазами гравитации	249
Видеть Вселенную по-новому	250
Колебания пространственно-временного континуума	255
Эксцентричный миллионер и инженер-одиночка	259
Когда сталкиваются черные дыры	266

Самый точный прибор в истории	270
Познакомьтесь с мастером гравитации	279
Взгляд на Вселенную глазами гравитации	283
Столкновения и слияния массивных черных дыр	290
Гравитация и Большой взрыв	294
8. Судьба черных дыр	299
Новая эпоха изучения гравитации	300
Квазар у нас под боком	306
Слияние с Андромедой	309
Самые большие черные дыры во Вселенной	313
Эра звездных остатков	319
Будущее испарение и распад	321
Жизнь среди черных дыр	324
Благодарности	333
Примечания	334

*О звезды, с неба не струите света
Во мрак бездонный замыслов Макбета!**

Уильям Шекспир. Макбет. Акт 1, сцена 4

* Пер. Ю. Корнеева.

Предисловие

Черные дыры — самые известные и самые загадочные объекты Вселенной. Используя этот термин в обычной жизни, мы представляем нечто втягивающее в себя все вокруг. О черных дырах говорят в фильмах и романах, этот образ освоила и поп-культура. Черная дыра стала олицетворением тайны — зловещей тайны. Я метафорически называю их «чудовища Эйнштейна». Это мощные силы, не подвластные никому. Черные дыры придумал не Эйнштейн, но именно он предложил лучшую на сегодняшний день теорию гравитации, которую мы используем для того, чтобы понять их суть¹.

Распространенное среди большинства людей понимание черных дыр в корне неверно. Это не космические пылесосы, поглощающие все вокруг. Черные дыры лишь искривляют пространство и время в непосредственной близости у горизонта событий. На черные дыры приходится малая доля массы Вселенной, и ближайшие находятся в квинтиллионах километров от нас. Едва ли их можно использовать для путешествий во времени или полетов в другие вселенные. Мало того, черные дыры — даже не черные! Они испускают поток излучения и элементарных частиц и, по сути, являются частями бинарных систем, в которых газ, падающий в черную дыру, нагревается и ярко светится. Черные дыры необязательно опасны. Оказавшись в центре одной из многочисленных галактик, вы провалитесь в черную

дыру и, скорее всего, ничего не почувствуете, хотя вряд ли вам удастся рассказать об увиденном.

Эта книга познакомит вас с черными дырами, большими и малыми. Черные дыры кажутся простыми объектами, но математика, необходимая для их понимания, невероятно сложна. Мы познакомимся с учеными, рассказавшими человечеству о черных дырах: от смелых мыслителей прошлого, которые сотни лет назад задумались о существовании черных звезд, до физиков, ломающих голову над общей теорией относительности — и не только.

Понять, что такое черные дыры, невозможно без общей теории относительности Эйнштейна, разработанной более 100 лет назад. Согласно этой теории, пространство и время искривляются материей. В случаях экстремально высокой концентрации массы область пространства буквально «выдавливается» из Вселенной и ничто не может прорваться наружу, даже свет. Это и есть черные дыры. Однако сам Эйнштейн сомневался в их реальности. И не он один — многие выдающиеся физики оспаривали их существование.

Тем не менее они существуют. В течение 40 лет накапливались доказательства того, что никакие силы природы не могут противостоять гравитационному коллапсу ядра умершей массивной звезды. Газовый шар — в десятки раз больше Солнца — схлопывается в темный объект размером с небольшой городишко. Не так давно выяснилось, что в центре каждой галактики имеется массивная черная дыра — массы таких дыр могут различаться в миллиарды раз.

Изучая «места обитания» черных дыр, мы познакомимся с бинарными системами, где черная дыра кружится в гравитационном вальсе с нормальной звездой. Мы узнаем, что самое убедительное доказательство существования черных дыр находится в центре нашей Галактики, где десятки

звезд роятся, как разъяренные пчелы, вокруг темного объекта весом 4 млн солнечных масс. Когда массивные черные дыры, имеющиеся во всех галактиках, выходят из спячки и начинают расти, их видно с расстояния в миллиарды световых лет. Эти гравитационные механизмы являются самыми мощными источниками излучения во Вселенной.

Недавно физики научились смотреть «глазами гравитации», регистрируя гравитационные волны. При столкновении две черные дыры вызывают колебания пространственно-временного континуума, распространяющиеся повсюду со скоростью света и несущие информацию о случившейся катастрофе. Появился новый метод изучения черных дыр — как и любых других ситуаций, для которых характерна сильная и изменчивая гравитация. Существование гравитационных волн доказывает — если вам еще нужны какие-то доказательства — тот факт, что природа создает черные дыры. Каждые пять минут где-то во Вселенной сливается пара черных дыр, и гравитационные волны распространяются по космосу.

Наши знания о черных дырах все еще довольно скудны. Эти объекты продолжают изумлять и восхищать нас. Благодаря черным дырам появляются новые способы проверки общей теории относительности. Никто не знает, подтвердится ли в итоге теория — или будет опровергнута. Вопросы, касающиеся потери информации в черных дырах, ее возможного кодирования на горизонте событий вызывают яростные споры. С помощью черных дыр физики-теоретики надеются подтвердить теорию струн, завершить наконец попытку Эйнштейна объединить квантовую механику и общую теорию относительности.

Книга состоит из двух частей. В первой рассматриваются доказательства существования черных дыр всех размеров: от тех, что слегка больше Солнца, до гигантов массой

с небольшую галактику. Вторая часть рассказывает о том, как рождаются и умирают черные дыры. В ней также приведено объяснение того, насколько применимы к небесным объектам наши теории природы. Рассказы о черных дырах перемежают и некоторые частные истории, в том числе и мои собственные, и их цель — напомнить нам, что ученые — это люди из плоти и крови, со своими недостатками и слабостями. Описываемая мною область науки стремительно развивается. И потому некоторые изыскания, приведенные в этой книге, могут не выдержать испытания временем. По этой причине могут возникнуть ошибки, упущения и неверные сведения — и я отношу их исключительно на свой счет.

Можно представить, что разумные жители миллиардов обитаемых миров логически пришли к выводу о существовании черных дыр. Возможно, некоторые научились создавать их и пользоваться их энергией. Мы, люди, хоть и молодой биологический вид, но с гордостью причисляем себя к избранным, постигшим тайны черных дыр.

Крис Импи,
Таксон, Аризона,
апрель 2018 г.

часть I

**Свидетельства
существования
черных дыр, больших
и маленьких**

Откуда ученые взяли идею черной дыры? В этой части книги мы рассмотрим, как развивалась научная мысль: начнем с ньютоновской теории гравитации и продолжим обсуждение теории общей относительности Эйнштейна. Сегодня мы знаем, что у черной дыры есть два основных компонента: горизонт событий, действующий как информационный барьер, и сингулярность — центральная точка бесконечной плотности вещества. Многие выдающиеся физики, включая самого Эйнштейна, противились самой мысли о столь причудливом состоянии материи. Но тем не менее было доказано, что ядро массивной звезды может коллапсировать до плотности, не пропускающей ни частицы, ни излучение.

Если бы физики-теоретики довольствовались красотой математического аппарата общей теории относительности, они не сомневались бы в существовании черных дыр. Однако наука эмпирична. Астрономы решили выследить этого неуловимого зверя. Но только после появления рентгеновской астрономии — и спустя десятилетие после смерти Эйнштейна — ученые сумели разглядеть горячий аккреционный диск и двойные релятивистские джеты, образующиеся при поглощении черной дырой газа из окружающего пространства Вселенной. Сложно охотиться за мертвыми темными звездами. За 50 лет работы удалось обнаружить лишь три десятка остатков звезд, которые однозначно можно считать черными дырами. Это ближайшие из предположительно десяти миллионов черных дыр, разбросанных по галактике Млечный Путь. И такие свидетельства копились и систематизировались — в итоге астрономы пришли к удивительному открытию: оказалось, что в центрах галактик прячутся массивные черные дыры. И, поглощая материю, они становятся самыми яркими объектами во Вселенной.

Сердце тьмы

Ученые — оптимисты. Они верят в предсказательную силу теорий, например теории относительности и естественного отбора. Они полагают, что стремительное развитие физики, астрономии и биологии — чему мы были свидетелями в течение нескольких десятилетий — продолжится и тогда наука сможет объяснить непознанное в мире природы.

Но что, если на пути ученых возникнет непреодолимое препятствие? Возможно ли, чтобы космос прятал от нашего пытливого взгляда, допустим, криптообъекты? Более того, что, если таинственные сущности, о которых мы имеем представление благодаря выдающимся теориям в сфере физики, продемонстрировали бы свойства, ставящие под сомнение верность этих теорий? Добро пожаловать в мир черных дыр.

Английский священник выдумывает темные звезды

По воспоминаниям современников, Джон Мичелл был «маленьким, толстым темнолицым коротышкой». Большую часть сознательной жизни он прослужил приходским священником в маленьком городке на севере Англии. Однако в его доме часто бывали знаменитые мыслители той эпохи, такие как Джозеф Пристли, Генри Кавендиш и Бенджамин Франклин, поскольку Мичелл был к тому же разносторонним и успешным ученым. История недооценила этого скромного человека, жившего тихой жизнью священника.

В Кембриджском университете Мичелл изучал — а позднее и преподавал — математику, а также древнегреческий и древнееврейский языки. Он заложил основы сейсмологии, выдвинув предположение, что землетрясения в толще Земли распространяются в виде волн. Это открытие стало для него пропуском в Королевское научное общество. Именно Мичелл разработал оборудование для эксперимента, впоследствии позволившее Генри Кавендишу измерить гравитационную постоянную — фундаментальную физическую константу, лежащую в основе любых расчетов силы гравитации. Мичелл же первым применил статистические методы в астрономии в попытке доказать, что многие наблюдаемые пары и группы звезд связаны физически, а не просто случайно оказались рядом на ночном небе¹.

В полную силу научное провидение Мичелла реализовалось в его предположении, что некоторые звезды имеют мощнейшую гравитацию — непреодолимую даже для света. Он описал эту идею в статье 1784 г. с неудобочитаемым названием «О средствах открытия удаленности, величины и прочего неподвижных звезд посредством уменьшения скорости их света в случае, если будет обнаружено, что

такое уменьшение имеет место для любой из них, и если будут получены путем наблюдения другие данные, необходимые для этой цели»².

Для пересказа статьи понадобится немногим больше слов, чем использовано в ее названии. Мичелл принял идею второй космической скорости и тот факт, что она определяется массой и размером звезды. Как и Исаак Ньютон, он полагал, что свет — это частица, и, решив, что свет замедляется гравитацией звезды, он задумался: что, если звезда настолько массивна, а ее гравитация настолько сильна, что вторая космическая скорость равна скорости света? На основе этого Мичелл предположил, что существует множество «темных звезд», которые невозможно обнаружить, потому что их не покидает свет³.

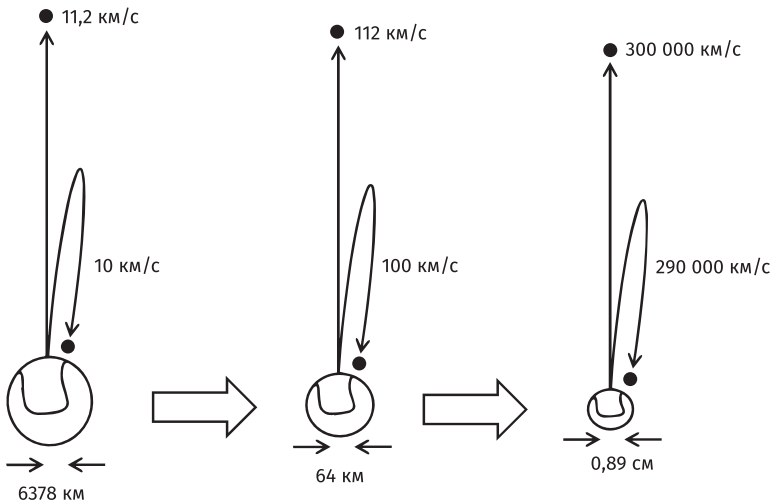
Рассуждения Мичелла были ошибочны — но только потому, что он работал с ньютоновской физикой. В 1887 г. Альберт Майкельсон и Эдвард Морли доказали, что свет всегда распространяется с одинаковой скоростью, независимо от движения Земли⁴. Лишь в 1905 г. Эйнштейн положил это открытие в основу своей специальной теории относительности, предположив, что скорость света не зависит от локальной силы гравитации. Ошибочным было и предположение Мичелла о том, что темные звезды в 500 раз больше Солнца, но имеют такую же плотность. Настолько массивных звезд просто не существует. Экстремальные эффекты гравитации проявляются лишь при высокой плотности, что случается, когда звезда типа Солнца сжимается до крошечных объемов.

Вклад великого французского математика

Спустя десятилетие после того, как Мичелл выдвинул свое предположение о темных звездах, французский ученый и математик Пьер-Симон Лаплас высказался на ту же тему в своей книге «Изложение системы мира»*. Лаплас был более известен, чем Мичелл, — он значился президентом Института Франции и советником Наполеона, удостоился титула графа, а затем маркиза. Как и Мичелл, Лаплас изучал теологию и происходил из религиозной семьи, но зов математики оказался сильнее зова Бога.

Лаплас, очевидно, не знал о работе Мичелла. В двухтомном труде по астрономии он кратко упоминает идею темной звезды, и, по его мнению, гравитация этой гипотетической звезды намного сильнее, чем у Солнца: «...Следовательно, не исключено, что самые большие из светящихся тел являются по этой причине невидимыми». Коллега потребовал у Лапласа математическое доказательство этой гипотезы, и три года спустя, в 1799 г.⁵, оно было представлено. Расчеты Лапласа — как и расчеты Мичелла — оказались ошибочными, причем по одной и той же причине. Самой плотной субстанцией, известной в те времена, было золото — в пять раз плотнее Земли и в 14 раз плотнее Солнца. Вероятно, ученый того времени с трудом мог представить, каким будет состояние в миллионы раз более плотной материи, а это необходимо для современного понимания черной дыры (илл. 1). В 1799 г. Томас Юнг сумел доказать, что свет ведет себя как волна, но то, что гравитация может замедлить волну, представлялось невероятным. Возможно, именно поэтому Лаплас исключил всякое

* Лаплас П.С. Изложение системы мира. — Л.: Наука, 1982.



Илл. 1. Концепция черной дыры на основе теории гравитации Ньютона. Вторая космическая скорость для Земли равна 11 км/с; любой объект, запущенный с этой скоростью, преодолевает силу гравитации Земли. Если Земля сожмется в 100 раз, вторая космическая скорость увеличится до 110 км/с. Если бы Землю удалось сжать до радиуса 0,89 см, возникла бы черная дыра. Тогда вторая космическая скорость сравнялась бы со скоростью света. Джон Д. Нортон / Питтсбургский университет

упоминание о темных звездах из последующих изданий своей книги.

Концепция черных дыр не могла появиться без новой теории гравитации. Теория Ньютона проста: пространство равномерно и линейно и простирается бесконечно во всех направлениях. Время равномерно и линейно и течет в бесконечное будущее. Пространство и время самостоятельны и независимы. Звезды и планеты движутся в пустом пространстве, управляемые силой, которая зависит от их масс и расстояний между ними. Такова красивая модель Вселенной Ньютона⁶.

Ричард Уэстфолл, биограф Ньютона, и сам был блестящим ученым. Он сказал: «Окончательный результат моего изучения Ньютона привел меня к убеждению, что к нему неприменима никакая мерка. Он стал для меня совершенно особым человеком, одним из малого числа величайших гениев, определивших категории человеческого интеллекта, человеком, неподвластным критериям, по которым мы оцениваем своих ближних»⁷. Однако даже Ньютон — со своим исключительным мышлением — не сумел до конца разгадать загадку гравитации. Он не мог объяснить, каким образом она работает в вакууме, будучи невидимой и действуя мгновенно. Ньютон признал это в своем великом труде о гравитации «Математические начала натуральной философии» (1687)*: «Я не смог обнаружить причины этих свойств гравитации в наблюдаемых феноменах, и я не формулирую никакой гипотезы».

Понимание ткани пространства и времени

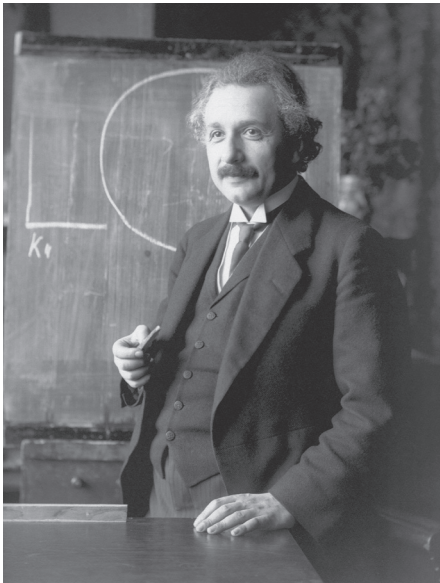
Альберт Эйнштейн, 26-летний клерк патентного бюро в Берне, опроверг систему Ньютона. В 1905 г. Эйнштейн написал четыре статьи, которым суждено было изменить устоявшиеся представления о физике⁸. В одной из статей он рассмотрел фотоэлектрический эффект — высвобождение электронов под воздействием солнечного света на вещество. Он утверждал, что свет ведет себя как частица, перенося энергию дискретными порциями — квантами. Именно эта работа принесла Эйнштейну Нобелевскую премию, а не его более знаменитые теории относительности (илл. 2).

* Ньютон И. Математические начала натуральной философии. — М.: Наука, 1989.

Эксперименты Томаса Юнга и других ученых достоверно подтвердили, что для света характерны явления дифракции и интерференции, и физикам пришлось согласиться с тем, что свет одновременно подобен и волне, и частице.

В другой небольшой статье было предложено самое краткое уравнение физики: $E = mc^2$. Это означает, что масса и энергия эквивалентны и взаимозаменяемы. Поскольку скорость света с очень велика, крохотная масса может быть превращена в колоссальную энергию. Масса представляет собой своего рода «замороженную» форму энергии — этим объясняется невероятная мощь ядерного оружия. И наоборот, энергии соответствует крохотная эквивалентная масса. Согласно этому уравнению, фотоны действительно могут испытывать влияние гравитации.

В третьей статье изложена специальная теория относительности. Теория строится на идее Галилея, гласящей, что



Илл. 2. Альберт Эйнштейн в 1921 г., через пять лет после опубликования общей теории относительности. Его теория — радикальный прорыв после ньютоновской гравитации, опирающейся на линейный и абсолютный характер пространства и времени. В общей теории относительности пространственно-временной континуум искривляется находящимися в нем массой и энергией. Фердинанд Шмутцер

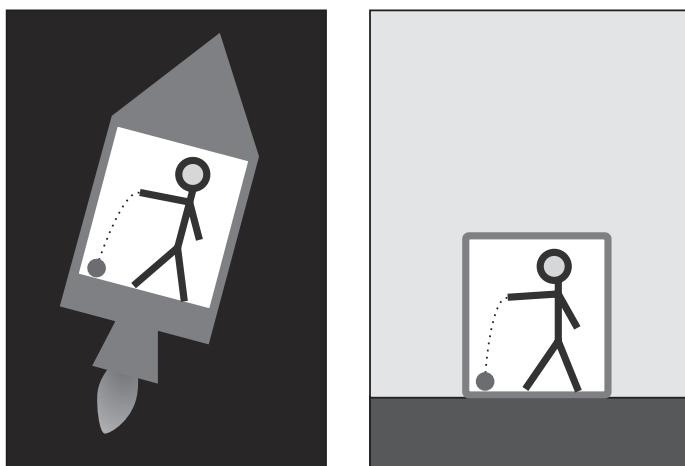
законы природы должны быть одинаковыми для всех наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью относительно друг друга. Эйнштейн добавляет второе положение: скорость света не зависит от движения наблюдателя. Второе положение является фундаментальным, в подтверждение его можно провести мысленный эксперимент⁹. Вы направляете свет фонарика в сторону человека, находящегося очень далеко от вас. Он отмечает, что фотоны движутся к нему со скоростью 300 000 км/с — скоростью света. Предположим, теперь вы мчитесь навстречу ассистенту со скоростью, равной половине скорости света. Он по-прежнему будет наблюдать фотоны, движущиеся со скоростью света, а не со скоростью 450 000 км/с. Теперь предположим, что вы удаляетесь с той же огромной скоростью, — и снова наблюдаемые фотоны летят со скоростью света, а не со скоростью 150 000 км/с. Свет не подчиняется простой арифметике. Скорость света — универсальная постоянная, что подразумевает весьма важные выводы. Скорость есть расстояние, деленное на время; если скорость постоянна, то пространство и время должны изменяться. Когда объекты перемещаются очень быстро и приближаются к скорости света, они сжимаются в направлении движения и их время замедляется. Теория Эйнштейна утверждает, что свет — самое быстрое, что есть во Вселенной, и из этого следует, что объекты становятся массивнее, приближаясь к скорости света, что увеличивает их инерцию, вследствие чего они так и не смогут достичь или превзойти скорость света.

Но даже столь блестящая работа была для Эйнштейна лишь разминкой перед эпохальным трудом — общей теорией относительности. Общая теория позволила ученому перейти от идеи постоянного движения к движению с ускорением с учетом гравитации, отталкиваясь от другой догадки Галилея. Энциклопедист эпохи Возрождения доказал,

что все объекты падают с одной и той же скоростью, независимо от массы. Это значит, что инертная масса (сопротивление объекта изменению его движения) равна гравитационной массе (тому, как объект реагирует на силу гравитации). Для Галилея это было случайным и необъяснимым совпадением, в котором Эйнштейн усмотрел ключ к новому пониманию гравитации.

Представьте, что находитесь в закрытом лифте, стоящем на первом этаже. Вы ощущаете свой нормальный вес; любой предмет, который вы уроните, ускорится до $9,8 \text{ м/с}^2$. Так работает гравитация. Теперь представьте себя в герметичном ящике в космосе (внутри он выглядит как кабина лифта), которому космический корабль придал ускорение в $9,8 \text{ м/с}^2$. В одной ситуации участвует гравитация, в другой — нет, но Эйнштейн понял, что никакой эксперимент не позволит их различить (илл. 3). Рассмотрим еще две ситуации. В одной вы заперты внутри лифта в глубоком космосе — вы парите в кабине в невесомости. В другой — лифт находится в высоком здании и после обрыва троса вертикально падает на дно лифтовой шахты. Эти две ситуации также невозможно отличить друг от друга. Гравитация неотличима от любой другой силы. Этот «принцип эквивалентности» является центральным в общей теории относительности Эйнштейна. Оказаться в оборвавшемся лифте, стремительно несущемся к земле, — катастрофа, но для Эйнштейна мысль о том, что падающий человек не почувствует своего веса, стала «счастливейшей».

Новая концепция гравитации Эйнштейна является геометрической. Уравнения общей теории относительности в определенной области соотносят массу и энергию с искривлением пространства. Плоское линейное пространство Ньютона с находящимися в нем объектами заменяется пространством, которое искривлено находящимися



Илл. 3. В общей теории относительности нет разницы между ускорением под воздействием гравитации и ускорением под воздействием любой другой силы. Человек в ракете, набравшей в глубоком космосе ускорение $9,8 \text{ м/с}^2$ (слева), будет чувствовать себя так же, как при земной гравитации, и не заметит разницы в поведении падающих объектов по сравнению с ситуацией, когда он находится в покое на поверхности Земли. *Маркус Пёссель*

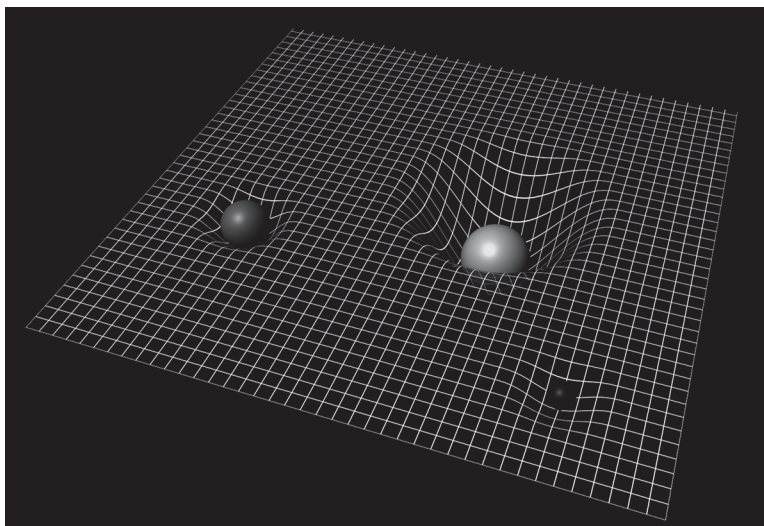
в нем объектами (илл. 4)¹⁰. Пространство и время связаны, следовательно, гравитация может искажать и время, и пространство. Физик Джон Уилер, который, как мы в дальнейшем узнаем, ввел термин «черная дыра», нашел лаконичную формулировку: «Материя указывает пространству, как искривляться. Пространство указывает материи, как двигаться». Эта идея отражена и в словах поэта Роберта Фроста, который неоднозначно воспринял открытия теории относительности. В сонете «Нам по сердцу любая геометрия» он приходит в ужас при мысли о бесконечности космоса, но искривление, характеризующее черную дыру, видится ему утешением:

*Там мрак и холод — настоящий ад,
особенно рукам, пока разделны.
Будь эта даль хоть чуть искривлена,
так руки — вместе — грелись бы, как братья.
Упрямая теория вредна
и не велит схватить себя в объятия*¹¹.*

Три эффекта общей теории относительности напрямую соотносятся с ситуациями, когда речь идет о плотной материи, то есть о черных дырах. *Первый эффект* — отклонение света в соответствии с волнистой структурой пространства-времени, что обусловлено концентрацией массы. Это стало первой и классической проверкой общей теории относительности Эйнштейна в 1919 г., через три года после публикации. Группа под руководством великого английского астрофизика Артура Эддингтона измерила слабое искривление света звезды, проходящего вблизи края диска Солнца. Измерение не было особенно точным, но подтверждение теории относительности сделало Эйнштейна знаменитым и вознесло его на вершины науки. В 1995 г. более точное измерение дало результат, совпавший с предсказанием Эйнштейна с точностью до 0,01%¹².

Второй эффект — потеря энергии по мере того, как свет покидает массивный объект, так называемое гравитационное красное смещение. Это выглядит так, как если бы фотоны боролись с гравитацией. Эффект был впервые измерен экспериментальным путем в 1960 г. Непосредственное отношение ко второму имеет и *третий эффект* — замедление времени. Предполагается, что при более сильной гравитации часы идут медленнее. Замедление времени было

* Пер. Владимира Кормана.



Илл. 4. В теории относительности Эйнштейна пространство искривлено присутствующей в нем массой, что здесь проиллюстрировано двумерной аналогией: кривизна возрастает с массой. Черная дыра представляет ситуацию, когда пространство-время «выдавлено» из остальной Вселенной. В случае с обычными звездами и планетами искривление пространства почти неразлично. *ESA/Кристоф Каро*

впервые зарегистрировано в 1971 г.: выяснилось, что атомные часы, перемещаемые на самолете с высокой скоростью, идут чуть быстрее точно таких же атомных часов, оставленных на земле. В 2010 г. замедление времени было зарегистрировано при разнице положения по вертикали всего один метр, для чего потребовались часы исключительной точности, с погрешностью в одну секунду за 4 млрд лет¹³. Измерения эффекта замедления времени также согласуются с предсказаниями теории с точностью 0,01%. Общая теория относительности блестяще выдержала все экспериментальные проверки.

Общая теория относительности кажется тайным знанием, оторванным от повседневной жизни, но, если бы расчеты не учитывали замедление времени, мы вряд ли могли пользоваться системами GPS. Для установления местонахождения телефона на Земле в пределах метра нужны предельно точные данные орбитальных спутников, на борту которых установлены атомные часы¹⁴. Релятивистские расчеты выполняются компьютерными чипами в мобильном телефоне, без таких корректировок отклонения систем GPS достигали бы 10 км за день. Эффекты относительности малозаметны в Солнечной системе и везде, где гравитация слаба, но, как мы скоро узнаем, невероятно усиливаются при коллапсе звезд и сильной гравитации.

Сингулярность и внезапно прерванная жизнь

Общая теория относительности строга и красива. Эйнштейн сказал о своем творении: «Едва ли кто-нибудь, полностью понимающий эту теорию, может устоять перед ее обаянием»¹⁵. Однако лишь немногие способны постичь теорию относительности — для этого нужны фундаментальные знания математики. В самом кратком выражении в одном уравнении соотносятся плотность массы-энергии и искривление пространства-времени. Это все равно что сыграть пьесу Шекспира за пять минут. Полноценная «театральная постановка» — система из десяти нелинейных гиперболическо-эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных. Опорная математика основывается на многообразиях, сложных многомерных формах, которые соотносятся с евклидовым пространством, как сложенная фигурка дракона-оригами с плоским листом бумаги¹⁶.

Эйнштейн разработал приблизительные решения для своей теории, что позволило Артуру Эддингтону организовать экспедицию для измерения гравитационного искривления света звезды во время солнечного затмения. Он сомневался, что уравнения имеют точное решение, но общая теория относительности сразу привлекла внимание выдающихся ученых-физиков. Один из ученых добился поразительных результатов. Уроженец Франкфурта Карл Шварцшильд стал студентом уже в 16 лет — и тогда же опубликовал две статьи об орбитах двойных звезд. Вскоре он получил должность профессора и директора обсерватории Гёттингенского университета. Когда началась Первая мировая война, ему было больше 40 лет, но в порыве патриотизма он завербовался в армию Германии. Шварцшильд воевал на западном и восточном фронтах и дослужился до лейтенанта артиллерии.

Страдая от тяжелой простуды на русском фронте в конце 1915 г., Шварцшильд переписывался с Эйнштейном. «Война была ко мне довольно милостива, — писал Шварцшильд, — несмотря на канонаду, я мог себе позволить отрешиться от происходящего и предпринять вылазку в сферу ваших идей»¹⁷. Он предложил верное решение уравнений, что весьма впечатлило Эйнштейна. Вскоре после этого Шварцшильд был представлен Академии наук Германии. Но ученый не смог продвинуть свои идеи: этому помешала редкая и мучительная болезнь кожи — пузырчатка. Шварцшильд представил статью к публикации в феврале 1916 г., был комиссован с русского фронта в марте и умер в мае.

Что же за решение нашел Шварцшильд? Оно звучало так: вторая космическая скорость на поверхности тела зависит от его массы и радиуса. Мичелл и Лаплас размышляли о возможности попадания света в ловушку большой массивной звезды с той же плотностью, что и у Солнца.



**здесь тела ощущают
гравитацию черной дыры,
но свет еще может ее преодолеть**

Илл. 5. Черные дыры — это простые объекты, характеризующиеся массой и осевым вращением. Горизонт событий — информационный барьер, разделяющий области пространственно-временного континуума, которые мы можем и не можем видеть. Сингулярность в центре черной дыры — это точка бесконечной плотности вещества. *Моника Тернер / Science in School / EIROforum*

Шварцшильд понял, что вторая космическая скорость также может достичь скорости света, если звезда, подобная Солнцу, коллапсирует до высокой плотности. Его решение подразумевало два удивительных момента: что гравитация может сжать тело до состояния бесконечной плотности вещества, которое называется сингулярностью, и что существует гравитационный предел, навсегда заключающий в ловушку все, что находилось внутри, так называемый горизонт событий. Сингулярность и горизонт событий — две важнейшие характеристики черной дыры (илл. 5).

Повелитель сжатий и расширений

Эйнштейн был недоволен. И он, и Эддингтон были убеждены, что сингулярность является следствием несовершенного понимания физики. Это же бессмыслица — физический

объект нулевого размера и бесконечной плотности. Теория Эйнштейна породила чудовище. Другие физики сочли решение Шварцшильда игрой ума для посвященных. Для таких звезд, как Солнце, радиус Шварцшильда — размер горизонта событий — составляет 3 км. Как может звезда диаметром 1,4 млн км — в 100 раз больше Земли — сжаться до размера деревни?

Но еще один вундеркинд от физики был убежден, что это возможно. Роберт Оппенгеймер родился в Нью-Йорке, изучал физику в Гарварде. Получив степень доктора философии, он проехал по Европе и весьма увлекся новым направлением — квантовой механикой. Его научные интересы были разносторонни. В числе прочих достижений Оппенгеймер первым применил квантовую теорию на молекулярном уровне, предсказал антиматерию и стал пионером в разработке теории космических лучей, именно он создал и лучшую программу преподавания теоретической физики в Калифорнийском университете в Беркли. Оппенгеймер был человеком высокой культуры: серьезно интересовался изобразительным искусством и музыкой, изучал санскрит и в подлиннике читал древнегреческих философов. Он был склонен к левым убеждениям и обладал высокой социальной ответственностью¹⁸.

Оппенгеймер разработал инструменты для понимания ядерной материи: он понял, что в астрофизике реальный мир принимает экзотические формы. Эволюционируя, звезда сохраняет тонкое равновесие между гравитацией, которая всегда «тянет» внутрь, и давлением, которое порождается реакциями термоядерного синтеза и всегда направлено наружу. Солнце стабильно и имеет постоянный размер до тех пор, пока в нем продолжают идти термоядерные реакции. Когда Солнце израсходует водородное топливо, оно сожмется до плотного состояния материи, поддерживаемого

квантово-механической силой — давлением вырожденного газа, и станет белым карликом.

Индийский астрофизик Субраманьян Чандрасекар вычислил, что гравитация более массивной, чем Солнце, звезды может преодолеть силу давления вырожденного газа и коллапсировать до плотности огромного атомного ядра. Такая звезда называется нейтронной. В 1939 г. Оппенгеймер вместе с одним из своих магистрантов написал статью «О безграничном гравитационном сжатии»*, в которой путем сложных расчетов доказал, что еще более массивная звезда будет коллапсировать до тех пор, пока не достигнет большей плотности, чем у любой известной формы вещества¹⁹. В конце жизни массивной звезды неизбежно формируется черная дыра.

В 1942 г. Оппенгеймера назначили руководителем американской программы по созданию атомной бомбы. Для работы на секретном объекте в Лос-Аламосе, что в северной части Нью-Мексико, он собрал великолепную команду талантливых физиков, которые бросили все усилия на достижение решающего преимущества в войне с Японией²⁰. Оппенгеймер был предан работе, но в его душе зрел конфликт. Став свидетелем «Тринити» — испытания первой атомной бомбы в 1945 г., он лишь сказал своему брату: «Сработало». Позже Оппенгеймер выбрал знаменитую строчку из Бхагавадгиты: «Я смерть, разрушитель миров»²¹. После войны из-за политических взглядов положение Оппенгеймера пошатнулось. Он стал жертвой унижительной антикоммунистической «охоты на ведьм» и был лишен допуска к секретной информации.

* Оппенгеймер Ю., Снайдер Г. О безграничном гравитационном сжатии. Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сб. статей. — М.: Мир, 1979.

Оппенгеймер так и не сумел восстановить репутацию. Перевод черных дыр из сферы умозрительного в сферу достоверного — это одно из выдающихся достижений в его колоссальном научном наследии.

Поиск названия для непостижимого

Физики не всегда соглашались друг с другом. Величайшие ученые вступают в яростное соперничество, ими движет страсть к познанию законов природы. Я был свидетелем горячих споров в моей области науки, порой я вздрагивал, слыша, какими ужасными словами ученые называли друг друга. Как правило, лучшие идеи находят подтверждение, а обиды забываются. Но иногда — как в случае Роберта Оппенгеймера и Джона Уилера, который ввел в научный обиход термин «черная дыра» (илл. 6), — споры перерастают в личные конфликты.

Уилер — ученик великого датского физика Нильса Бора, который привил ему привычку не только справляться со сложными уравнениями, но и формулировать фундаментальные вопросы о природе реальности, которую изучает физика. Уилер работал над диссертацией (в дальнейшем не стал ее защищать) в Беркли под руководством Оппенгеймера — тот был всего на семь лет старше. Большую часть своей научной карьеры Уилер прослужил профессором в Принстоне, под его руководством работали многие выдающиеся физики второй половины XX в. Во многом благодаря ему изучение гравитации стало полноправной дисциплиной. В 1973 г., незадолго до выхода на пенсию, Уилер в соавторстве с двумя бывшими студентами написал фундаментальный учебник «Гравитация», по которому до сих пор учатся магистранты-физики²².

В 1939 г., в тот же день, когда в свет вышла статья Оппенгеймера о коллапсе звезд, Уилер и Бор опубликовали свое объяснение процесса деления атомного ядра, — в это время в Европе Гитлер вторгся в Польшу. Как и его предшественники Эйнштейн и Эддингтон, Уилер отвергал идею сингулярности — он тоже считал это насилием над физикой. Выступая на конференции в 1958 г., Уилер оспорил мысль Оппенгеймера, заявив, что она не дает приемлемого ответа. Последовала острая дискуссия. Оппенгеймер зачастую бывал нетерпим и вспыльчив, то и дело переходил на личности. И Уилер — искренний, увлеченный и заинтересованный в каждом человеке, с которым его сводила судьба, — сказал об Оппенгеймере: «Я никогда по-настоящему его не понимал. Я всегда чувствовал, что с ним нужно держать ухо востро». (Уилер в итоге принял идею Оппенгеймера, после того как ее состоятельность



Илл. 6. Джон Арчибальд Уилер, один из знаменитых физиков второй половины XX в., автор классического учебника «Гравитация». Он ввел в научный обиход термин «черная дыра». *Управление государственных архивов, Центр американской истории Дольфа Бриско, Техасский университет в Остине*

подтвердилась с помощью компьютерных кодов, использованных для моделирования бомб, и высоко оценил его работу, выступая на конференции в 1962 г. Оппенгеймер, однако, не услышал слов одобрения, поскольку во время выступления Уилера находился за дверями конференц-зала, предпочтя беседу с коллегой²³.)

Неприязнь росла, а во время войны расхождения лишь усилились. Оппенгеймер был главным научным руководителем атомной программы, положившей конец войне, но после он бросил все усилия на то, чтобы не допустить распространения ядерного оружия. Тем временем Уилер и Эдвард Теллер приступили к разработке еще более мощной водородной бомбы, которую назвали «супербомбой»²⁴. Оппенгеймер критиковал их: «Пусть Теллер и Уилер продолжают. Не мешайте — пусть сядут в лужу»²⁵. Однако этого не случилось, и впоследствии Оппенгеймер отметил их техническое мастерство, благодаря которому появилась термоядерная бомба. Уилер же пришел в отчаяние, узнав о гибели брата во время боевых действий в Италии в 1944 г. Он горько сожалел о том, что бомбу не создали ранее — это могло изменить ход войны в Европе.

Во время своей речи в 1967 г. Уилер отметил, что, многожды повторив выражение «полностью гравитационно коллапсировавшие тела», поневоле задумаешься о выборе нормального термина. Кто-то в аудитории (кто именно, так и не удалось установить) выкрикнул: «Как насчет черной дыры?» И Уилер начал использовать это выражение. Оно прижилось и вошло в научный оборот. Как и термин «Большой взрыв», предложенный кем-то посторонним, «черная дыра» — разговорное, но точное определение²⁶. Как писал Уилер в автобиографии, черная дыра «говорит нам, что пространство может быть скомкано, как лист бумаги, в исчезающе малую точку, что время может угаснуть, как

затушенное пламя, и что законы физики, которые мы считаем священными и неизблемыми, являются какими угодно, только не такими».

Гений сражается с гравитацией и болезнью

Стивен Хокинг — еще один блестящий ученый, взявшийся за тайну черных дыр. Его история настолько всем нам знакома, что мы практически перестали им восхищаться. Неуверенный в себе и посредственный ученик в детстве, он сумел окончить школу отличником, занимаясь не более часа в день в течение трех лет. В 21 год у Хокинга диагностировали боковой амиотрофический склероз — прогрессирующую мышечную атрофию — и отвели два года жизни, однако в 32 года он был избран в Королевское общество, а в 35 лет стал лукасовским профессором, возглавив кафедру математики в Кембридже, — когда-то эту должность занимал Исаак Ньютон. Хокинг едва не умер от пневмонии в 1980-е гг., в результате лишился способности говорить и приобрел механический голос, ставший культовым. Книга «Краткая история времени»* сделала его знаменитым и была продана в количестве более 10 млн экземпляров²⁷. К моменту смерти в марте 2018 г. он пережил отпущенный ему когда-то срок более чем на полвека (илл. 7).

Близкие к Хокингу люди описывали его как сложного в общении человека²⁸, но во всяком случае это был самый оригинальный и выдающийся физик со времен Эйнштейна²⁹. В своей диссертации на соискание степени доктора философии Хокинг сосредоточился на теме, которую большинство физиков предпочитали избегать, — сингулярностях. Как мы

* Хокинг С. Краткая история времени. — СПб.: Амфора, 2010.