



## "Интерстеллар"

**Читайте больше БЕСПЛАТНОЙ литературы  
в онлайн-библиотеке  
[mir-knigi.org](http://mir-knigi.org)**

**THE SCIENCE OF  
INTERSTELLAR**

KIP THORNE



W. W. NORTON & COMPANY

New York • London

**ИНТЕРСТЕЛЛАР**

**НАУКА ЗА КАДРОМ**

КИП ТОРН

Москва

«Манн, Иванов и Фербер»

2015

**Информация**

**от издательства**

*Издано с разрешения Andrew Nurnberg Literary Agency*

*Книга рекомендована к изданию Альбиной Каракаевой*

Научный редактор Михаил Павлов

**Торн, Кип**

Интерстеллар : наука за кадром / Кип Торн ; пер. с англ. Станислава Ломакина. — М. : Манн, Иванов и Фербер, 2015.

ISBN 978-5-00057-536-9

Кип Торн, ученый с мировым именем и консультант известной кинокартины Кристофера Нолана «Интерстеллар», в своей книге, глубоко погружаясь в научный мир, подробно объясняет все те невероятные факты о гравитации, черных дырах, пятом измерении и других

явлениях, которые визуально воплощены в этом фильме.

Эта книга для всех, кому интересны физика, космос, естественные науки и то, как устроена наша Вселенная. А также для тех, у кого остались вопросы после просмотра фильма «Интерстеллар».

*Все права защищены.*

*Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.*

*Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая фирма «Вегас-Лекс»*

© 2014 Kip Thorne

© 2014 Foreword by Christopher Nolan

© 2014 Film, Warner Bros. Entertainment Inc.

INTERSTELLAR and all related characters and elements are trademarks of and © Warner Bros. Entertainment Inc.

WB SHIELD: TM & © Warner Bros. Entertainment Inc.

The following images from the book are included with permission from Warner Bros.: Figures 1.2, 3.3, 3.4, 3.6, 5.6, 8.1, 8.5, 8.6, 9.7, 9.9, 9.10, 9.11, 11.1, 14.9, 15.2, 15.4, 15.5, 17.5, 17.9, 18.1, 19.2, 19.3, 20.1, 20.2, 24.5, 25.1, 25.7, 25.8, 25.9, 27.8, 28.3, 29.8, 29.14, 30.1, and 31.1.

© 2014 Images, Warner Bros. Entertainment Inc.

© Перевод на русский язык, издание на русском языке, оформление. ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из величайших радостей при работе над фильмом «Интерстеллар» было для меня общение с Кипом Торном. С первой же нашей встречи я оценил его заразительный энтузиазм ученого — равно как и нежелание давать сырые, неоформившиеся суждения. К любым вопросам по сюжету, которые я ему подбрасывал, Кип всегда подходил неторопливо, взвешенно, а главное — по-научному. Стараясь удержать меня в рамках правдоподобия, он всегда сохранял хладнокровие, если я не спешил прислушаться к его мнению (лишь однажды, когда я в течение двух недель оспаривал запрет Кипа на сверхсветовые скорости, он, по-моему, не смог удержаться от деликатного вздоха).

Он видел себя не «цензором от науки», а соавтором — без устали выискивая в научных журналах и академических публикациях выходы из сюжетных тупиков, в которые я себя загонял. Кип познакомил меня с важнейшим качеством ученого — смирением перед лицом сюрпризов, преподносимых природой. Его отношение позволило ему насладиться возможностями спекулятивной фантастики, подходя к разрешению парадоксов и проблемам непознаваемого с нового ракурса: с позиции рассказчика. Эта книга — свидетельство живого воображения Кипа и его неустанного стремления сделать науку доступной тем из нас, кто не

обладает столь мощным интеллектом и столь обширными познаниями, как он сам. Кип хочет, чтобы люди осознали потрясающие истины Вселенной и восхитились ими. Книга построена так, чтобы читатель мог погрузиться в предмет настолько глубоко, насколько позволяют его способности: никто не останется в стороне, каждый в той или иной мере сможет испытать то удовольствие, что получил я, стараясь не отставать от живой мысли Кипа.

Кристофер Нолан

Лос-Анджелес, Калифорния

29 июля 2014 года

## ВВЕДЕНИЕ

Я работаю в науке уже с полвека. Большую часть времени я получал от своего занятия исключительное удовольствие, а кроме того, оно дало мне глубокое понимание нашего мира, нашей Вселенной.

К тому, чтобы стать ученым, меня сподвигла научная фантастика, которой я зачитывался в детстве и юношестве (Айзек Азимов, Роберт Хайнлайн и многие другие), а также научно-популярные издания того же Азимова и физика Джорджа (Георгия) Гамова. Я многим обязан этим книгам и их авторам и давно мечтал заплатить этот долг, передав их эстафету следующему поколению — привлекая молодежь и взрослых в мир науки, настоящей науки; объясняя людям, что такое наука, какую великую силу она дает — и каждому из нас как личности, и всей нашей цивилизации, человечеству.

Фильм Кристофера Нолана «Интерстеллар»<sup>1</sup> подошел для этого идеально. Мне выпал счастливый случай (и это был именно случай) участвовать в его создании с самого начала, помогая Нолану и его коллегам вплести в ткань повествования компоненты истинной науки.

