

СКЛАДКИ НА ТКАНИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ

ЭЙНШТЕЙН,
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ
И БУДУЩЕЕ АСТРОНОМИИ

ГОВЕРТ ШИЛЛИНГ

Перевод с английского

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва
2019

УДК 52-423
ББК 22.632
Ш58

Переводчик Наталья Колпакова
Научный редактор Олег Верходанов, д-р физ.-мат. наук
Редактор Антон Никольский

Шиллинг Г.

Ш58 Складки на ткани пространства-времени. Эйнштейн, гравитационные волны и будущее астрономии / Говерт Шиллинг ; Пер. с англ. — М. : Альпина нон-фикшн, 2019. — 423 с.

ISBN 978-5-91671-847-8

Гравитационные волны были предсказаны еще Эйнштейном, но обнаружить их удалось совсем недавно. В отдаленной области Вселенной коллапсировали и слились две черные дыры. Продолав путь, превышающий 1 миллиард световых лет, в сентябре 2015 года они достигли Земли. Два гигантских детектора LIGO зарегистрировали мельчайшую дрожь. Момент первой регистрации гравитационных волн признан сегодня научным прорывом века, открывшим ученым новое понимание процессов, лежавших в основе формирования Вселенной. Книга Говерта Шиллинга — захватывающее повествование о том, как ученые всего мира пытались зафиксировать эту неуловимую рябь космоса: десятилетия исследований, перипетии судеб ученых и проектов, провалы и победы. Автор описывает на первый взгляд фантастические технологии, позволяющие обнаружить гравитационные волны, вызванные столкновением черных дыр далеко за пределами нашей Галактики. Доступным языком объясняя такие понятия, как «общая теория относительности», «нейтронные звезды», «взрывы сверхновых», «черные дыры», «темная энергия», «Большой взрыв» и многие другие, Шиллинг постепенно подводит читателя к пониманию явлений, положивших начало эре гравитационно-волновой астрономии, и рассказывает о ближайшем будущем науки, которая только готовится открыть многие тайны Вселенной.

УДК 52-423
ББК 22.632

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу mylib@alpina.ru

© Govert Schilling, 2017
This edition published by arrangement with The Science Factory, Louisa Pritchard Associates and The Van Lear Agency LLC

ISBN 978-5-91671-847-8 (рус.)
ISBN 978-0674971660 (англ.)

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2019

Издание подготовлено в партнерстве
с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория»
(при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).



ТРАЕКТОРИЯ

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

Содержание

Предисловие	9
Введение.....	15
1. Знакомство с пространственно-временным континуумом....	18
2. Все относительно	39
3. Теория Эйнштейна проходит проверку	61
4. А есть ли волны: дискуссия с переходом в потасовку	85
5. Как живут звезды.....	105
6. Точность часовых механизмов.....	125
7. Лазерная эпопея.....	146
8. Путь к совершенству.....	166
9. О сотворении мира.....	191
10. Ложная тревога.....	211
11. Попалась!.....	234
12. Черная магия.....	258
13. Нанонаука	281
14. Быстрая реакция.....	304
15. Прорыв в космос.....	329
16. Новости гравитационно-волновой астрономии	353
После того как вышла эта книга	374
Приложение.....	376
Авторство иллюстраций.....	385
Примечания и дополнительная литература.....	387
Предметно-именной указатель	403

Предисловие

Среди выдающихся ученых Эйнштейн заслуженно занимает особое место. Его понимание пространства и времени полностью изменило наши представления о гравитации и космосе. Знакомый каждому образ веселого мудреца с седой шевелюрой тиражируется на плакатах и футболках, однако свои главные труды он завершил в молодости — мировая слава настигла его, когда ему не было и 40 лет. 29 мая 1919 г. произошло солнечное затмение. Группа под руководством астронома Артура Эддингтона фотографировала звезды вблизи Солнца, которые во время затмения становятся доступными для наблюдения. Измерения показали, что звезды смещены относительно нормального положения в небе, поскольку их свет отклоняется гравитацией Солнца. Это подтвердило один из ключевых прогнозов Эйнштейна. О результатах сообщили в Лондонском Королевском обществе, и мировая пресса подхватила новость. «Лучи искривляются в небесах: триумфальное подтверждение теории Эйнштейна!» — гласил несколько преувеличенный заголовок в *The New York Times*.

Общая теория относительности (ОТО), предложенная Эйнштейном в 1915 г., — это торжество чистой мысли и научного прозрения. Практические следствия из нее нам, землянам, почти незаметны. Требуется разве что чуть-чуть подстраивать часы, используемые в современных системах навигации, но для запуска и сопровождения космических аппаратов достаточно наследия Ньютона.

Осознанная Эйнштейном связь пространства и времени — тот факт, что «пространство указывает материи, как двигаться, материя указывает пространству, как искривляться», — играет решающую роль во многих космических явлениях. Однако проверить теорию, эффекты которой проявляются на огромном удалении, сложно. Почти полвека ОТО оставалась на обочине развития физики, но с 1960-х гг. накопилось достаточно свидетельств в пользу двух ключевых предположений Эйнштейна — Большого взрыва, предопределившего расширение Вселенной, и существования черных дыр (ЧД).

В феврале 2016 г., почти через 100 лет после знаменитого собрания Королевского общества, где прозвучал отчет об экспедиции астрономов, наблюдавших солнечное затмение, теория Эйнштейна была подкреплена заявлением — на сей раз в пресс-клубе в Вашингтоне — о регистрации обсерваторией LIGO* гравитационных волн. Этой теме посвящена книга Говерта Шиллинга — увлекательное повествование, охватывающее период более 100 лет.

Эйнштейн видел силу гравитации как «искривление» пространства. Меняя форму, гравитирующие объекты возбуждают волны в пространстве. Когда такая волна оказывается вблизи Земли, наша область пространства «дрожит» — попеременно растягивается и сжимается по мере прохождения сквозь нее гравитационных волн. Однако этот эффект практически незаметен, поскольку сила гравитации — слабое взаимодействие. Гравитационное притяжение объектов, окружающих нас в повседневной жизни, ничтожно. Взмахнув двумя гантелями, вы возбуждете гравитационные волны, но пренебрежимо слабые. Даже планеты, вращающиеся

* Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — Лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория. — *Прим. ред.*

вокруг звезд, или взаимно обращающиеся двойные звезды не создают достаточно сильных волн, чтобы их можно было зарегистрировать.

Астрономы пришли к выводу, что источники, доступные для наблюдения LIGO, должны обладать намного более мощной гравитацией, чем обычные звезды и планеты. В идеале это события с участием ЧД. О существовании ЧД известно почти 50 лет. Большинство являются остатками звезд в 20 и более раз массивнее Солнца. Такие звезды ярко светят и гибнут в катаклизме (о котором свидетельствует вспышка сверхновой), причем их внутренняя часть коллапсирует в ЧД. Звездная материя «изымается» из Вселенной, оставляя на покинутом пространстве гравитационный отпечаток.

Две ЧД, которым предстоит образовать двойную систему, постепенно сближаются по спирали. По мере их сближения прилегающее пространство испытывает все большее возмущение, наконец они сливаются в одну вращающуюся ЧД, которая колеблет пространство и «звенит», порождая все новые волны, пока не успокоится и не затихнет. Чирп — сотрясение пространства, ускоряющееся и усиливающееся вплоть до момента слияния ЧД, а затем затухающее, — может зафиксировать LIGO. В нашей Галактике такой катаклизм случается реже чем раз в 1 млн лет. Однако подобное событие порождает сигнал, поддающийся регистрации LIGO, даже если происходит за 1 млрд световых лет* от нас — миллионы галактик находятся на меньшем расстоянии. Для обнаружения даже самых благоприятствующих наблюдению событий требуется невероятно чувствительная и очень дорогая аппаратура. В детекторах LIGO пучки мощного лазерного излучения проходят через четырехкилометровые трубы с вакуумом внутри и отражаются от зеркал, установленных в каждом торце труб. Анализируя параметры световых сигналов, можно выявить

* Далее св. лет. — *Прим. ред.*

изменение расстояния между зеркалами, попеременно увеличивающегося и уменьшающегося при расширениях и сжатиях пространства. Амплитуда этого колебания чрезвычайно мала — около $0,0000000000001$ см (1×10^{-13} см), в миллионы раз меньше размера атома*. В обсерватории LIGO используется два одинаковых детектора, разнесенных на расстояние 3000 км, — один находится в штате Вашингтон, другой — в Луизиане. Единичный детектор реагировал бы на микросейсмические волны, проезжающие мимо транспортные средства и т. п. Чтобы исключить ложную тревогу, экспериментаторы берут в расчет лишь те события, которые регистрируются обоими детекторами.

Несколько лет LIGO ничего не обнаруживала. Обсерватория была модернизирована и вновь полноценно заработала в сентябре 2015 г., и тогда после десятилетий разочарований пришел успех — был зарегистрирован чирп, свидетельствующий о столкновении двух ЧД более чем в 1 млрд св. лет от Земли. Возникла новая область науки — экспериментальное исследование динамических характеристик пространства.

К сожалению, широко разрекламированные заявления ученых об открытиях иногда оказываются ошибкой или преувеличением. Подобное случалось и в этой сфере наук, примеры чего я привожу в своей книге. Я считаю себя скептиком, не склонным к легковерию. Но заявления исследователей, работающих с LIGO, — итог нескольких десятков лет усилий опытных ученых и инженеров — звучат убедительно, и на сей раз я уверен, что не разочаруюсь.

Получение этих данных — настоящий прорыв, одно из величайших открытий десятилетия, не уступающее по значимости открытию бозона Хиггса, вызвавшему ажиотаж

* Боровский радиус атома водорода около 5×10^{-11} м. Оценка амплитуды колебания для атома водорода — в десятки тысяч раз меньше его размера. — *Прим. науч. ред.*

в 2012 г. Существование бозона Хиггса являлось базисом Стандартной модели физики элементарных частиц, развивавшейся несколько десятилетий. Аналогично гравитационные волны — пульсации ткани пространства — важнейшее и принципиальное следствие ОТО Эйнштейна.

Питер Хиггс 50 лет назад предсказал существование частицы, названной его именем, но обнаружение бозона и установление его свойств стало возможным лишь с развитием технологий. Для этого потребовалась огромная установка — Большой адронный коллайдер. Гравитационные волны были предсказаны еще раньше, но с их обнаружением пришлось повременить, поскольку зафиксировать крайне слабый эффект невозможно без крупномасштабного и исключительно точного оборудования.

Полученные результаты не только с помощью нового метода подтверждают теорию Эйнштейна, но и углубляют знания о звездах и галактиках. Астрономических свидетельств существования ЧД и массивных звезд мало — трудно спрогнозировать, сколько таких объектов окажется в пределах, доступных для наблюдения. Пессимисты полагали, что эти события чрезвычайно редки и даже обновленная, усовершенствованная LIGO ничего не обнаружит, по крайней мере год или два. В действительности, если это не исключительная «везучесть новичка», была открыта новая область астрономии, изучающая динамические характеристики самого пространства, а не наполняющей его материи. К исследованиям подключились другие детекторы в Европе, Индии и Японии, разрабатываются планы запуска аппаратуры в космос.

К сожалению, очень многие ученые уклоняются от популярного объяснения своих идей и открытий, считая их слишком мудреными и сложными для понимания. Ученые излагают свои мысли языком математики, большинству не знакомым, но самое важное можно объяснить обычными словами, если владеешь ремеслом писателя. Говерт Шиллинг — один

из лучших авторов, пишущих о науке, — в этой книге он превзошел самого себя. Его повествование охватывает более 100 лет. Ключевые понятия излагаются ясно и интересно и помещаются в исторический контекст, дополняясь образами ученых, отметившихся на этом пути. Некоторые из них были буквально одержимы наукой, что неудивительно, — нужно быть одержимым, чтобы посвящать годы и даже десятилетия сложным экспериментам без малейших гарантий результата. Усилия одиночек опирались на труд сотен специалистов, объединявшихся в команды. Говерт Шиллинг рассказывает о яростных спорах, неудачах и поразительных технических достижениях ученых и инженеров, десятилетиями добивавшихся фантастической точности измерений и получивших эпохальные свидетельства существования пульсаций пространства и времени. Это удивительная история в захватывающем изложении.

Мартин Рис

Введение

На далекой окраине спиральной галактики вокруг заурядной звезды — желтого карлика — обращается маленькая планета, образовавшаяся примерно 3,3 млрд лет назад из скопления пыли и более крупных частиц. Из космического пространства в ее теплые океаны попали органические соединения, из которых сформировались самореплицирующиеся молекулы. Теперь эти воды изобилуют одноклеточными формами жизни. Пройдет не слишком много времени, и жизнь на голубой планете начнет осваивать пустынные прежде континенты.

В другой оконечности огромной Вселенной короткое существование двух сверхмассивных звезд завершается колоссальными вспышками сверхновых. Вследствие этого катастрофического события образуется тесная двойная система ЧД, каждая из которых в десятки раз массивнее далекого желтого карлика. Их гравитация притягивает газ и пыль, оказавшиеся поблизости, и искривляет траекторию света в прилегающем пространстве. Ничто не может вырваться из чудовищного гравитационного поля этой космической бездонной ямы.

Вращаясь вокруг общего центра масс, ЧД порождают волны — слабые пульсации пространства-времени, распространяющиеся со скоростью света. Волны уносят энергию, вследствие чего ЧД все больше сближаются, пока не начинают совершать несколько сотен оборотов в секунду со скоростью в половину скорости света. Пространственно-временной континуум растягивается и сжимается, слабые возмущения превращаются

в мощные волны. Наконец, две ЧД коллапсируют и сливаются в одну, что сопровождается сильнейшим выбросом гравитационной энергии. На месте катастрофы вновь воцаряется покой, но отголоски события — последние мощные всплески гравитации — распространяются в космосе, словно цунами.

Отзвуки гибели пары ЧД достигают границ нашей спиральной галактики лишь через 1,3 млрд лет. За это время они становятся гораздо слабее, и, хотя по-прежнему сжимают и растягивают все объекты на своем пути, этого никто не замечает. Поверхность голубой планеты теперь покрыта папоротниками и деревьями, гигантские рептилии уже вымерли из-за последствий столкновения с астероидом, а эволюция одного из множества видов здешних млекопитающих увенчалась появлением любознательных двуногих созданий.

Гравитационные волны, порожденные слиянием двух ЧД, входят во внешнюю область Млечного Пути. Теперь им потребуется всего лишь 100 000 лет, чтобы достичь окрестностей Солнца. Пока они несутся со скоростью 300 000 км/с к Земле, ее разумные обитатели приступают к изучению Вселенной, частью которой являются. Они шлифуют линзы для телескопов, открывают новые планеты и их спутники и составляют карту Млечного Пути.

За 100 лет до момента встречи гравитационных волн с Землей — когда они прошли 99,99999% пути продолжительностью 1,3 млрд лет — 26-летний ученый Альберт Эйнштейн заявляет о теоретической возможности их существования. Проходит еще полвека, прежде чем люди всерьез берутся за поиски этих волн. Наконец в начале XXI в. появляются достаточно чувствительные детекторы. Проработав лишь несколько дней, аппаратура регистрирует слабые колебания, амплитуда которых много меньше размера атомного ядра.

В понедельник, 14 сентября 2015 г., в 09:50:45 по Гринвичу предположение, выдвинутое Эйнштейном 100 лет назад, подтверждается: астрономы получают гравитационное

«сообщение» о коллапсе ЧД, произошедшем в чрезвычайно отдаленной галактике.

Первая прямая регистрация гравитационной волны по праву считается одним из величайших научных открытий нового столетия. Последующая регистрация волн с помощью еще более чувствительных приборов откроет перед астрономами совершенно новые возможности изучения Вселенной и подарит физикам надежду разгадать наконец тайну пространства и времени.

Замысел этой книги зародился у меня за несколько лет до появления в интернете информации о проекте LIGO — лазерно-интерферометрической обсерватории гравитационных волн. Было бы замечательно, подумал я, окончить рукопись одновременно с первым в истории наблюдением гравитационной волны. Книгу можно было бы опубликовать вскоре после сообщения об эксперименте, упомянув о полученных результатах в эпилоге.

Научно-технический прогресс, однако, оказался более стремительным, чем я предполагал. Едва ли кто ожидал, что первые же дни использования детектора принесут успех. Как результат, большую часть исследований и работы над рукописью мне пришлось проделать *после* эпохального открытия. Теперь, когда книга окончена, я вижу, что все сложилось наилучшим образом — открытие стало не постскриптумом, а неотъемлемой частью повествования.

Историю гравитационно-волновой астрономии писали и до меня. В этой книге она лишь часть сюжета. В ней речь идет также о развитии науки, путях, ведущих к открытиям, событиях сегодняшнего дня и видах на будущее, в котором изучение гравитационных волн станет полноценной областью астрономии. Обнаружение GW150914 — сигнала, зарегистрированного в памятный понедельник, — это и кульминация вековых поисков, и первая страница совершенно новой главы в исследовании Вселенной.

(((1)))

Знакомство с пространственно- временным континуумом

Джо Купер облачается в скафандр НАСА и надевает шлем. Если при запуске возникнут неполадки, ему понадобится кислород. Техники помогают ему войти в космический аппарат, расположенный на самом вершуре ракеты. По радиосвязи он слышит обратный отсчет и чувствует, как адреналин разливается по кровеносной системе. Купер не робкого десятка, но невозможно сохранить абсолютное хладнокровие, когда готовишься устремиться в космос на столбе пламени.

Вскоре он и трое других астронавтов в пути. Все идет по плану. За маленькими окнами корабля синева небес уступает место черноте безвоздушного пространства. Двигатели выключаются, возникает невесомость. Им остается сблизиться с огромной космической станцией, обращающейся вокруг Земли со скоростью более 8 км/с, и пристыковаться. Проще простого.

Казалось бы, рядовой полет к Международной космической станции (МКС) на борту российского корабля «Союз». Обычное дело... или нет? Никто не слышал об астронавте НАСА по имени Джо Купер. И трех спутников у Купера быть не могло. Любой астронавт объяснит, что «Союз» слишком мал для четверых — в нем и троим тесно.

История продолжается. Корабль, к которому пристыковываются астронавты, называется «Эндьюранс» и не имеет ничего общего с МКС. Наконец, они летят на «Эндьюранс» к Сатурну, исчезают в «кротовой норе», выныривают в другой галактике, выходят на орбиту гигантской ЧД под названием «Гаргантюа» и посещают чужие планеты. Купер даже наведывается в гиперпространство.

Это сюжет голливудского блокбастера 2014 г. «Интерстеллар»¹, снятого Кристофером Ноланом с актером Мэттью Макконахи в роли астронавта Купера. Если вы интересуетесь космической тематикой, то всё поняли по одному только имени героя. Возможно, вы даже посмотрели «Интерстеллар» большее число раз, чем я. Это выдающееся кино.

Из ряда научно-фантастических фильмов «Интерстеллар» выделяет наряду с прочим подбор исполнительных продюсеров. Это Джордан Голдберг («Бэтмен», «Начало»), Джейк Майерс («Выживший»), Томас Тулл («Мир Юрского периода»), а также Кип Торн, почетный фейнмановский профессор теоретической физики Калифорнийского технологического института в Пасадене. Не многие физики-теоретики по совместительству продюсируют фильмы.

Что происходит, когда ученый участвует в работе над научно-фантастической картиной? Можно надеяться, что результат не будет противоречить научным знаниям. «Интерстеллар» соответствует им на очень высоком уровне. Торн помог выстроить сюжетную линию. Он познакомил сценариста, режиссера, команду создателей спецэффектов и актеров с астрономией и ОТО. Торн даже написал уравнения на доске одного из персонажей, профессора Джона Бранда (в исполнении Майкла Кейна). К сожалению, Торн не появился на экране в роли самого себя. Очевидно, впрочем, что робот КИПП назван в его честь.

Трудно было бы найти человека, более подходящего на роль научного консультанта фильма о ЧД, чем Кип Торн.

Он один из немногих людей, понимающих удивительные свойства пространственно-временного континуума. В 1990 г. Торн даже выиграл пари, которое заключил 15 годами ранее с британским коллегой и другом Стивеном Хокингом в отношении истинной природы космического источника рентгеновского излучения — Лебедь X-1. (Призом стала годовая подписка на журнал «Пентхаус».) Вышедшая в 1994 г. книга Торна «Черные дыры и складки времени» стала национальным бестселлером.

В начале 2016 г. имя Торна вновь было у всех на слуху. 11 февраля ученые объявили о первом успехе в прямой регистрации гравитационных волн. В отдаленной области Вселенной коллапсировали и слились две ЧД. Столкновение вызвало возмущения пространственно-временного континуума. Продолав путь, превышающий 1 млрд св. лет, волны 14 сентября 2015 г. достигли Земли. Два гигантских детектора LIGO в США зафиксировали мельчайшую дрожь. LIGO — это детище Торна и его коллег-физиков Райнера Вайсса и Рональда Древера.

Никто не видел ЧД вблизи. Никто не знает, существуют ли «кратовые норы». Гравитационные волны настолько малы, что их можно зарегистрировать только сверхчувствительными приборами. Искривление пространства, замедление времени — все это слишком сложно и оторвано от повседневного опыта. Чтобы действительно понимать подобные вещи, нужно разбираться в ОТО Эйнштейна.

Широко известна история об английском астрономе Артуре Стэнли Эддингтоне. В начале XX в. Эддингтон — мы вновь встретимся с ним в главе 3 — был одним из крупнейших популяризаторов новой теории пространственно-временного континуума, предложенной Эйнштейном. После публичной лекции один из слушателей спросил его:

«Профессор Эддингтон, правда ли, что только три человека в мире действительно понимают общий принцип относительности?» Поразмыслив, Эддингтон произнес: «Интересно, кто третий?»

Разумеется, все *не настолько* сложно. Десятки тысяч физиков-теоретиков по всему миру владеют базовыми принципами ОТО. Постоянно появляются новые теоретические разработки, особенно касающиеся ЧД, где становятся важны квантовые эффекты: теория испарения ЧД Стивена Хокинга, «кратчайшие пути» как кратчайшие пути в пространстве в представлении Кипа Торна, голографический принцип Герарда т' Хоофта и «стена огня» Леонарда Саскинда.

Я не стану сейчас вдаваться в детали, но, если величайшие умы современности продолжают высказывать поразительные догадки (и спорить о них), следовательно, они еще не овладели ОТО в полной мере. Приведенные примеры — немногие идеи, не кажущиеся высосанными из пальца. В журнале *Physical Review Letters* выходят статьи об 11-мерном пространственно-временном континууме, путешествиях во времени и множественной Вселенной. И вы считали, что в «Интерстеллар» слишком много натяжек?

Вероятно, поэтому многие интересуются этой, казалось бы, оторванной от жизни темой. Незачем знать, что такое ЧД, чтобы баллотироваться в президенты. Гравитационные волны не решат проблему глобального потепления. Можно прожить жизнь, не задумываясь об общем принципе относительности (единственное впечатляющее исключение я приберегу для главы 3). Но это очень интересно, захватывающе и, бесспорно, будоражит воображение — возможно, достаточно веские причины.

Более того, ОТО объясняет, как функционирует мир на фундаментальном уровне. Что, как не стремление понять мир, отличает нас от животных?

Честно говоря, долгие тысячелетия нам это не особенно удавалось. Первые сельскохозяйственные культуры возникли около 12 000 лет назад на Среднем Востоке. К тому времени люди прекрасно знали о круговом движении Солнца и Луны. Они увидели закономерности в расположении звезд и даже заметили, что несколько ярких звезд медленно движутся через созвездия. Вот, собственно, и все. Люди не имели ни малейшего представления о том, как в действительности устроены небесные тела. И даже не стремились узнать. Солнце, Луна и планеты представлялись им богами — внешними и высшими по отношению к обыденности.

Эта картина почти не менялась вплоть до появления великих греческих философов примерно 2500 лет назад. Сотни поколений миновали 9500 лет без существенного прогресса. Если сжать 12 000 лет истории в одни сутки, начав отсчет с полуночи, получим, что Аристотель предложил первую модель Вселенной в виде вложенных хрустальных сфер уже после семи вечера. Наши предки обладали интеллектом — в конце концов, они относились к тому же виду *Homo sapiens*, что и мы. Просто эта тема не особенно их занимала.

Греки заинтересовались ею. Они справедливо предположили, что Земля представляет собой сферу, и даже вычислили ее окружность с удивительной точностью. (В некоторых учебниках до сих пор утверждается, что Христофор Колумб первым определил форму Земли, но это чушь.) Пусть греки не знали, *что такое* Солнце, Луна, планеты и звезды, они по крайней мере пытались раскрыть тайну их сложного движения.

Их усилия увенчало появление геоцентрической картины мира Клавдия Птолемея, жившего около 19 веков назад на территории нынешнего северного Египта. (В условных сутках, начавшихся с возникновения сельского хозяйства, это примерно 20:10.) Как явствует из названия, Птолемея модель мира помещала в центр мироздания Землю. Солнце,

Луна и планеты двигались вокруг Земли по сложным комбинациям первичных и вторичных орбит. Птолемеева картина мира даже объясняла, почему планеты то и дело движутся в обратном направлении.

Хорошо, но мимо! Прошли столетия, прежде чем люди поняли, что они что-то упускают. Все изменилось с обнаружением гелиоцентрической картины мира польского астронома Николая Коперника в 1543 г. — сразу после 23:00 условных суток. Человечество шло к пониманию мира удручающе долго, бóльшую часть своей 12-тысячелетней истории.

С открытием Коперника развитие науки ускорилось. Ученые установили, что книга природы написана на языке математики, как изящно сформулировал итальянский физик Галилео Галилей. Галилей изучал движение тел, доказал ошибочность ряда предположений Аристотеля и описал собственные выводы с помощью математических уравнений. Вскоре немецкий ученый Иоганн Кеплер сформулировал знаменитые законы движения планет.

Какое отношение эта история имеет к ЧД, гравитационным волнам и загадкам пространственно-временного континуума? Самое непосредственное. Коперник, Галилей и Кеплер заложили фундамент, на котором Исаак Ньютон выстроил теорию всемирного тяготения, впервые опубликованную в 1678 г. А теория относительности Альберта Эйнштейна — послужившая научной основой фильма «Интерстеллар» — заменила идеи Ньютона. Мы способны постигать мир, лишь совершенствуя работу других. Хрустальные сферы Аристотеля и «кротовые норы» Кипа Торна связаны великой дугой научного постижения и открытий.

Следующая революция свершилась в начале XVII в. Это была революция инструментов. Телескоп изобрел датский изготовитель очков Ханс Липперхей, но первым применил Галилей, открывший кратеры и горы на Луне, темные пятна на Солнце, спутники Юпитера и бесчисленные звезды

в Млечном Пути. Впоследствии все более крупные телескопы рассказали нам о существовании двойных звезд, астероидов, туманностей и галактик — а также, разумеется, ЧД. Без телескопа астрономия до сих пор пребывала бы в зачаточном состоянии.

Давайте совершим краткую виртуальную экскурсию по космосу, чтобы убедиться, что верно представляем себе общую картину².

Земля — это планета. Наряду с другими семью планетами она обращается вокруг Солнца. Четыре внутренние планеты (Меркурий, Венера, Земля и Марс) невелики и состоят из металлов и скальных пород. Четыре внешние (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) огромны; их преимущественный состав — газ и лед. Между орбитами Марса и Юпитера расположен пояс астероидов — каменных остатков процесса формирования Солнечной системы. За Нептуном — еще один пояс остаточного происхождения, включающий шарики льда и заледевшие карликовые планеты, самой крупной из которых является Плутон.

Взгляните на небо днем, и вы увидите огромную сферу раскаленного газа — Солнце*. Планеты Солнечной системы получают свет и тепло только от Солнца. Ночью на небе видны тысячи других «солнц» — звезды. Они кажутся маленькими, бледными и холодными, но только потому, что находятся чудовищно далеко. Солнце на подобном расстоянии также выглядело бы крохотным пятнышком.

В главе 5 я расскажу о звездах намного больше. Пока просто запомним, что каждая звезда является «солнцем» и что большинство из них, вероятно, имеют собственные системы

* Не стоит смотреть на дневное солнце без специальных защитных фильтров — это опасно для глаз. — *Прим. ред.*

планет. На данный момент открыто значительно больше 3000 экзопланет³.

Очень жаль, что мы не можем отправиться к звездам и изучить их вблизи, во всяком случае в обозримом будущем. Даже свету, движущемуся со скоростью 300 000 км/с, требуется 4,3 года, чтобы дойти от Солнца до ближайшей звезды Проксима Центавра. Поэтому астрономы говорят, что Проксима Центавра находится на расстоянии 4,3 св. лет. (Один световой год равен $300\,000 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365,25$ км. Это почти 9,5 трлн км.)

Вы когда-нибудь пытались считать звезды на ночном небе? Невооруженным глазом видно несколько тысяч, в зависимости от того, насколько темным является небо. Большинство находится в нескольких десятках или сотнях световых лет — невероятно далеко для большинства людей, но относительно близко с точки зрения астрономов. Для нас это космическое подворье.

Огромное большинство звезд нашей галактики Млечный Путь находится гораздо дальше. Их можно увидеть только в телескоп. Они имеют различные цвета и размеры, а их названия — красные карлики, белые карлики, желтые субгиганты, голубые сверхгиганты — наводят на мысль об обитателях сказочного леса. Их очень много. В настоящее время астрономы считают, что Млечный Путь включает несколько сот миллиардов звезд. Одна из них — наше Солнце.

Это еще не все. Млечный Путь не единственная галактика, во Вселенной их множество. Величественные спирали, например Млечный Путь и туманность Андромеды, гигантские эллиптические скопления старых звезд, карликовые галактики неправильной формы — это ошеломляющее разнообразие и ошеломляющее множество в пространстве протяженностью многие миллиарды св. лет.

В декабре 1995 г. астрономы впервые направили космический телескоп «Хаббл» на крохотную область неба,

казавшуюся пустой. Затворы фотокамеры оставались открытыми 10 дней. Так было сделано потрясающее фото более тысячи бледных далеких галактик в области, которую можно было бы заслонить головкой булавки, зажатой в вытянутой руке. Сместившись вправо или влево на расстояние, равное диаметру булавочной головки, мы получили бы изображение еще тысячи отдаленных галактик.

Итак, современникам наблюдаемая Вселенная видится большой, темной, холодной и пустой. Но повсюду в космическом пространстве разбросано около 2 трлн галактик, сгруппированных в скопления и кластеры. Вы оказались далеко в космосе и хотите найти дорогу домой? Надеюсь, вы обзавелись сверхточной навигационной системой — на «космических хайвеях» нет дорожных указателей. Проще нашарить хрестоматийную иголку в стоге сена.

Если вам удастся отыскать галактику Млечный Путь, задержитесь на мгновение, чтобы полюбоваться зрелищем. Несколько сот миллиардов «солнц» сгруппированы в красивые спиральные рукава среди звездных скоплений, ярких туманностей и темных облаков пыли. Одна из этого множества — весьма неприметная, заурядная звезда — наше Солнце. Она проводит жизнь на тихой окраине Млечного Пути, у внутреннего края спирального рукава, где почти никогда ничего не происходит.

Вокруг крохотного огонька движутся восемь крошечных планет. Одна из четырех самых маленьких — Земля. На этой «крупнице пыли» в последние столетия люди стали подбираться к открытию тайн Вселенной.

Во всяком случае, мы к этому стремимся.

Как унизительно! *Homo sapiens* практически невозможно обнаружить в безбрежности космического пространства. В освоении космоса мы тоже делаем первые шаги.

Есть наглядное сравнение. Представим, что вся история Вселенной издана в виде энциклопедии в 14 томов. 14 толстых

фолиантов, каждый в 1000 страниц мелким шрифтом. Большой взрыв — первая строка на первой странице 1-го тома. Первые звезды и галактики сформируются примерно к середине 1-го тома. Рождение Солнца и его планет будет описано лишь в 10-м. Вымирание динозавров на с. 935 14-го тома. Появление *Homo sapiens* — на с. 1000 в нижней пятой части. Вся наша письменная история уложится во вторую половину самой последней строчки.

Методы астрономов — лишь один из путей постижения нашего мира. Многие физики воспользовались бы иным: вместо того чтобы описывать все, что видишь (галактики, звезды, планеты), они бы выяснили, из чего все это состоит и как функционирует.

Представим, что астроном и физик сообща изучают роман Дж. Р. Р. Толкиена «Властелин колец». Астроном, сообщая о результатах своих исследований, изложит фабулу, опишет действующих лиц, метафорический смысл произведения, авторский стиль и т. д. Физик поведет речь об алфавите, частоте употребления букв, правилах пунктуации и грамматики.

Но разве все эти правила не одинаковы во многих совершенно разных книгах? «Да!» — с энтузиазмом подтвердит физик. В этом и прелесть его подхода. Можно отвлечься от частных и заняться поиском общих базовых закономерностей, чтобы прийти к доступному максимально глубокому пониманию. Конечно, у обоих подходов есть свои сильные и слабые стороны. По сути, они прекрасно дополняют друг друга.

Как любая книга пишется небольшим количеством различных букв и должна подчиняться правилам грамматики, так и все объекты во Вселенной состоят из малого числа элементарных частиц, взаимодействующих посредством фундаментальных сил природы.

Поразительно то, что окружающий мир — булавочные головки, люди, планеты и протоскопления галактик — состоит из элементарных частиц всего лишь трех типов: верхних кварков (u-кварков), нижних кварков (d-кварков) и электронов. Как буквы составляют слова, предложения, абзацы и книги, так и эти три частицы составляют атомы, молекулы, сложные вещества — буквально каждый объект, который вы можете себе представить.

Что касается фундаментальных сил природы, физикам известны только четыре, две из которых действуют на очень близких дистанциях — в масштабе атомного ядра, поэтому называются сильным и слабым ядерными взаимодействиями. Две другие силы — электромагнитное и гравитационное взаимодействия — проявляются в макромире, о чем известно каждому, кому случалось включить свет или уронить стакан.

Я сейчас упускаю великое множество деталей. Нейтрино, нестабильные элементарные частицы, знаменитый бозон Хиггса, темная материя, суперсимметричные частицы, тетракварки, возможно существующее пятое взаимодействие — список можно продолжать. Интересующихся я отсылаю к популярным книгам об элементарных частицах, поэтому не стану вдаваться в подробности, хотя еще вернусь к нейтрино и темной материи.

В нашем разговоре о пространственно-временном континууме и гравитационных волнах важна загадка силы гравитации. Всем известны ее наглядные проявления. Однако в некотором отношении гравитация резко отличается от других фундаментальных взаимодействий. Альберт Эйнштейн объяснял это тесной связью гравитации с пространством и временем.

Попытаемся объяснить это Исааку Ньютону. Ньютон, разумеется, не знал истинной природы гравитации. Он просто вывел универсальную формулу, эффективно описывающую силу притяжения двух масс, находящихся на определенном

расстоянии друг от друга. Но, как большинство его современников, Ньютон считал пространство и время независимыми, абсолютными понятиями.

Фактически взгляды Ньютона на пространство и время во многом близки нашим интуитивным представлениям. Пространство попросту существует — трехмерное ничто, простирающееся бесконечно. Физический объект (будь то элементарная частица или планета) может находиться в некотором положении в пространстве или двигаться из одного положения в другое. Если выбрать определенную точку отсчета, все остальные местоположения можно будет задать всего лишь тремя координатами. Ведите отсчет от избранной точки, и три числа укажут, на какое расстояние нужно переместиться вперед или назад, вправо или влево, а также вверх или вниз, чтобы попасть в другую точку. Пространство — нечто вроде трехмерной миллиметровки. Это пустой неизменяющийся задник, на фоне которого происходят все события во Вселенной.

А время? Воображаемые часы природы отсчитывают и мгновения обычного дня, и каждую секунду после рождения Вселенной. Время — это абсолютный, непогрешимый метроном космоса, отмечающий все и каждое событие уникальной меткой. Кстати, оно одномерно: если выбрана точка отсчета, требуется только одно число, чтобы узнать, в какое время произошло любое другое событие.

Вы с легкостью представите пространство и время так, как их мыслил Ньютон. Это естественное восприятие. Наш мозг так устроен, что приходит именно к этой наглядной картине.

Увы, она ложна.

Эйнштейн показал, что пространство и время связаны. Трехмерное пространство и одномерное время в действительности сплетены в четырехмерный пространственно-временной континуум.

Эйнштейн также доказал, что пространство и время не абсолютны, а относительны. Именно поэтому его революционная

теория называется теорией относительности. Каково расстояние между двумя точками в пространстве? Зависит от того, кого вы спрашиваете. Для путешественника, перемещающегося со скоростью, равной половине скорости света, расстояние между двумя точками пространства намного меньше, чем для находящегося в состоянии покоя (покоящегося относительно двух точек). Это справедливо и для отрезка времени между двумя событиями. Чем быстрее вы движетесь, тем медленнее идут ваши часы. Единственное, что является абсолютным — одинаковым для всех наблюдателей, независимо от их движения, — это четырехмерный промежуток между двумя событиями (в двух местоположениях) пространственно-временного континуума.

Наконец, Эйнштейн показал, что масса (а также энергия) оказывает влияние на четырехмерный пространственно-временной континуум. Плоскости слегка искривляются под воздействием массивных объектов, например звезд или ЧД. (Эффект более маленьких и легких объектов — астероидов или яблок — пренебрежимо мал.) Вследствие этого все, что движется по прямой, будь то свет или планета, в присутствии массивного тела начинает двигаться по криволинейной траектории. То, что мы воспринимаем как гравитацию, в действительности является следствием воздействия кривизны пространственно-временного континуума на движение других тел. Поскольку мы говорим об искривлении пространственно-временного континуума, время также испытывает влияние массивных тел — вблизи ЧД часы замедляются.

