Книжные проекты
Дмитрия Зимина

Эта книга издана в рамках программы
«Книжные проекты Дмитрия Зимина»
и продолжает серию «Библиотека «Династия».
Дмитрий Борисович Зимин —
основатель компании «Вымпелком» (Beeline),
фонда некоммерческих программ «Династия»
и фонда «Московское время».
Программа «Книжные проекты Дмитрия Зимина»
объединяет три проекта,
хорошо знакомые читательской аудитории:
издание научно-популярных
переводных книг «Библиотека «Династия»,
издательское направление фонда «Московское время»
и премию в области русскоязычной
научно-популярной литературы «Просветитель».
Подробную информацию
о «Книжных проектах Дмитрия Зимина»
вы найдете на сайте
ziminbookprojects.ru.

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 суть[1].

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.

1

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». Бóльшую 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 небе[1].

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

таковое уменьшение имеет место для любой из них, и если будут получены путем наблюдения другие данные, потребные 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 свет[3].

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 Земли[4]. 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.

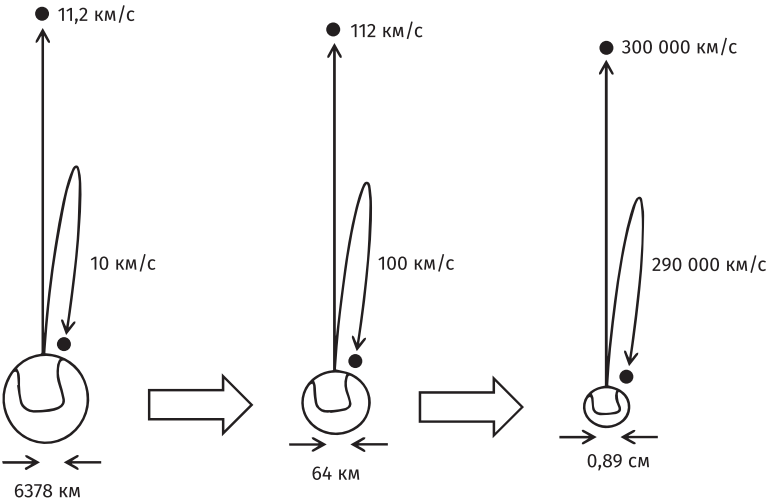
Вклад великого французского математика

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, преодолеет 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 Ньютона[6].

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 физике[8]. 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).

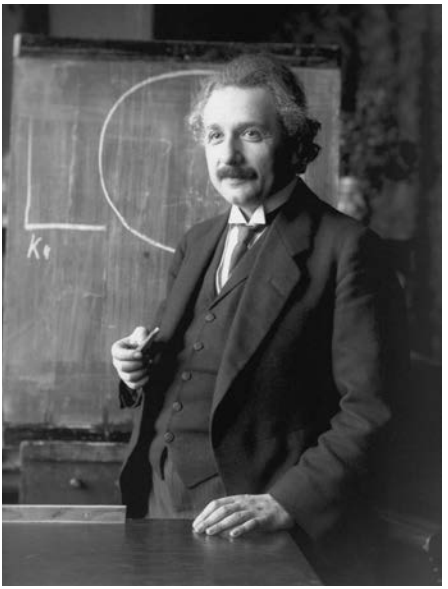
---

* 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 *c* 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 эксперимент[9]. 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 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 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

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru