

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 7

Введение 9

1. Ученый в Голливуде: зарождение замысла «Интерстеллар» 13

I. ОСНОВЫ

2. Вкратце о Вселенной 29
3. Законы, управляющие Вселенной 39
4. Искривления пространства и времени, приливная гравитация 47
5. Черные дыры 57

II. ГАРГАНТЮА

6. Анатомия Гаргантюа 69
7. Гравитационные пращи 79
8. Внешний вид Гаргантюа 87
9. Диски и джеты 100
10. Случай — краеугольный камень эволюции 112

III. ЗЕМЛЯ В БЕДЕ

11. Болезнь растений 117
12. Задыхаясь без кислорода 124
13. Межзвездный перелет 127

IV. ЧЕРВОТОЧИНА

- 14. Червоточины 139
- 15. Внешний вид червоточины в «Интерстеллар» 150
- 16. Обнаружение червоточины: гравитационные волны 158

V. ИССЛЕДУЕМ ОКРЕСТНОСТИ ГАРГАНТЮА

- 17. Планета Миллер 173
- 18. Вибрации Гаргантюа 182
- 19. Планета Манн 186
- 20. «Эндюранс» 192

VI. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ФИЗИКА

- 21. Четвертое и пятое измерения 197
- 22. Сущности из балка 201
- 23. Ограничение гравитации 206
- 24. Гравитационные аномалии 214
- 25. Уравнение профессора 224
- 26. Сингулярности и квантовая гравитация 235

VII. КУЛЬМИНАЦИЯ

- 27. Кромка кратера 249
- 28. Внутрь Гаргантюа 258
- 29. Тессеракт 264
- 30. Передача сообщений в прошлое 274
- 31. Эвакуация колоний с Земли 285

- Где узнать больше?* 289
- Некоторые технические примечания* 303
- Благодарности* 311
- Библиография* 313
- Именной указатель* 317
- Тематический указатель* 325

Вкратце о Вселенной

Вселенная безбрежна и невероятно прекрасна. Удивительно проста в одних своих проявлениях и невероятно сложна в других. Из всего несметного многообразия понятий, относящихся ко Вселенной, нам сейчас понадобится лишь несколько — о них и поговорим.

Большой взрыв

Вселенная образовалась 13,7 миллиарда лет тому назад в результате грандиозного взрыва. «Большой взрыв» — это насмешливое название* придумал мой друг, космолог Фред Хойл, который в 1940-е годы принял данную идею в штыки.

Фред ошибался. Мы уже наблюдали излучение от этого взрыва, и лишь за неделю до того, как я пишу эти строки, были получены экспериментальные данные об излучении, испущенном спустя одну триллионную триллионной доли секунды после его начала!***

* Big Bang, дословно — «Большой бабах». *Прим. перев.*

** Введите в поисковике Google «gravitational waves from the big bang» («гравитационные волны большого взрыва») или «CMB polarization» («поляризация реликтового излучения»), чтобы прочитать об этом потрясающем открытии, сделанном в марте 2014 года. Некоторые подробности я раскрою в конце главы 16. *Прим. автора.*

Нам неизвестно, чем был вызван Большой взрыв и существовало ли что-нибудь до него. Так или иначе, в этом взрыве родилась Вселенная — в виде океана сверхгорячего газа, расширяющегося во всех направлениях подобно огненному облаку от взрыва атомной бомбы или газопровода.

Я бы с радостью написал о Большом взрыве целую главу, но героическим усилием воли сдержу свой порыв — до главы 16 мы почти не будем о нем вспоминать.

Галактики

По мере расширения Вселенной горячий газ, из которого она состояла, охлаждался. В каких-то случайных ее областях плотность газа была немного выше, чем в других. Когда газ становился достаточно холодным, гравитация стягивала каждую из областей высокой плотности внутрь себя, порождая галактики (огромные скопления звезд с их планетами и разреженным газом, заполняющим межзвездное пространство), см. рис. 2.1. Самая первая галактика образовалась, когда Вселенной было несколько сотен миллионов лет.

В наблюдаемой Вселенной приблизительно триллион галактик. Самые большие из них содержат по нескольку триллионов звезд, их поперечный размер — около миллиона световых лет*. Самые маленькие содержат около 10 миллионов звезд, их размер в поперечнике — примерно тысяча световых лет. В центре каждой крупной галактики располагается черная дыра (см. главу 5), которая тяжелее нашего Солнца в миллион или более раз**.

Земля расположена в галактике Млечный Путь. Большинство звезд Млечного Пути сосредоточено в области яркой полосы, которую можно наблюдать на земном небе ясными темными ночами. И почти все видимые на ночном небе огоньки — не только те, что расположены в пределах яркой полосы, — это звезды Млечного Пути.

Ближайшая к нашей крупная галактика называется галактикой Андромеды (рис. 2.2), и находится она на расстоянии 2,5 миллиона световых

В марте 2014 года действительно было заявлено о детектировании ненулевых возмущений реликтового излучения, но ряд авторов оспорили результаты эксперимента. Одним из основных контраргументов было игнорирование вклада эффектов межзвездной пыли. *Прим. науч. ред.*

* Световой год — это расстояние, которое свет преодолевает за один год: около ста триллионов километров. *Прим. автора.*

** Выражаясь более научно, ее масса в миллион или более раз превышает солнечную, то есть на некотором фиксированном удалении сила ее гравитационного притяжения эквивалентна силе притяжения миллиона Солнц. *Прим. автора.*

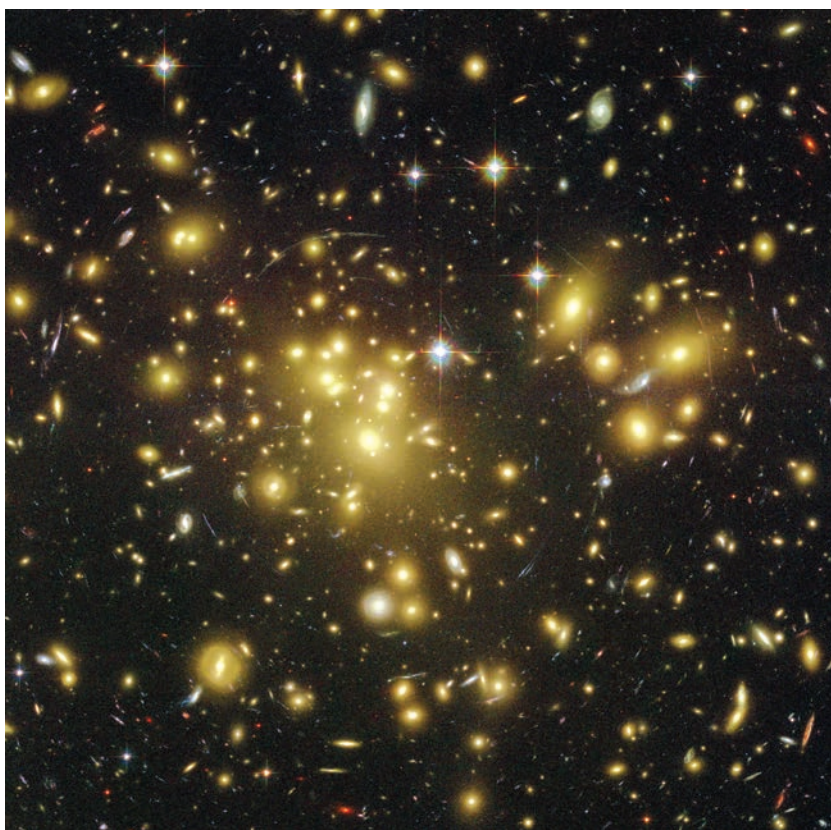


Рис. 2.1. Массивное скопление галактик под названием Abell 1689 и множество более отдаленных галактик; сфотографировано космическим телескопом «Хаббл»

лет от Земли. В ней около триллиона звезд, ее поперечный размер — примерно 100 000 световых лет. Млечный Путь и галактика Андромеды в некотором роде близнецы — они схожи по размерам, по форме и по количеству звезд. Если бы на рис. 2.2 был изображен Млечный Путь, Земля находилась бы там, где нарисован желтый ромбик.

В галактике Андромеды есть огромная черная дыра. Она в 100 миллионов раз тяжелее Солнца, а ее поперечный размер примерно равен поперечному размеру орбиты Земли (те же вес* и размер, что и у черной дыры Гаргантюа в «Интерстеллар», см. главу 6). Она находится в центре яркой сферы на рис. 2.2.

Солнечная система

Звезды — это огромные раскаленные газовые шары, температура которых обычно поддерживается за счет ядерных реакций, протекающих в звездном ядре. Солнце — весьма типичная звезда. Его диаметр — 1,4 миллиона километров, что в сотню раз больше диаметра Земли. Поверхность Солнца покрыта различными на вид

* В этой книге я использую слова «масса» и «вес» как синонимы. *Прим. автора.*

Рис. 2.2. Галактика Андромеды

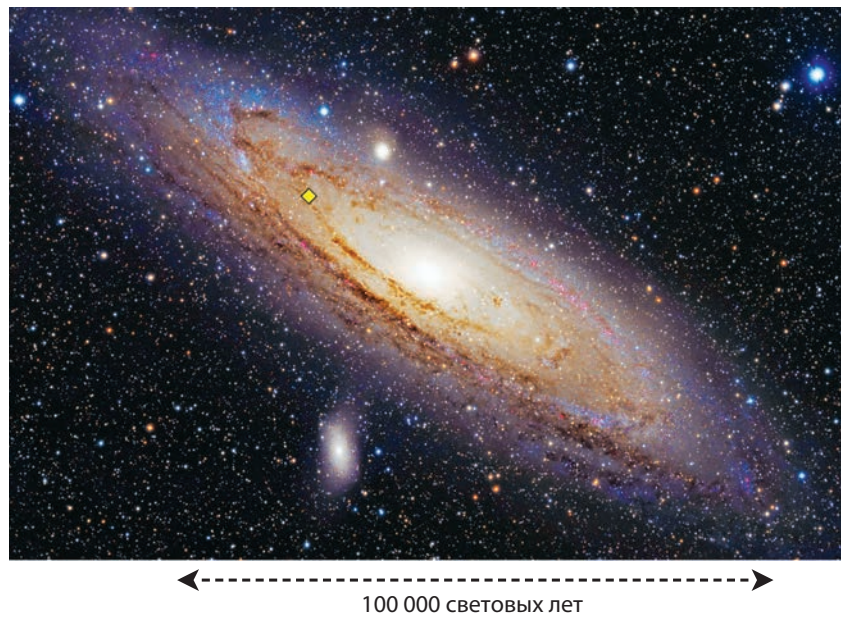
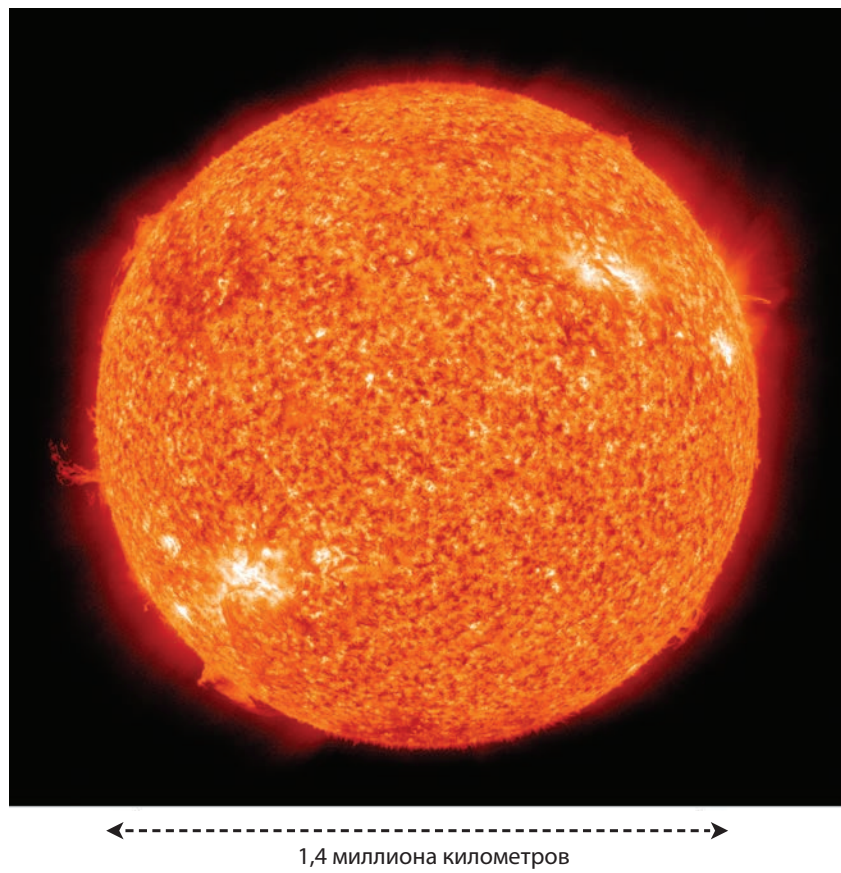
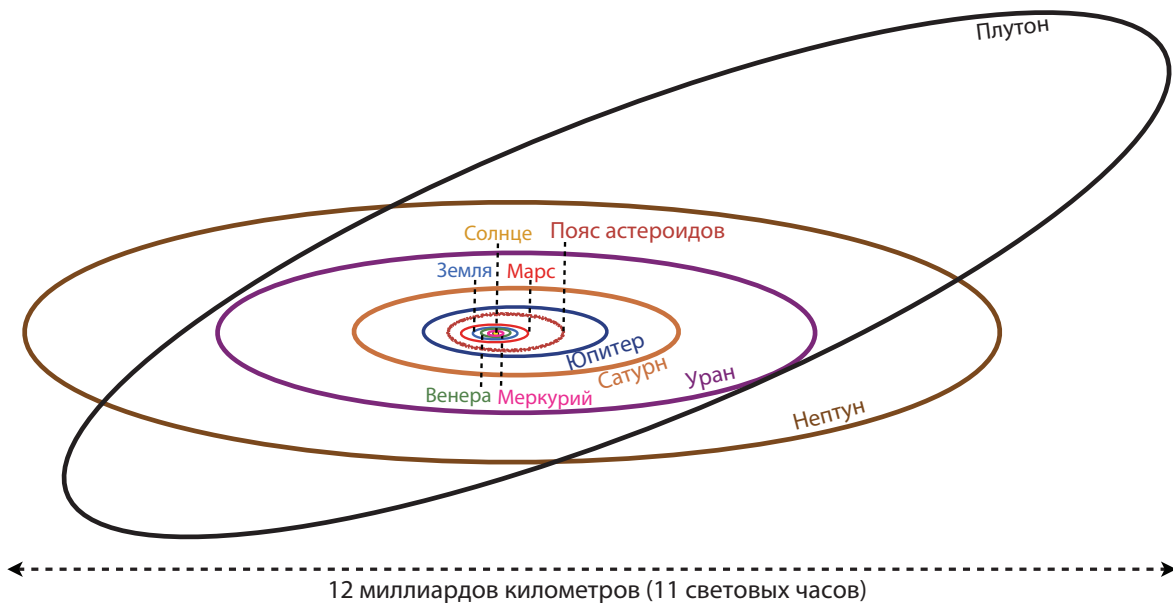


Рис. 2.3. Солнце, сфотографированное Обсерваторией солнечной динамики NASA





относительно горячими и относительно прохладными областями, а также кое-где встречаются вспышки (протуберанцы), и ее чрезвычайно интересно наблюдать в телескоп (рис. 2.3).

Восемь планет, включая Землю, вращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам вместе со множеством карликовых планет (среди которых наиболее известен Плутон), а также комет и небольших твердых объектов, называемых астероидами и метеороидами (рис. 2.4). Земля — третья планета от Солнца. Сатурн с его роскошными кольцами — шестая планета, и ему в «Интерстеллар» выделена особая роль (см. главу 15).

Солнечная система в тысячу раз больше, чем само Солнце; свету потребуется 11 часов, чтобы пройти от одного ее края до другого.

Расстояние до ближайшей к нам (не считая Солнца) звезды, проксимы Центавра, составляет 4,24 светового года, что в 2500 раз превышает поперечный размер Солнечной системы! В главе 13 мы поговорим об удивительных особенностях межзвездных путешествий.

Рис. 2.4. Орбиты планет Солнечной системы и Плутона и скопление астероидов

Звездная смерть: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры

Солнцу и Земле около 4,5 миллиарда лет, это примерно треть возраста Вселенной. Спустя примерно еще 6,5 миллиарда лет в солнечном ядре иссякнет ядерное топливо, которое поддерживает жар Солнца. Тогда начнется выгорание топлива в оболочке, окружающей ядро, и поверхность Солнца расширится, поглотив Землю. Когда же топливо

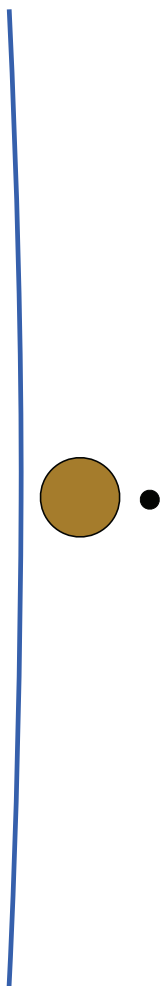


Рис. 2.5. Белый карлик (слева), нейтронная звезда (посередине) и черная дыра (справа), которые весят в 1,2 раза больше Солнца. Здесь показана лишь малая часть поверхности белого карлика

в оболочке тоже закончится, а Земля сторит, Солнце сожмется, превратившись в белый карлик величиной приблизительно с Землю, но в миллионы раз плотнее. Белый карлик постепенно, за десятки миллиардов лет, остынет, сделавшись плотным темным огарком.

Те звезды, что весят гораздо больше Солнца, сжигают свое топливо значительно быстрее, а затем схлопываются, образуя нейтронную звезду или черную дыру.

Масса нейтронной звезды составляет в среднем от одной до трех солнечных масс, диаметр — от 75 до 100 километров (сравнимо с размерами Чикаго), а плотность равна плотности атомного ядра: в сотни триллионов раз выше плотности камня и, соответственно, Земли. Почти целиком нейтронные звезды состоят из ядерной материи — упакованных бок к боку атомных ядер.

Черные дыры же (см. главу 5) целиком и полностью состоят из искривленного пространства и искривленного времени (в главе 4 я поясню это странное утверждение). Таким образом, черная дыра не содержит материи. Однако она имеет поверхность — ее называют «горизонтом событий» или просто «горизонтом», — через которую ничто не способно выйти наружу, даже свет; отсюда и слово «черная» в названии. Диаметр черной дыры пропорционален ее весу*: чем она тяжелее, тем больше.

Если масса черной дыры равна массе типичной нейтронной звезды или белого карлика (скажем, в 1,2 раза тяжелее Солнца), то ее окружность будет равна примерно 22 километрам, что составляет четверть диаметра нейтронной звезды или тысячную часть диаметра белого карлика (см. рис. 2.5).

Поскольку звезды обычно весят не больше 100 Солнц, вес черных дыр, которыми они становятся после смерти, тоже не превышает 100 солнечных масс. Из этого следует, что гигантские черные дыры, которые находятся в ядрах галактик и вес которых составляет от миллиона до 20 миллиардов солнечных масс, не могли образоваться из умирающих звезд. Видимо, они зародились каким-то иным образом — возможно, при объединении множества черных дыр поменьше или в результате схлопывания массивных газовых облаков.

Магнитные, электрические и гравитационные поля

Силовые линии магнитных полей играют большую роль во Вселенной и очень важны для понимания «Интерстеллар», поэтому стоит поговорить о них, прежде чем углубиться в научные аспекты фильма.

* Здесь имеется в виду соотношение между массой черной дыры и ее радиусом Шварцшильда, который характеризует горизонт событий. *Прим. науч. ред.*

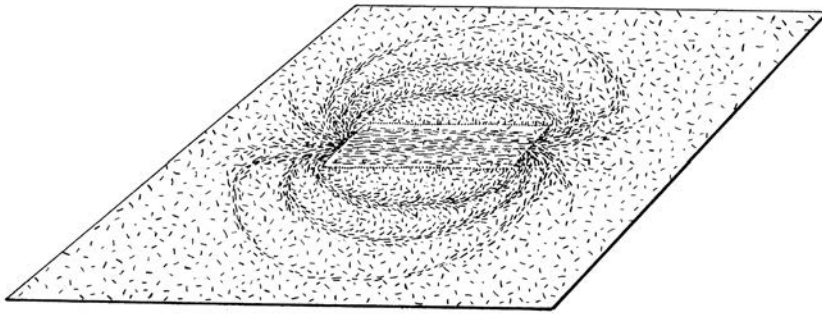


Рис. 2.6. Силовые линии магнитного поля вокруг магнитного бруска видны благодаря рассыпанным по листу бумаги железным опилкам (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из моей книги «Черные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна» [Торн 2009].)

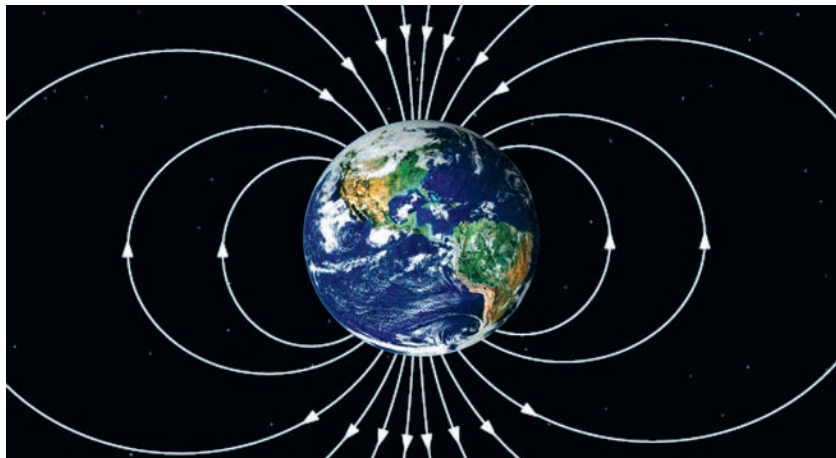
Наверное, на уроках физики вам уже приходилось иметь дело с силовыми линиями магнитного поля, когда вы ставили простой, но очень эффектный опыт. Помните, берешь листок бумаги, накрываешь им магнитный брусок и сыпешь сверху железные опилки? Опилки при этом складываются в узор, как на рис. 2.6. Они выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля, которые сами по себе невидимы. Эти линии исходят от одного из полюсов магнита, огибают магнит и достигают другого полюса. Магнитное поле — это совокупность всех магнитных силовых линий.

Если вы возьмете два магнита и поднесете их северными полюсами друг к другу, их силовые линии будут отталкиваться. При этом в пространстве между магнитами вы ничего не увидите, но силу магнитного поля почувствуете. Этот эффект можно использовать для удержания в воздухе намагниченных объектов, каковым может быть даже железнодорожный поезд (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Первый в мире коммерческий поезд на магнитной подушке в Шанхае, Китай

Рис. 2.8. Силовые линии магнитного поля Земли



У Земли тоже есть два полюса, Северный и Южный. Силовые линии магнитного поля выходят из Южного полюса, огибают Землю и достигают Северного полюса (рис. 2.8). Эти линии воздействуют на стрелку компаса таким же образом, как и на железные опилки: стрелка не успокоится, пока не встанет вдоль линий настолько точно, насколько это возможно. Таков принцип работы компаса.

Силовые линии магнитного поля Земли можно увидеть, наблюдая полярное (иначе — северное) сияние (рис. 2.9). Силовые линии захватывают летящие от Солнца протоны, и те входят в земную атмосферу.

Рис. 2.9. Полярное сияние над Хаммерфестом, Норвегия



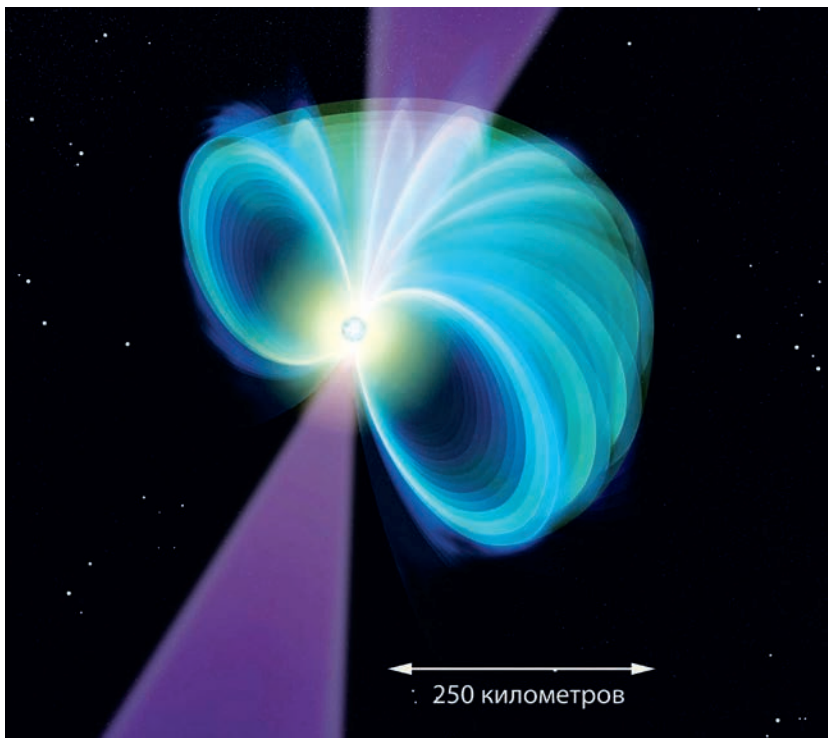


Рис. 2.10. Условное изображение нейтронной звезды с магнитным полем в форме пончика и джетами

Там протоны сталкиваются с молекулами кислорода и азота, заставляя их флуоресцировать*. Это свечение и есть полярное сияние.

Магнитное поле нейтронных звезд очень мощное. Его силовые линии, так же как и земные, образуют фигуру, напоминающую пончик. Быстро движущиеся частицы, пойманные в магнитное поле нейтронной звезды, подсвечивают его силовые линии (голубые кольца на рис. 2.10). Некоторые частицы освобождаются и отлетают от полюсов, образуя конусообразные струи — *джеты*** (на рис. 2.10 показаны фиолетовым). Джеты состоят из самых разных излучений: гамма-лучей, рентгеновских лучей, ультрафиолета, видимого излучения, инфракрасного излучения, а также радиоволн. По мере того как звезда вращается, излучающие джеты движутся по небосводу подобно прожекторам. Каждый раз, когда джет поворачивается в сторону Земли, астрономы наблюдают импульс излучения; из-за периодичности импульсов такие звезды и прозвали пульсарами.

Во Вселенной есть и другие поля (совокупности силовых линий) помимо магнитных. Это среди прочих электрические поля

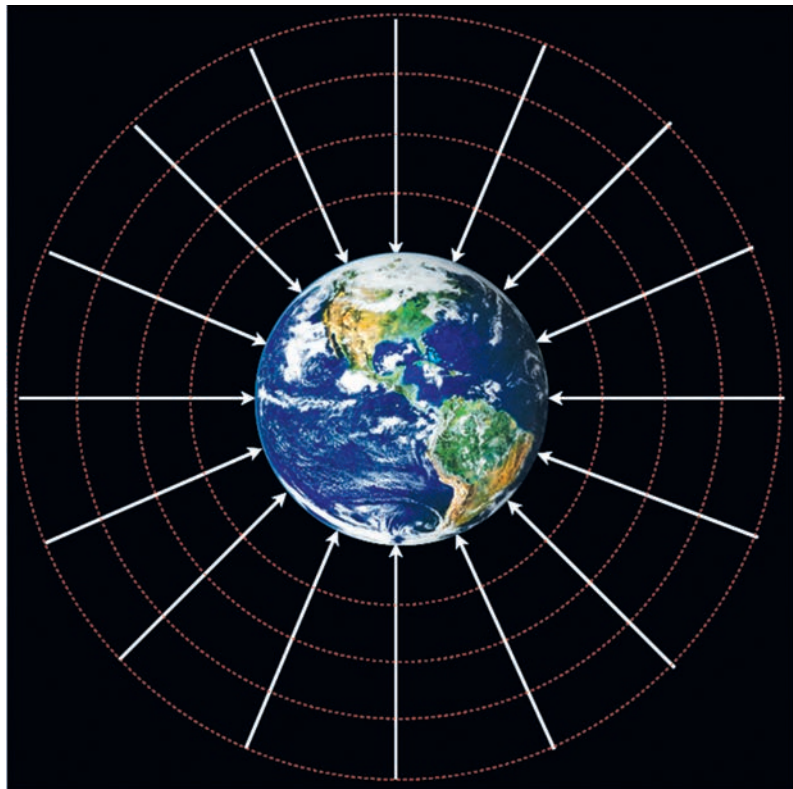
* Механизм верно описан для полярного сияния на Земле. Для других планет наиболее яркие линии в спектре излучения определяются составом атмосферы. Так, для Юпитера наиболее яркой будет линия излучения водорода в ультрафиолетовом спектре. *Прим. науч. ред.*

** Среди российских физиков бытует термин «релятивистская струя». *Прим. перев.*

(совокупности силовых линий, благодаря которым электрический ток движется по проводам). Еще один пример — гравитационные поля (совокупности силовых линий, которые, в частности, притягивают нас к земной поверхности).

Силовые линии гравитационного поля Земли направлены радиально, к ее центру, и притягивают объекты к Земле. Сила гравитационного притяжения пропорциональна плотности силовых линий (количеству линий, которые проходят через заданную площадь). По мере того как линии приближаются к Земле и проходят через воображаемые сферы все меньшей и меньшей площади (окружности из красного пунктира на рис. 2.11), плотность линий увеличивается обратно пропорционально площади сфер, а следовательно, гравитация возрастает по мере приближения к Земле — обратно пропорционально площади воображаемой сферы. Поскольку площадь каждой сферы пропорциональна квадрату ее удаленности от центра Земли r , сила притяжения Земли возрастает как $1/r^2$. Это ньютоновский закон обратных квадратов для гравитации — один из фундаментальных законов физики, которыми так страстно увлечен профессор Брэнд и знакомство с которыми — наша следующая веха на пути освоения научных аспектов «Интерстеллар».

Рис. 2.11. Силовые линии гравитационного поля Земли



Законы, управляющие Вселенной

Эпоха великих негеографических открытий

С XVII века и по сей день ученые бьются над разгадкой физических законов, которые управляют Вселенной и формируют ее. Это напоминает то, как европейские путешественники-первооткрыватели самоотверженно исследовали земную географию (рис. 3.1).

В 1506 году кругозор картографов ограничивался Евразией и лишь где-то вдалеке брезжили берега Южной Америки. К 1570 году обе Америки были открыты, но никто и не подозревал о существовании Австралии. К 1744 году была открыта и Австралия, но Антарктика оставалась на карте белым пятном.

Подобно этому (рис. 3.2) к 1690 году были открыты ньютоновские законы физики. С помощью таких понятий, как сила, масса и ускорение, а также уравнений, которые их связывают (например, $F = ma$), законы Ньютона точно описывают движение Луны вокруг Земли и движение Земли вокруг Солнца, полет самолета, распределение нагрузки в конструкции моста и соударение бильярдных шаров, и многие-многие прочие явления. В главе 2 мы уже сталкивались с одним из ньютоновских законов — законом обратных квадратов для гравитации.



Мартин Вальдземюллер, 1506



Абрахам Ортелиус, 1570

Рис. 3.1. Карты мира



Эмануэль Боуэн, 1744

К 1915 году Эйнштейн и другие ученые доказали, что законы Ньютона не работают в случае очень высоких скоростей (для объектов, которые движутся со скоростью, близкой к скорости света), очень больших расстояний (масштаб Вселенной) и в случае высокой гравитации (например, для черных дыр). Чтобы устранить этот недостаток, Эйнштейн сформулировал свою революционную теорию относительности (рис. 3.2). Используя понятия искривленного времени и искривленного пространства (о которых пойдет речь в следующей главе), законы теории относительности предсказали и объяснили такие феномены, как расширение Вселенной, черные дыры, нейтронные звезды и червоточины.

К 1924 году стало ясно, что законы Ньютона не работают также и для сверхмалых размеров (молекулы, атомы и фундаментальные частицы). Чтобы разобраться с этим, Нильс Бор, Вернер Гейзенберг,



Рис. 3.2. Законы физики, управляющие Вселенной

Эрвин Шрёдингер и другие ученые вывели законы квантовой физики (рис. 3.2). Взяв за основу, что всё вокруг хотя бы в небольшой мере подвержено случайным колебаниям — флуктуациям (об этом в главе 26) и что эти флуктуации могут порождать новые частицы и излучения «из ничего»*, квантовая физика подарила нам лазеры, ядерную энергию, светодиоды и более глубокое понимание химических процессов.

К 1957 году стало очевидно, что теория относительности и квантовая физика принципиально несовместимы. Их прогнозы коренным образом расходятся в тех случаях, когда велики силы гравитации и квантовые флуктуации**. Например, когда речь идет о рождении Вселенной в Большом взрыве (см. главу 2); о ядрах черных дыр, подобных Гаргантюа (см. главы 26 и 28); или о путеше-

* Современная наука предполагает, что вакуум представляет собой не полное отсутствие каких-либо объектов (частиц, излучений и т. д.), а сложную структуру, и частицы понимаются как некие возбуждения над вакуумом. *Прим. науч. ред.*

** Скажем, если энергия световых волн подвержена сильнейшим квантовым флуктуациям, которые настолько значительны, что случайным образом чрезвычайно сильно искривляют пространство и время. Такие искривления выходят за рамки законов относительности Эйнштейна, а их влияние на световые волны лежит за рамками квантовой теории света. *Прим. автора.*

ствиях назад во времени (см. главу 30). «Пылкий брак»* законов теории относительности и квантовой физики положил начало новым законам квантовой гравитации.

Мы пока еще не знаем законов квантовой гравитации, но стараниями величайших физиков XXI столетия на этот счет выдвинуты некоторые очень интересные гипотезы, включая теорию суперструн (см. главу 21). Тем не менее квантовая гравитация остается почти неизведанной территорией, и это оставляет простор для научной фантастики — простор, которым Кристофер Нолан так искусно воспользовался в «Интерстеллар» (см. главы 28–31).

Научные истины, обоснованные предположения и домыслы

В «Интерстеллар» задействованы все четыре «континента»: ньютоновская физика, теория относительности, квантовая физика и квантовая гравитация. Часть происходящего в фильме соответствует научным истинам, часть — относится к обоснованным предположениям, а остальное — домыслы.

Чтобы называться истиной, научное знание должно основываться на признанных законах физики (ньютоновских, релятивистских или квантовых) и быть подкреплено достаточным количеством наблюдений.

В этом смысле нейтронные звезды и их магнитные поля, описанные в главе 2, являются научной истиной. Почему? Во-первых, существование нейтронных звезд было предсказано на основании теории относительности и квантовых законов. Во-вторых, астрономы в мельчайших подробностях изучили пульсирующее излучение нейтронных звезд (импульсы света, рентгеновского излучения и радиоволн, описанные в главе 2). Этим наблюдениям, если принять, что пульсары — это вращающиеся нейтронные звезды, найдено полное объяснение с точки зрения теории относительности и квантовых законов; других же объяснений на этот счет найдено не было. В-третьих, было предсказано, что нейтронные звезды образуются при астрономических взрывах (так называемые «вспышки сверхновых»), а пульсары наблюдаются как раз в центре

* Выражение «пылкий брак» пустил в ход мой научный руководитель Джон Уилер, настоящий мастер по части метких названий. Кроме того, Джону принадлежат выражения «черная дыра» и «червоточина», а также фраза: «У черных дыр нет волос» (см. главу 6). Однажды он рассказал мне, что часами лежит в теплой ванне, воспаряя разумом в поисках подходящего слова. *Прим. автора.*

больших расширяющихся газовых облаков — следов таких вспышек. Поэтому у нас, астрофизиков, нет сомнений, что нейтронные звезды действительно существуют и действительно являются источниками наблюдаемых пульсирующих излучений.

Еще один пример научной истины — то, как черная дыра Гаргантюа искривляет лучи света, искажая вид звездного неба (рис. 3.3). Физики называют такое искажение «гравитационным линзированием», поскольку оно изменяет изображение подобно линзе (ну, или кривому зеркалу в парке аттракционов).

Теория относительности Эйнштейна однозначно предсказывает все свойства черных дыр, которые проявляются снаружи их поверхности, включая гравитационное линзирование (рис. 3.3). У астрономов есть твердое, основанное на наблюдениях, убеждение, что черные дыры (включая и гигантские черные дыры вроде Гаргантюа) существуют во Вселенной. Астрономы уже наблюдали гравитационные линзы, образованные пусть не черными дырами, но другими объектами (например, см. рис. 24.3), и эти наблюдения в точности соответствуют предсказаниям теории относительности Эйнштейна. На мой взгляд, этого достаточно. Гравитационное линзирование Гаргантюа, смоделированное командой Пола Франклина в студии

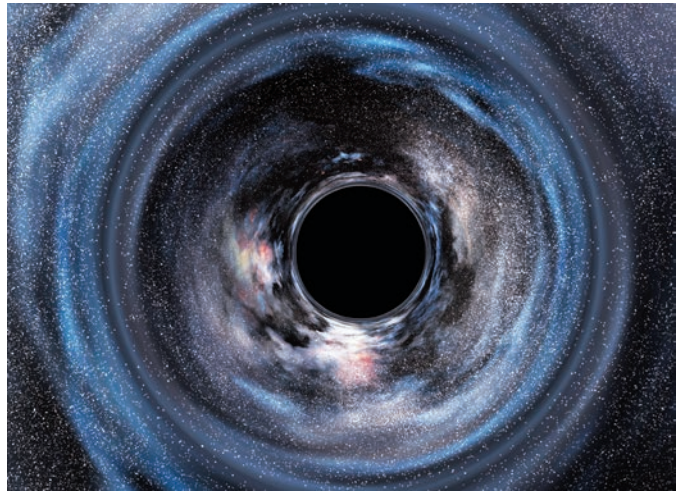


Рис. 3.3. Звезды вблизи тени Гаргантюа. Гаргантюа искривляет лучи света, идущие от каждой из звезд, чудовищно искажая облик своей галактики — «гравитационно линзируя» ее (Компьютерная модель, сделанная для этой книги командой по созданию визуальных эффектов студии Double Negative.)



Рис. 3.4. Сожжение зараженной кукурузы (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Double Negative с помощью релятивистских уравнений, которые я для этого составил, соответствует научной истине. Именно так все и выглядело бы в реальности.

А вот болезнь растений, которая в «Интерстеллар» угрожает жизни людей на Земле (см. рис. 3.4 и главу 11), с одной стороны, относится к обоснованным предположениям, а с другой — к домыслам. Сейчас поясню.

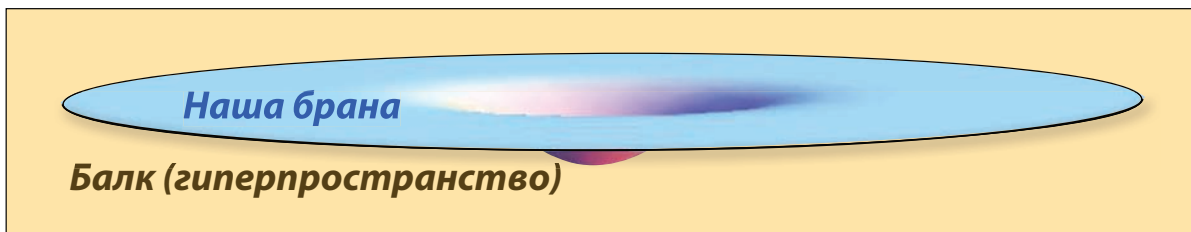
В течение всей документированной истории человечество периодически переживало эпифитии — массовые заражения культивируемых растений. Биологические процессы, происходящие при заболевании, зависят от химических процессов, которые, в свою очередь, подчиняются законам квантовой физики. Ученые могут объяснить квантовыми законами многие химические процессы, но до сих пор не все, а также не могут объяснить через химические процессы все биологические. Тем не менее биологи многое узнали о болезнях растений благодаря наблюдениям и экспериментам. Случаи, когда заболевание передавалось от одного вида растений к другому настолько стремительно, чтобы это угрожало жизни людей, неизвестны. Однако нет у нас и гарантий, что этого не может быть. Возможность такого заражения — обоснованное предположение. А допущение, что однажды оно может произойти, — домысел, который большинство биологов относят к области крайне маловероятных событий.

Гравитационные аномалии (см. главы 24 и 25), например, когда Купер бросает монетку, а она устремляется к полу по невообразимой траектории, — домыслы. То же относится и к использованию аномалий для эвакуации человечества с Земли (см. главу 31).

Хотя физики-экспериментаторы, измеряя гравитацию, старательно искали аномалии, которые необъяснимы с точки зрения законов Ньютона или теории относительности, на Земле таких феноменов ни разу зафиксировано не было.

Однако исследования в области квантовой гравитации позволяют предположить, что наша Вселенная — это мембрана (физики укорачивают до «брана»), находящаяся в многомерном

Рис. 3.5. Наша Вселенная в окрестности Солнца, изображенная как двумерная поверхность (или брана), находящаяся в трехмерном балке. В действительности наша брана обладает тремя пространственными измерениями, а балк — четырьмя. Эта схема будет рассмотрена подробнее в главе 4, см. в особенности рис. 4.4



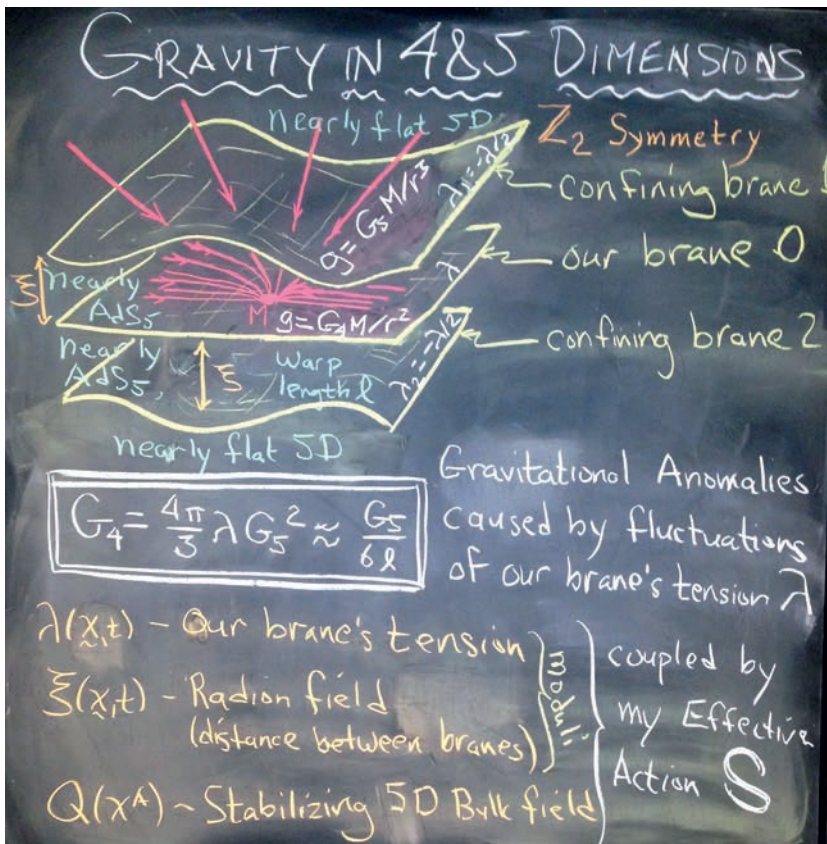


Рис. 3.6. Релятивистские уравнения на доске профессора Брэнда, описывающие возможные обоснования гравитационных аномалий. Подробнее см. в главе 25

«гиперпространстве», которое физики называют словом «балк» (см. рис. 3.5 и главы 4 и 21). Когда физики применяют теорию относительности Эйнштейна к балку (этому посвящены записи на досках в кабинете профессора Брэнда (рис. 3.6)), они отмечают возможность гравитационных аномалий, вызванных действующими в балке физическими полями.

Мы далеки от уверенности, что балк действительно существует. И даже если это так, применимость теории относительности к балку — обоснованное, но предположение. Также мы понятия не имеем, действительно ли в балке, если он существует, действуют поля, способные вызвать гравитационные аномалии, а если и так, то возможно ли эти аномалии использовать. Аномалии и их использование — очень вольные домыслы. Однако домыслы эти основаны на научных идеях, которые мы с некоторыми моими друзьями-физиками охотно поддерживаем — по крайней мере, когда беседуем вечером под пиво. Поэтому они удовлетворяют моим правилам для «Интерстеллар»: «Домыслы... должны быть научно подкреплены, то есть основаны на идеях, которые принимают хотя бы некоторые из уважаемых ученых» (см. главу 1).

Рассказывая по ходу этой книги о каком-либо явлении в «Интерстеллар», я указываю его статус (научная истина, обоснованное предположение или домысел), помещая в начале главы или параграфа один из значков:

И истина

OP обоснованное предположение

Δ домысел

Разумеется, статус может меняться; подобные перемены встречаются и в фильме, и в книге. Для Купера балк — обоснованное предположение, которое становится истиной, когда он попадает в балк с помощью тессеракта (см. главу 29). Законы квантовой гравитации — домысел до тех пор, пока ТАРС не добывает информацию о них в черной дыре, после чего для Купера и Мёрф они становятся истиной (см. главы 28 и 30).

Для физиков XIX века ньютоновский закон обратных квадратов для гравитации был непреложной истиной. Однако примерно в 1980 году произошел революционный переворот из-за обнаружения крошечной аномалии орбиты Меркурия вблизи Солнца (см. главу 24). Закон Ньютона выполняется в нашей Солнечной системе почти всегда — и все же почти. В XX веке аномалия Меркурия расчистила дорогу для эйнштейновской теории относительности, которая сначала была домыслом, затем, когда стали накапливаться данные наблюдений, перешла в разряд обоснованных предположений и наконец к 1980 году, по мере получения все более точных данных, превратилась в научную истину (см. главу 4).

Революции, которые переворачивают устоявшиеся научные истины с ног на голову, случаются крайне редко. Но когда это происходит, последствия для науки и техники трудно переоценить.

Помните ли вы примеры из собственной жизни, когда ваши домыслы становились обоснованными предположениями, а затем — истиной? Случалось ли хоть раз так, что привычные для вас истины рушились, отчего в вашей жизни происходили кардинальные перемены?

Четвертое и пятое измерения

Время как четвертое измерение

И

Пространство нашей Вселенной обладает тремя осями координат: «верх — низ», «восток — запад» и «север — юг». Однако чтобы пообедать с подругой, придется договориться не только о месте встречи, но и о времени. В этом смысле время — четвертая ось координат. Но при этом время отличается от пространственных измерений. Мы можем двигаться на запад или на восток — куда захотим, туда и пойдем. Однако явившись к тому самому обеду, мы не можем внезапно перенестись во времени назад. Как бы мы ни старались, единственный путь — двигаться во времени вперед, и законы теории относительности гарантируют это*.

И все же время — это четвертое измерение нашей Вселенной. Сцена нашей жизни — четырехмерное пространство — время: три пространственных измерения и одно временное.

Когда мы, физики, исследуем пространство — время с помощью экспериментов и расчетов, выясняется, что пространство и время во многом схожи. Простой пример: куда бы мы ни смотрели, мы

* Зато законы теории относительности допускают возврат во времени «обходным маневром»: улететь в космос и вернуться раньше собственного отлета. Я расскажу об этом подробнее в главе 30. *Прим. автора.*

смотрим в прошлое, поскольку свету нужно время, чтобы дойти до наших глаз. Наблюдая квазар, находящийся в миллиарде световых лет от нас, мы видим, каким он был миллиард лет назад, когда лучи света, пришедшие в наш телескоп, только начали свой путь.

Пример посложнее: если вы относительно меня, находящегося на Земле, двигаетесь с большой скоростью, наши мнения по поводу того, синхронно ли произошли некоторые события, могут разойтись. Вам может показаться, что два взрыва, один на Солнце, а другой на Луне, произошли одновременно, тогда как для меня взрыв на Луне произошел на пять минут раньше, чем на Солнце. Для вас разница между взрывами — вопрос пространства, тогда как в моем случае придется добавить «координату» времени.

Такое смешение пространства и времени может показаться сложным для понимания, но оно лежит в основе природы нашей Вселенной. Впрочем, в этой книге (за исключением главы 30) мы можем не обращать на это внимания.

Есть ли балк на свете

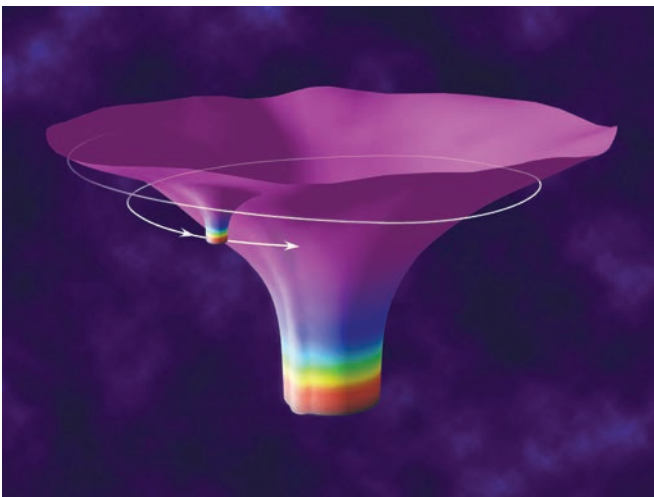


Рис. 21.1. Маленькая черная дыра, падающая по спирали в большую черную дыру: вид из балка, одно пространственное измерение опущено (Рисунок Дона Дэвиса по моему наброску.)

На иллюстрациях к этой книге я изображаю нашу Вселенную как искривленную двумерную мембрану (брану), расположенную в трехмерном балке (как, например, на рис. 21.1). Разумеется, в действительности наша брана имеет три пространственных измерения, а балк — четыре, но мне нелегко такое изобразить, так что обычно я опускаю по одному измерению.

Существует ли балк на самом деле, в реальности, или это лишь плод нашего воображения? Вплоть до восьмидесятых большинство физиков, включая меня, считали балк вымыслом.

Но как же может он быть вымыслом? Разве мы не знаем наверняка, что наше пространство искривлено? Неужто обмен радиосигналами с аппаратами «Викинг» не подтвердил это искривление с высокой точностью (см. главу 4)? Подтвердил... А раз наше пространство искривлено, разве не должно оно прогибаться в некое пространство с большим количеством измерений — в балк?



Нет, не обязательно. Вполне возможно, чтобы наша Вселенная искривлялась и без участия многомерного балка. Мы, ученые, можем выразить искривление нашей Вселенной математически, не привлекая для этого балка. Формулировать законы теории относительности, которые управляют искривлением, можно без участия балка. В сущности, именно так почти всегда мы и поступаем. До восьмидесятых балка был для нас не более чем вспомогательным построением. Построением, позволяющим лучше понять смысл наших расчетов, а также общаться на эту тему друг с другом и с людьми, далекими от физики. Итак, вспомогательное построение, а не явление реальности.

Но что значит «реальный балка»? И как мы можем проверить его реальность? У нас были бы доказательства существования балка, если бы он влиял на наши измерения. И до восьмидесятых мы не видели, каким образом это может происходить.

Но в 1984 году все изменилось, и изменилось в корне. Майкл Грин из Лондонского университета и Джон Шварц из Калтеха совершили революцию в области квантовой гравитации*. Однако — вот так сюрприз! — их рассуждения имели смысл лишь при условии, что наша Вселенная — это брана, находящаяся в балке, у которого одно временное и девять пространственных измерений. То есть в балке, у которого на шесть пространственных измерений больше, чем у нашей браны. Согласно так называемой теории суперструн, которой следовали Грин и Шварц, высшие измерения балка влияют на нашу брану различными способами и, когда человеческие



Рис. 21.2. Слева: Майкл Грин (слева) и Джон Шварц (справа) путешествуют авто-стопом, Аспен, штат Колорадо, 1984. Справа: Майкл Грин (крайний слева) и Джон Шварц (крайний справа) в 2014 году получают за свое открытие премию по фундаментальной физике размером в три миллиона долларов. На заднем плане — Юрий Мильнер (учредитель премии) и Марк Цукерберг (соучредитель социальной сети «Фейсбук»)

* См. главу 3, где вкратце рассказывается о постижении законов квантовой гравитации. *Прим. автора.*

технологии достигнут определенного уровня, эти влияния можно будет измерить в ходе физических экспериментов. И, возможно, это позволит совместить законы квантовой физики с законами эйнштейновской теории относительности.

С момента суперструнной революции Грина — Шварца мы, физики, воспринимаем теорию суперструн очень серьезно и прилагаем много усилий к ее развитию. И, соответственно, мы всерьез воспринимаем идею, что балк существует и может оказывать влияние на нашу Вселенную.

Пятое измерение

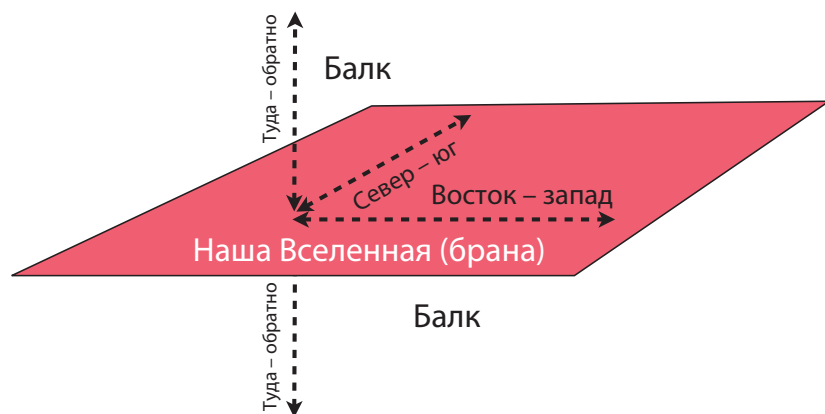
ⓄП

Хоть теория суперструн и утверждает, что у балка на шесть измерений больше, чем у нашей Вселенной, удобнее принять, что дополнительное измерение всего одно (подробнее об этом в главе 23).

Поэтому, а также потому, что шесть дополнительных измерений — это как-то чересчур для фильма, рассчитанного на широкую аудиторию, в «Интерстеллар» балк обладает лишь одним дополнительным измерением, а всего их выходит пять. Балк делит с нашей branой три ее пространственных измерения: «восток — запад», «север — юг» и «верх — низ». И кроме того, он обладает четвертым пространственным измерением, «туда — обратно», которое простирается перпендикулярно нашей brане, над и под ней, как на рис. 21.3.

Измерение «туда — обратно» играет важную роль в фильме, хотя профессор и другие персонажи не называют его так, говоря просто о «пятом измерении». «Туда — обратно» — центральное понятие для следующих двух глав, а также для глав 25, 29 и 30.

Рис. 21.1. Наша Вселенная как brана с четырьмя пространственно-временными измерениями, находящаяся в пятимерном балке. Два измерения — время и «верх — низ» — здесь опущены



Сущности из балка

Двумерная брана и трехмерный балк



В 1844 году Эдвин Эбботт написал сатирический роман под названием «Флатландия». Хотя сатира на викторианскую культуру в этом романе и кажется старомодной, а отношение к женщинам — возмутительным, само место действия книги имеет прямое отношение к «Интерстеллар», и я очень ее вам рекомендую.

Роман повествует о приключениях сущности, имеющей форму квадрата и живущей в двумерной вселенной — Флатландии. Квадрат посещает одномерную вселенную, называемую Лайнландией, нульмерную вселенную — Пойнтландию, и, что производит на него особо сильное впечатление, трехмерную вселенную — Спейсландию*. Кроме того, когда Квадрат живет во Флатландии, его посещает сферическая сущность из Спейсландии.

При нашей первой встрече с Кристофером Ноланом мы с радостью обнаружили, что оба знаем и любим роман Эбботта.



Рис. 22.1. Обложка первого издания «Флатландии»

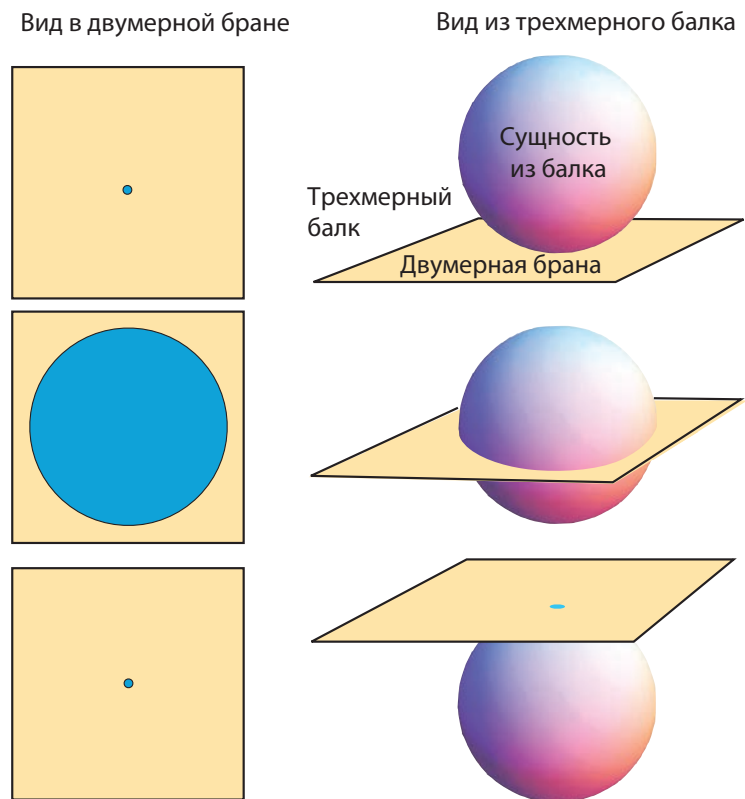
* Flat (англ.) — плоский, line (англ.) — линия, point (англ.) — точка, space (англ.) — пространство. Прим. ред.

Представьте что вы, подобно Квадрату в романе Эбботта, — двумерная сущность, живущая в двумерной вселенной, напоминающей Флатландию. Ваша вселенная может быть поверхностью стола, или листком бумаги, или резиновой мембраной. В традициях современной физики я буду называть ее двумерной браной.

Получив хорошее образование, вы предполагаете существование трехмерного балка, в котором находится ваша брана, но вы в этом не уверены. Представьте свою радость, когда однажды вас посетит сфера из трехмерного балка. «Сущность из балка» — так вы могли бы ее называть.

Сначала вы не понимаете, что это сущность из балка, но понаблюдав за ней и хорошенько подумав, не находите иного объяснения. А наблюдаете вы следующее: внезапно, без предупреждения и непонятно откуда, на вашей бране возникает синее пятно (рис. 22.2 сверху слева). Пятно разрастается, превращаясь в синюю окружность, диаметр которой увеличивается до максимального (рис. 22.2 посередине слева), а затем снова сжимается в точку (рис. 22.2 снизу слева) и, наконец, полностью исчезает.

Рис. 22.2. Трехмерная сфера проходит через двумерную брану



Вы верите в принцип сохранения вещества: никакой объект не может возникнуть из пустоты, но этот — появился. Единственное найденное вами объяснение показано на правой половине рис. 22.2. Трехмерная сущность из балка — сфера — проходит через вашу брану. По мере этого вы наблюдаете в своей бране ее изменяющееся двумерное сечение. Сначала это сечение около «южного полюса» сферы, точка (рис. 22.2 сверху справа). Дойдя до экваториальной плоскости, оно расширяется до окружности максимального диаметра (рис. 22.2 посередине справа). И, наконец, у «северного полюса» оно опять сжимается в точку, после чего исчезает (рис. 22.2 снизу справа).

Представьте, что бы произошло, если бы человек (трехмерная сущность), живущий в трехмерном балке, прошел сквозь вашу двумерную брану. Что бы вы увидели?

Четырехмерные сущности, проходящие сквозь трехмерную брану

И

Допустим, наша Вселенная, с ее тремя пространственными и одним временным измерением, действительно находится в пятимерном балке (четыре пространственных измерения плюс одно временное). И допустим, есть «гиперсферические сущности», живущие в балке. Каждая такая сущность имела бы центр, а также поверхность, состоящую из всех равноудаленных от центра точек в четырех пространственных измерениях (к примеру, удаленных на 30 сантиметров). Поверхность сущности из балка обладала бы тремя измерениями, а ее внутренний объем — четырьмя.

Пусть эта гиперсферическая сущность из балка, путешествуя по балку в направлении «туда» или «обратно», пройдет через нашу брану. Что мы увидим? Ответ очевиден: мы увидим сферические сечения гиперсферы (рис. 22.3).

Сначала из ниоткуда возникнет точка (1). Она увеличится, став трехмерной сферой (2). Сфера вырастет до максимального диаметра (3), затем сожмется (4), уменьшится до точки (5) и исчезнет. Как вы думаете, что мы увидим, если четырехмерный человек из балка пройдет сквозь нашу брану? Чтобы рассуждать об этом, придется сначала представить себе, как четырехмерный человек — две ноги, туловище, две руки, голова — «должен выглядеть» в балке, в четырех измерениях, и на что будут похожи его сечения.

Рис. 22.3. Гиперсферическая сущность из балка проходит сквозь нашу брану: вид из браны

Вид из трехмерной браны



Природа сущностей из балка и их гравитация



Если сущности из балка вообще есть, то из чего они состоят? Определенно не из той же материи с атомным строением, что и мы, — атомы могут существовать лишь в трех пространственных измерениях, а не в четырех. То же можно сказать и о субатомных частицах, и об электрических и магнитных полях (см. главу 2), а также о силах, которые удерживают атомные ядра вместе.

Некоторые выдающиеся физики пытались понять, как ведет себя вещество, а также поля и силы, если наша Вселенная действительно является браной в многомерном балке. Эти попытки явственно приводили к выводу, что все известные людям частицы, все силы и все поля привязаны к нашей бране. За единственным исключением — за исключением гравитации и связанных с ней искривлений пространства — времени.

Возможно, существуют другие виды материи, и полей и сил, которые обладают четырьмя измерениями и существуют в балке. Но даже если они есть, их природа нам неведома. Мы можем строить домыслы, и порой именно этим физики и занимаются. Однако у нас нет данных наблюдений и экспериментов, которые могли бы послужить нам путеводной звездой. Подобные домыслы, выраженные языком формул, мы встречаем в «Интерстеллар» на досках в кабинете профессора Брэнда (см. главу 25).

Есть разумное, но лишь частично обоснованное предположение, гласящее, что если многомерные силы, поля и частицы существуют, мы никогда не сможем их почувствовать или увидеть. Когда сущность из балка пройдет сквозь нашу брану, мы не увидим, из чего она состоит. Сечения сущности из балка будут «прозрачны».

Но, с другой стороны, мы зафиксируем гравитацию сущности и порождаемые этой гравитацией искривления пространства — времени. Например, если в моем желудке появится гиперсферическая сущность из балка, обладающая достаточно сильным гравитационным притяжением, мышцы начнут сопротивляться этому притяжению, влекущему их к центру сферического сечения сущности из балка, и у меня скрутит живот. А если сечение сущности из балка появится на фоне разноцветной стены, искривление пространства может линзировать цветные клетки, как на рис. 22.4 (сверху).

Если же сущность из балка будет вращаться, она может вовлечь пространство в вихревое движение, которое я смогу ощущать и видеть; см. рис. 22.4 снизу.

Сущности из балка в «Интерстеллар»



Все персонажи фильма уверены в, извините за тавтологию, существовании сущностей из балка, хоть и редко называют их так. Обычно персонажи говорят о сущностях из балка: «Они» — благоговейно, с большой буквы. Амелия Брэнд говорит Куперу: «Кем бы Они ни были, похоже, что Они заботятся о нас. Червоточина позволяет нам путешествовать к другим звездам, и появилась она в точности тогда, когда это нам понадобилось».

Одна из захватывающих идей, которую Кристофер Нолан заронил в умы зрителей: возможно, в действительности Они — это наши потомки, люди, которые в далеком будущем эволюционировали, обретя дополнительное измерение и перейдя в балк. В конце фильма Купер говорит ТАРСу: «Ты еще не понял, ТАРС? Они — это мы, и стараются помочь, так же как я старался помочь Мёрф». ТАРС отвечает: «Люди не могли создать тессеракт [по которому перемещается Купер, см. главу 29. — *К. Т.*]» «Пока нет, — отвечает Купер, — но однажды... Не мы, но люди, эволюционировавшие, вышедшие за пределы известных нам четырех измерений».

Купер, Брэнд и остальные члены экипажа «Эндюранс» никогда не ощущали и не видели действие гравитации наших потомков из балка или вызванные ею искривления и завихрения пространства. (Это, пожалуй, хорошая тема для продолжения фильма.) Однако Купер, перемещаясь через балк в тессеракте из главы 29, дотягивается до экипажа «Эндюранс» и до себя в прошлом через балк с помощью гравитации. Брэнд чувствует и видит его присутствие, и думает, что он — это Они.



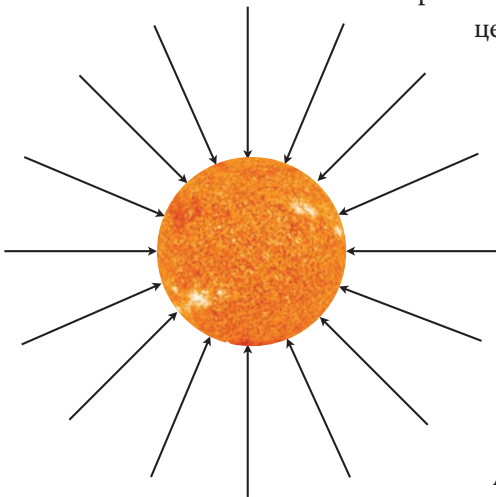
Рис. 22.4. Сущность из балка, проходя сквозь нашу брану, искажает воспринимаемое нами изображение разноцветной стены

Ограничение гравитации

Проблема гравитации в пяти измерениях

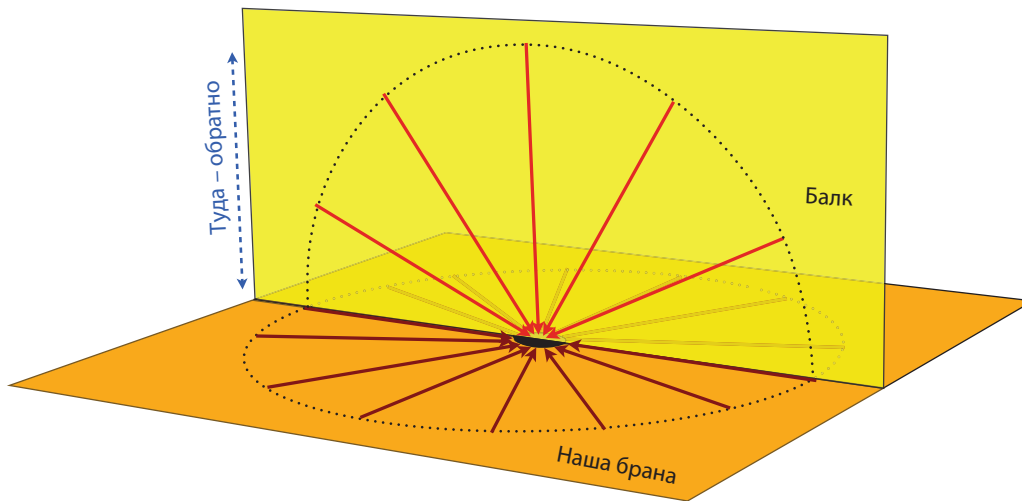
ⓄП

Рис. 23.1. Силовые линии гравитационного поля вокруг Солнца



Если балк существует, его пространство должно быть искривленным. Не будь оно искривлено, гравитация подчинялась бы закону обратных кубов вместо закона обратных квадратов, и тогда Солнце не смогло бы удерживать рядом свои планеты — они разлетелись бы в разные стороны.

Ладно-ладно, я не буду спешить и объясню подробнее. Вспомним (из главы 2), что силовые линии гравитационного поля Солнца (как и Земли и любых других сферических тел) устремлены к его центру и притягивают объекты к Солнцу в радиальном направлении (рис. 23.1). Сила гравитационного притяжения Солнца пропорциональна плотности силовых линий (количеству линий, проходящих через заданную площадь). А поскольку поверхности вложенных одна в другую сфер, через которые проходят линии, имеют два измерения, плотность линий уменьшается с увеличением радиуса сферы r как $1/r^2$, и так же



уменьшается сила гравитации. Это ньютоновский закон обратных квадратов для гравитации.

Теория струн утверждает, что в балке гравитация тоже описывается силовыми линиями. Если пространство балка не искривлено, то силовые линии гравитационного поля Солнца будут радиально распространяться наружу, в балк (рис. 23.2). Поскольку балк обладает дополнительным измерением (в «Интерстеллар» всего одним), есть не два, а три перпендикулярных измерения, в которых гравитация может распространяться. Следовательно, если балк существует и не искривлен, плотность силовых линий, а значит, и сила гравитации должны при удалении от Солнца уменьшаться как $1/r^3$, а не как $1/r^2$ *. Солнечное притяжение, действующее на Землю, будет в 200 раз слабее, а действующее на Сатурн — в 2000 раз слабее. Этак Солнце не сможет удержать планеты рядом с собой, и они улетят прочь, в межзвездное пространство.

Однако планеты никуда не улетают, и их поведение однозначно показывает, что солнечная гравитация убывает как обратный квадрат расстояния. Отсюда следует неизбежный вывод: если балк существует, он должен быть искривлен таким образом, чтобы гравитация не могла распространяться в пятое измерение, в измерение «туда — обратно».

Рис. 23.2. Силовые линии гравитационного поля распространяются в балке радиально, если балк не искривлен. Пунктирные окружности изображены здесь лишь для наглядности (Перерисовка с иллюстрации из книги Лизы Рэндалл «Закрученные пассажи: Проникая в тайны скрытых измерений пространства» [Рэндалл 2011].)

* Сила притяжения, обратно пропорциональная квадрату расстояния, обеспечивает также замкнутость траектории небесного тела, вращающегося вокруг Солнца. Если пропорцию нарушить, возможны незамкнутые траектории, полностью заполняющие пространство между двумя фиксированными окружностями в плоскости вращения. *Прим. науч. ред.*

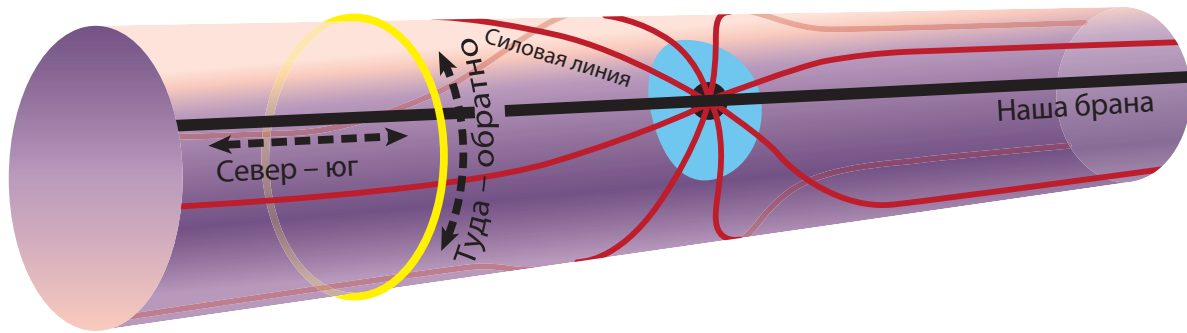


Рис. 23.3. Если измерение «туда — обратно» (желтая линия) свернуто, тогда за пределами синего диска силовые (красные) линии гравитационного поля частицы проходят параллельно нашей бране

Может быть, пятое измерение свернуто?



Если бы измерение «туда — обратно» в балке было свернуто в узкий рулон, то гравитация не могла бы далеко распространиться в балк и закон обратных квадратов был бы восстановлен.

На рис. 23.3 этот случай показан для крохотной частицы, находящейся в центре синего диска. Два пространственных измерения на этом рисунке опущены, показано лишь одно измерение нашей браны (пусть это будет «север — юг»), а также измерение балка «туда — обратно». Рядом с частицей, внутри синего диска, силовые линии распространяются в измерении «туда — обратно» так же, как и в измерении «север — юг», поэтому (если восстановить отсутствующие на рисунке измерения) сила гравитации там подчиняется закону обратных кубов. Однако из-за того, что измерение «туда — обратно» свернуто, вне синего диска силовые линии проходят параллельно нашей бране. Они уже не распространяются «туда — обратно» — ньютоновский закон обратных квадратов восстановлен.

Изучающие квантовую гравитацию физики считают, что такова судьба всех дополнительных измерений (кроме, быть может, одного или двух): они свернуты в микроскопических масштабах, что препятствует «утечке» гравитации. В «Интерстеллар» Кристофер Нолан игнорирует эти свернутые измерения, сосредоточиваясь лишь на одном измерении балка, которое не свернуто. Это и есть его пятое измерение, «туда — обратно».

Почему бы измерению «туда — обратно» в фильме не быть свернутым? Для Криса ответ очевиден: масштабы свернутого балка микроскопичны — слишком малы, чтобы быть местом действия увлекательного научно-фантастического фильма. Верно это и для Купера, путешествующего через балк в тессеракте — тессеракту нужно куда больше пространства, чем может предоставить свернутое измерение.



Рис. 23.4. Раман СанDRAM (род. 1964) и Лиза Рэндалл (род. 1962)

«Туда — обратно»: искривление анти-де-Ситтера

ОП

В 1999 году Лиза Рэндалл из Принстонского университета и Массачусетского технологического института вместе с Раманом СанDRAMом из Бостонского университета (рис. 23.4) придумали еще один способ ограничить распространение силовых линий гравитационного поля в балке: в балке может иметь место так называемое искривление анти-де-Ситтера*. Причиной этого искривления могут служить «квантовые флуктуации полей балка». Но они не относятся к тому, о чем я хочу рассказать сейчас, поэтому я опущу объяснения**. Пока что достаточно сообщить, что это весьма естественный

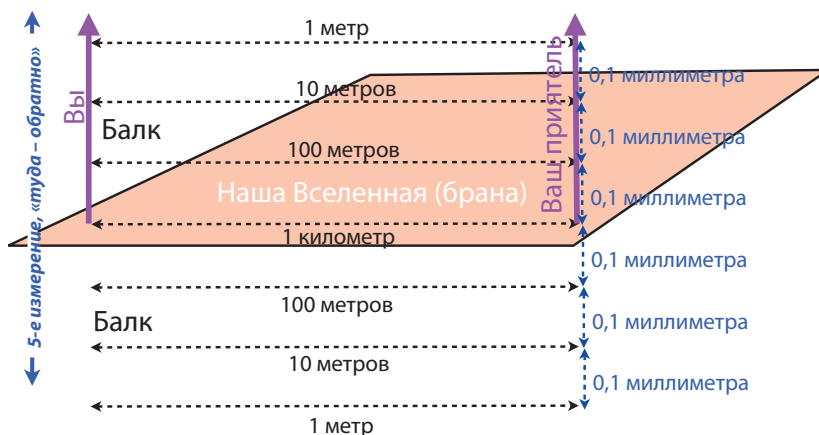


Рис. 23.5. AdS-искривление балка

* Виллем де Ситтер (1872–1934) — нидерландский астроном. Прим. ред.

** О квантовых флуктуациях я расскажу в главе 26, а о полях балка — в главе 25. Прим. автора.

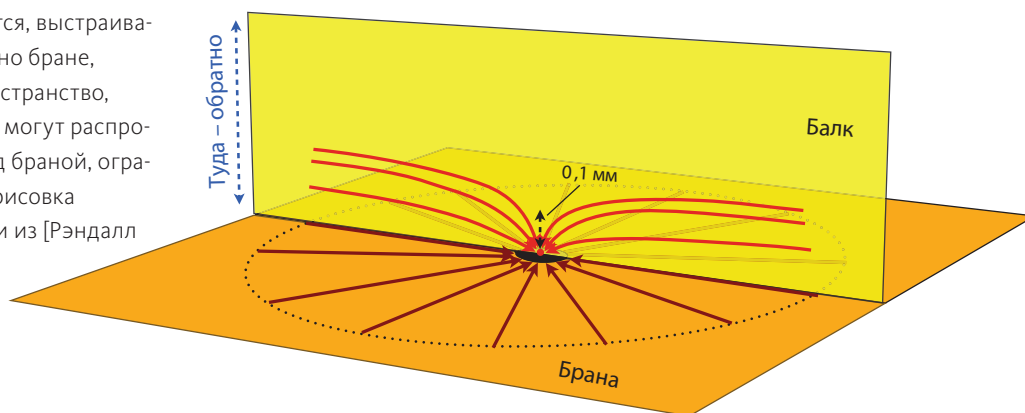
механизм образования искривлений. Однако само искривление анти-де-Ситтера* (обозначается AdS) вряд ли покажется вам естественным. Скорее ровно наоборот.

Представьте, что вы микроб, живущий в микроскопическом тессеракте (см. главу 29). Вы путешествуете в своем тессеракте, покидая брану перпендикулярно ей (направление вверх на рис. 23.5). И, положим, у вас есть приятель-микроб, который тоже путешествует перпендикулярно бране. Когда вы с приятелем покидаете брану, вы находитесь на расстоянии один километр друг от друга. Хотя вы оба перемещаетесь в точности перпендикулярно бране, из-за AdS-искривления расстояние между вами резко сокращается. Когда вы поднимаетесь над браной на десятую долю миллиметра (толщина человеческого волоса), расстояние между вами сокращается в десять раз: от километра до 100 метров. Следующие 0,1 миллиметра сокращают расстояние еще в 10 раз, до 10 метров, следующие — до метра, и т. д.

Такое сокращение расстояний параллельно нашей бране нелегко себе представить. Я не знаю, как изобразить это лучше, чем на рис. 23.5. И у этого феномена есть удивительные особенности.

AdS-искривление может решить загадку, известную под названием «проблема калибровочной иерархии», — но рамки книги не позволяют рассказать об этом сколь-нибудь подробно**. Что же касается гравитации, из-за сокращения расстояний при AdS-искривлении, силовые линии гравитационного поля могут распространяться лишь на малые области над и под браной. Вблизи браны,

Рис. 23.6. Если в балке происходит AdS-искривление, силовые линии гравитационного поля изгибаются, выстраиваясь параллельно бране, поскольку пространство, в котором они могут распространяться над браной, ограничено (Перерисовка с иллюстрации из [Рэндалл 2011].)



* Пространство анти-де-Ситтера имеет отрицательную кривизну (подобно гиперболоиду в гиперпространстве). Характеристики этого пространства также включают в себя космологическую постоянную, связанную (как полагают) с квантовыми флуктуациями вакуума. *Прим. науч. ред.*

** См. [Рэндалл 2011]. *Прим. автора.*

на расстоянии до 0,1 миллиметра, силовые линии безнаказанно распространяются в трех перпендикулярных измерениях, отчего гравитация подчиняется здесь закону обратных кубов. Однако дальше 0,1 миллиметра от браны силовые линии изгибаются параллельно бране, распространяясь всего в двух перпендикулярных измерениях, вследствие чего гравитация подчиняется привычному нам закону обратных квадратов*.

AdS-бутерброд: в балке становится просторно



К сожалению, из-за стремительного сокращения параллельных бране расстояний по мере отдаления от нее объем балка над и под браной слишком тесен для Купера с его тессерактом, да и вообще для любой человеческой деятельности. Я осознал эту проблему еще в 2006 году, когда «Интерстеллар» был лишь в проекте, и быстро нашел выход (для Кип-версии): ограничим AdS-искривление тонким слоем пространства вблизи нашей браны, соорудив этакий «бутерброд». Для этого поместим еще две браны — назовем их ограничительными — рядом с нашей, как на рис. 23.7. В бутерброде между ограничительными бранами балк подвержен AdS-искривлению. Однако вне бутерброда балк совершенно не искривлен, что дает предостаточно места для научной фантастики с приключениями в балке.

Насколько толстым должен быть бутерброд? Достаточно толстым, чтобы «укладывать» силовые линии гравитационного поля, исходящие из нашей браны, вдоль нее и удерживать их в таком положении (дабы в нашей бране гравитация подчинялась закону обратных квадратов). Но не толще, поскольку это вызовет увеличение общего перпендикулярного сжатия, что станет препятствием

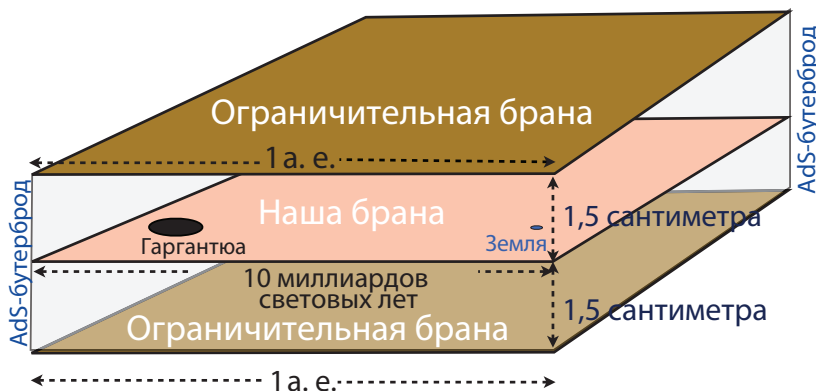


Рис. 23.7. AdS-бутерброд с двумя ограничительными бранами. AdS-слой между бранами обозначен светло-серым

для приключений в балке. (Представьте, что вся наша Вселенная, если смотреть снаружи AdS-слоя, сжата до размеров булавочной головки!) Нужная толщина бутерброда составит около трех сантиметров, так что при путешествии от нашей браны к ограничительной бране параллельные нашей бране расстояния сожмутся в 10^{15} (тысячу триллионов) раз.

В Кип-версии Гаргантюа находится в дальнем участке наблюдаемой Вселенной, на расстоянии примерно 10 миллиардов световых лет от Земли. Купер в тессеракте проникает сквозь AdS-слой, из недр Гаргантюа в балк. Там расстояние до Земли равно 10 миллиардам световых лет, деленным на тысячу триллионов, что примерно равно расстоянию между Солнцем и Землей, или одной астрономической единице (1 а. е.), см. рис. 23.7. Затем Купер преодолевает это расстояние в 1 а. е. через балк, параллельно нашей бране, чтобы достичь Земли и встретиться с Мёрф, см. рис. 29.4.

Внимание! Внимание! Бутерброд нестабилен!



В 2006 году я воспользовался законами теории относительности, чтобы вывести математическое описание AdS-слоя и ограничительных бран. Поскольку прежде я не имел дела с теорией относительности в пяти измерениях, я попросил Лизу Рэндалл оценить мои выкладки. Лиза быстро их просмотрела, а затем сообщила мне кое-какие новости: как хорошие, так и плохие.

Хорошие новости: моя идея AdS-бутерброда уже была изобретена шесть лет назад; это сделала Рут Грегори из Даремского университета в Англии совместно с Валерием Рубаковым и Сергеем Сибиряковым из Объединенного института ядерных исследований в России. Выходит, я неплохо себя проявил в своем первом математическом вторжении в балк и заново открыл что-то стоящее.

Плохие новости: Эдвард Виттен (Принстон) и другие показали, что AdS-бутерброд нестабилен! Ограничительные браны находятся под давлением, подобно игральной карте, которую держат между указательным и большим пальцем (рис. 23.8). Карта гнется, а если сжать сильнее — коробится. Также и ограничительные браны будут выгибаться, пока не столкнутся с нашей браной (нашей Вселенной), уничтожив ее. Уничтожение целой Вселенной! Хорошенькое дело!

Однако я могу представить несколько способов спасти нашу Вселенную, если она действительно находится посередине AdS-бутерброда (в чем я очень сомневаюсь), — выражаясь языком физиков, несколько способов «стабилизации ограничительных бран».



Рис. 23.8. Игральная карта, если сжимать ее с краев, гнется, а затем коробится

Согласно Кип-версии, профессор Брэнд, работая с уравнениями теории относительности, заново открывает AdS-бутерброд (так же, как это сделал я); см. его доску на рис. 3.6. Вопрос стабилизации ограничительных бран становится затем частью работы профессора по исследованию и укрощению гравитационных аномалий. В фильме показано шестнадцать досок в кабинете профессора Брэнда, математические выкладки на которых отражают его усилия.

Путешествие сквозь AdS-слой



AdS-искривление порождает в AdS-слое приливные силы, которые по человеческим стандартам просто чудовищны. Каждой сущности из балка, проходящей через этот слой по пути в нашу брану, придется иметь дело с этими силами. Поскольку нам неизвестно, из какого вещества (вещества с четырьмя пространственными измерениями) состоят сущности из балка, мы не можем знать, явится ли это для них проблемой. В научной фантастике этот вопрос остается на совести писателей и сценаристов.

Но для Купера, путешествующего в тессеракте (см. главу 29), все не так просто, ведь в Кип-версии ему необходимо пройти через AdS-слой. Поэтому нужно чтобы тессеракт либо защищал его от действующих в AdS-слое огромных приливных сил, либо отодвигал AdS-слой прочь с дороги — иначе Купера растянет в макароны*.

Ограничивая гравитацию, AdS-слой регулирует ее силу. В «Интерстеллар» мы видим колебания гравитации — возможно, они вызваны флуктуациями в AdS-слое. Эти флуктуации — гравитационные аномалии — играют ключевую роль в фильме. Поговорим теперь о них.

* Сильное растяжение объектов под действием приливных сил ученые пошутливо называют «эффект лапши» или «спагеттификация». *Прим. перев.*