Если все это кажется вам бредом, познакомьтесь с астрономом Джо Купером из фантастического фильма «Интерстеллар». Вместе с партнерами по команде Амелией Бранд и Дойлом он провел лишь несколько часов в мире, названном планетой Миллер, на орбите гигантской ЧД Гаргантюа. Из-за чрезвычайной близости орбиты планеты к ЧД искривление пространственно-временного континуума оказалось

очень сильным, и время там буквально ползло. К возвращению Купера, Бранд и Дойла на «Эндьюранс» четвертый член команды Николай Ромилли постарел на 23 года.

Сильное искривление пространственно-временного континуума проявляется в облике самой Гаргантюа. ЧД окружена в области экватора плоским диском перегретого газа, из которого материя падает в дыру. По идее, вы должны были бы увидеть только ближнюю сторону диска. В конце концов, его дальняя сторона находится за ЧД. Но в силу искривления пространственно-временного континуума свет дальней стороны изгибается и обходит всю Гаргантюа. ЧД предстает в окружении яркого кольца.

Думаю, временами одержимость Кипа Торна должна была раздражать художников по спецэффектам и компьютерной анимации лондонской фирмы Double Negative, которой пришлось превращать его уравнения, описывающие пространственно-временной континуум, в захватывающие кадры. Иногда последнее слово оставалось не за физиком Калифорнийского технологического института, и научная достоверность отчасти страдала. В своей книге «Интерстеллар: Наука за кадром» (The Science of Interstellar), изданной в 2014 г., ТORN вспоминает, что режиссер фильма Кристофер Нолан не хотел *слишком* усложнять зрителям жизнь. В конечном счете ТORN остался очень доволен. «Как я был рад, когда впервые увидел эти кадры! — пишет он. — Впервые за всю историю в голливудской картине ЧД и ее диск были изображены так, как мы, люди, увидим их в реальности, когда научимся совершать межзвездные перелеты».

Итак, мы можем описать и визуализировать влияние искривления пространственно-временного континуума, меняющее траекторию света и ход времени. Но как представить этот четырехмерный конструкт, тем более его искривление?

В 1917 г. Альберт Эйнштейн написал о своей новой теории небольшую книгу, названную без затей «О специальной и общей теории относительности (общедоступное изложение)»⁴. Впоследствии об относительности писали и другие авторы. Одна из самых забавных работ — «Мистер Томпкинс в Стране Чудес», написанная в 1940 г. космологом Георгием Гамовым⁵. Она до сих пор издается, и это не случайно. В раннем подростковом возрасте я залпом прочел другую книгу — «Экскурсия по пространству и времени» (Guided Tour Through Space and Time)⁶ венгерского физика Эвы Феньо, написанную в 1959 г. Если вы хотите серьезно углубиться в предмет, непременно прочитайте захватывающую книгу Кипа Торна «ЧД и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна»⁷ (1994). В ней более 600 страниц, но она адресована массовому читателю.

Для визуализации четырех измерений используется нехитрый прием — забыть об одном из них. Разумеется, мы не станем игнорировать временное измерение, но отбросить одно из пространственных — допустимо. Таким образом, остаются два пространственных измерения и одно временное. Пространственно-временной континуум становится трехмерным, а с тремя измерениями мы знакомы.

В двухмерном пространстве предметы могут перемещаться только вперед или назад и влево или вправо. Верх и низ отсутствуют. Давайте сосредоточимся на движениях, совершаемых в двух измерениях, в горизонтальной плоскости.

Представьте два объекта, движущиеся в плоскости по прямой. Один из них — луч света звезды, имеющий скорость 300 000 км/с, другой — планета, перемещающаяся в том же направлении, но в 10 000 раз медленнее, со скоростью не более 30 км/с. Если ни на один из этих объектов не оказывается никакого внешнего воздействия, оба будут двигаться по неизменной прямой, хотя и с очень разными скоростями.

Теперь поместим Солнце в эту плоскость примерно в 150 млн км от прямой. Мы знаем, что масса Солнца создает искривление пространственно-временного континуума. Вследствие этого траектория движения как света, так и планеты искривляется. Но вот что странно: траектория света меняется крайне мало (мы вернемся к воздействию Солнца на траекторию света в главе 3), а планеты — назовем ее Землей — гораздо сильнее, превращаясь в круговую орбиту. Что произошло? Если на оба объекта воздействует одна и та же сила, разве они не должны следовать траекториями одинаковой кривизны?

Нет, не должны. И вот почему: мы рассматриваем искривление не пространства, а пространственно-*временного* континуума. Чтобы действительно понять происходящее, нужно добавить в наше двухмерное пространство временное измерение и рассмотреть движение в трехмерном пространственно-временном континууме. Итак, время замещает собой третье пространственное измерение (верх/низ). Фактически мы создали новую трехмерную систему координат. По осям x и y — в горизонтальной плоскости — деления отмечают каждые 300 000 км (расстояние, которое свет проходит за секунду). По вертикальной оси z имеются аналогичные деления, соответствующие секундам.

Давайте снова рассмотрим траекторию света. В нулевой момент времени он находится в центральной точке пространства. Через одну секунду он уже переместился в пространстве на 300 000 км — одно деление в горизонтальной плоскости. Но в трехмерном пространственно-временном континууме он также сдвинулся на одно деление вверх. Ведь прошла одна секунда. Итак, в пространственно-временном континууме свет движется под углом 45° .

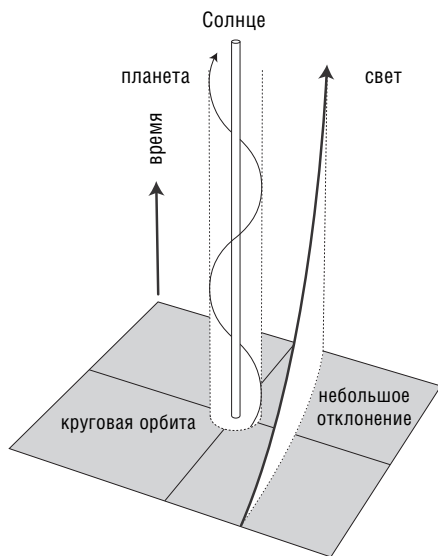
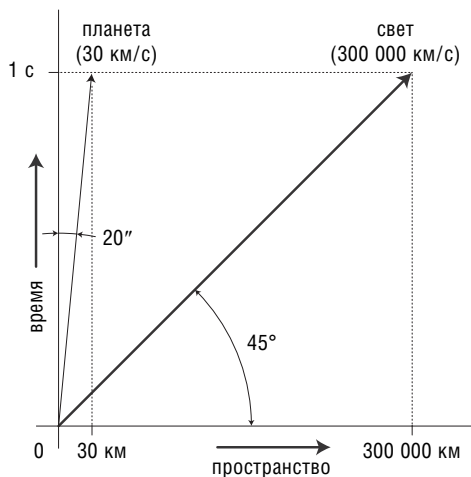
Теперь взглянем на Землю. За секунду она проходит только 30 км. Нашей планете нужно 10 000 секунд (2 часа и почти 47 минут), чтобы проделать в пространстве путь

в 300 000 км. Поэтому траектория движения Земли в трехмерном пространственно-временном континууме (ее *мировая линия*) имеет гораздо меньший наклон, чем траектория света — всего около 20 угловых секунд (угловая секунда равна $1/3600$ градуса). У стороннего наблюдателя создается впечатление, что свет движется по диагонали, а планета практически точно вверх — *почти* вертикально.

Пока все ясно. Но что произойдет, если добавить в схему Солнце? В нашей упрощенной схеме Солнце не движется в пространстве — его скорость равна 0 км/с. Соответственно, в трехмерном пространственно-временном континууме оно перемещается строго вертикально. Однако масса Солнца вызывает крохотное искривление пространственно-временного континуума. В результате и мировая линия луча света, и мировая линия планеты чрезвычайно слабо отклоняются. Вот как это происходит.

Диагональная мировая линия света слегка искривляется, но в течение очень недолгого времени, поскольку у него очень высокая скорость. Не пройдет и мгновения, как свет оставит далеко позади область, где пространственно-временной континуум искривлен массой Солнца. Как и раньше, он движется строго прямолинейно, в то же время смещаясь вверх под углом 45° , только теперь этот наклон имеет чуть-чуть иное направление. В проекции на двухмерную плоскость мы видим, что траектория света слегка изменилась.

Напротив, Земля остается в области искривления. Она продолжает двигаться в пространственно-временном континууме почти вертикально под одним и тем же углом $20''$. Но направление этого крохотного наклона медленно, но постоянно меняется из-за искривления, создаваемого массой Солнца. По прошествии почти 8 млн секунд (около трех месяцев) направление изменится на полных 90° . В проекции на двухмерное пространство мы увидим, что планета прошла четверть своей орбиты вокруг Солнца.



В пространственно-временном континууме мировая линия луча света, движущегося со скоростью 300 000 км/с, имеет наклон в 45° , тогда как мировая линия планеты, скорость которой лишь 30 км/с, почти вертикальна (верхний рис., масштаб не выдержан). Обе мировые линии крайне слабо отклоняются вызываемым Солнцем искривлением пространственно-временного континуума (нижний рис.), но в проекции на пространственную координатную плоскость (горизонтальная плоскость) планета испытывает гораздо большее отклонение, чем свет

Это слабое искривление! За 8 млн секунд планета переместилась на 8 млн делений «вверх» в пространственно-временном континууме. В то же время она проделала в пространстве каких-то 236 млн км. Это менее 800 делений в горизонтальной плоскости. Было бы чрезвычайно сложно заметить отклонение траектории планеты в пространственно-временном континууме невооруженным глазом — траектория представляет почти идеальную прямую.

Через год Земля совершит полный оборот вокруг Солнца, равный около 940 млн км в пространстве. На это ей потребуется 31,5 млн секунд. Спиральная мировая линия Земли в пространственно-временном континууме практически неотличима от прямой. Причина этого в том, что Солнце не является чрезвычайно массивным объектом и вызывает слабое искривление пространственно-временного континуума. Тем не менее если забыть о временном измерении и смотреть только на плоское двумерное пространство, то окажется, что траектория Земли сильно отклонена — настолько, что превратилась в знакомую всем круговую орбиту. Между тем свет уже промчался почти четверть расстояния до ближайшей звезды.

Понять эти вещи довольно сложно, если слышишь о них впервые, — и я даже не предлагаю вам представить *четырёхмерный* пространственно-временной континуум. (Если вы запутались, попробуйте перечитать предыдущие страницы завтра утром или на следующей неделе.) Как бы то ни было, теперь вы понимаете, почему применительно к пространственно-временному континууму и общему принципу относительности обыденное восприятие нас подводит.

Это поучительный пример. Рассматривая сталкивающиеся ЧД, чрезвычайно сильное искривление пространственно-временного континуума и гравитационные волны, нельзя

доверять интуиции. Опирайтесь нужно на расчеты суперкомпьютера, выполненные на основе ОТО Альберта Эйнштейна. Если мы доверяем Эйнштейну, то должны соглашаться с результатами таких расчетов.

Это одна из причин восхищения Кипа Торна тем, каким получился фильм «Интерстеллар». В распоряжении компании — разработчика визуальных спецэффектов, такой как Double Negative, имеются намного более мощные компьютеры, чем у физика-теоретика из Калифорнийского технологического института. Созданные ими сцены дают таким ученым, как Торн, новые ценные идеи. В «Интерстеллар: Наука за кадром» он пишет: «Для меня эти отрывки из фильма подобны экспериментальным данным: они показывают то, что я ни за что не увидел бы самостоятельно, без моделирования»⁸.

Как поступают ученые, если у них появляются идеи? Разумеется, публикуют статью. Торн издал даже две статьи — о «кротовой норе» и о гигантской ЧД Гаргантюа из «Интерстеллар». Поищите их текст в интернете. Первая статья, озаглавленная «Визуализация кротовой норы в “Интерстеллар”» (*Visualizing Interstellar’s Wormhole*), была опубликована в престижном *American Journal of Physics*. Вторая, «Гравитационное линзирование, создаваемое вращающимися ЧД, в астрофизике и в фильме “Интерстеллар”» (*Gravitational Lensing by Spinning Black Holes in Astrophysics, and in the Movie Interstellar*) — в другом профессиональном журнале, *Classical and Quantum Gravitation*⁹. Соавторами обеих статей выступили Оливер Джеймс, Юджин фон Тунцельман и Пол Франклин. Джеймс является главным научным консультантом Double Negative, фон Тунцельман — ответственный руководитель компании по компьютерной графике, а Франклин — сооснователь Double Negative и ответственный руководитель по визуальным эффектам. Физику-теоретика приятно, что его упомянули в интернет-базе кинофильмов (IMDb) в качестве