Немалая часть научного содержания «Интерстеллар» находится на границе (а то и за границами) нынешних человеческих познаний. Это делает фильм более захватывающим, а мне дает возможность объяснить разницу между научными истинами, обоснованными предположениями и домыслами. И рассказать о том, как ученые берут идеи, зародившиеся в виде домыслов, и либо доказывают их несостоятельность, либо переводят в разряд обоснованных предположений или научных истин.

В этой книге я действую сразу двумя способами. Во-первых, рассказываю, что на сегодняшний день известно о явлениях, показанных в фильме (черных дырах, червоточинах<sup>2</sup>, сингулярностях, пятом измерении и т. д.), о том, как мы получили эти знания и как надеемся прояснить то, что пока еще неизвестно. И во-вторых, я интерпретирую события в «Интерстеллар» с позиции ученого — примерно так же, как художественный критик или рядовой любитель живописи толкует картину Пикассо.

Часто моя интерпретация описывает то, что, как я предполагаю, оказалось «за кадром»: физические свойства черной дыры Гаргантюа<sup>3</sup>, ее сингулярности, ее горизонт и внешний вид; как приливная гравитация Гаргантюа могла вызвать на планете Миллер волны высотой больше километра; как тессеракт, объект с четырьмя пространственными измерениями, мог перенести Купера, принадлежащего трем измерениям, через пятимерное пространство.

Порой моя интерпретация выходит за пределы непосредственных событий фильма, перерастая в экстраполяцию. Например, я расскажу, как задолго до того, что показано в фильме, профессор Брэнд мог обнаружить червоточину (для этого он исследовал гравитационные

волны, исходящие от нейтронной звезды по соседству с Гаргантюа и через червоточину достигающие Земли).

Конечно, это лишь мои личные интерпретации<sup>4</sup> и Кристофер Нолан поддерживает их не в большей мере, чем Пабло Пикассо поддерживал суждения художественных критиков. Зато так я смогу рассказать о некоторых удивительных тайнах природы.

Отдельные места книги, возможно, дадутся непросто. Такова особенность настоящей науки: наука требует осмысления, порой — осмысления глубокого, но игра стоит свеч. Вы можете пролистывать сложные места, а можете постараться их понять. Если попытки окажутся тщетными, значит, с задачей не справился я, а не вы, за что заранее прошу прощения.

Надеюсь, хотя бы единожды вы обнаружите, что сидите посреди ночи, борясь со сном, и стараетесь разобраться в том, что я написал, — так же, как я ночами бился над вопросами, что задавал мне, отшлифовывая сценарий, Кристофер Нолан. Но в особенности я надеюсь, что хотя бы единожды, посреди ночи, вы испытаете чувство озарения, как часто испытывал его я, разрешая вопросы Нолана.

Я хочу поблагодарить Кристофера Нолана, Джонатана Нолана, Эмму Томас, Линду Обст и Стивена Спилберга за приглашение в Голливуд, за подаренную мне чудесную возможность воплотить давнюю мечту — передать следующему поколению мое послание о красоте, очаровании и мощи науки.

Кип Торн

Пасадена, Калифорния

15 мая 2014 года



Ученый в Голливуде:

ЗАРОЖДЕНИЕ ЗАМЫСЛА «ИНТЕРСТЕЛЛАР»

Линда Обст, мой человек в Голливуде

Можно сказать, что «Интерстеллар» возник из любовного увлечения, которое в конце концов переродилось в творческий тандем.

В сентябре 1980 года мне позвонил мой друг Карл Саган. Он знал, что я один воспитываю дочку-подростка (или пытаюсь это делать — получалось у меня не очень), живу в Южной Калифорнии холостяцкой жизнью (с чуть большим успехом) и подвизаюсь на поприще физика-теоретика (тут дела обстояли не в пример лучше).

Карл позвонил, чтобы предложить мне свидание вслепую — сходить с некой Линдой Обст на грядущую мировую премьеру авторского проекта Карла, телесериала «Космос». Линда, талантливый редактор журнала «Нью-Йорк Таймс» и очаровательная женщина, недавно переехала в Лос-Анджелес. Точнее, ее, отбиваемую руками и ногами, перевез туда муж, что впоследствии сыграло свою роль в их разводе. Стараясь извлечь максимум из сложившейся

ситуации, Линда пыталась пробиться в кинобизнес, работая над фильмом «Танец-вспышка».

Премьера сериала «Космос» была торжественным мероприятием и проходила в обсерватории Гриффита. Будто желая усугубить собственную неказистость, я надел голубой смокинг. Там были все, кто имел хоть какой-то вес в Лос-Анджелесе, я чувствовал себя совершенно не в своей тарелке и... чудесно провел время.

Пару лет мы с Линдой то сбегались, то разбегались. Что-то у нас не клеилось: ее нрав и притягивал, и опустошал меня. Я все раздумывал, стоят ли долгие дни опустошения проблесков счастья, но выбор оказался не за мной. Уж не знаю, быть может, виноваты мои велюровые рубашки и трикотажные штаны, но Линда вскоре потеряла ко мне романтический интерес. Однако затем наши отношения переросли в кое-что получше — в крепкую дружбу и творческий тандем совершенно разных людей из совершенно разных миров.

Теперь перенесемся в октябрь 2005 года. Одна из наших встреч, когда мы болтали на всевозможные темы: от новых открытий в космологии до левых течений в политике, от кулинарных рецептов и до зыбучих песков кинобизнеса. На тот момент Линда уже была одним из самых известных продюсеров Голливуда (фильмы «Танец-вспышка», «Король-рыбак», «Контакт», «Как отделаться от парня за 10 дней»<sup>5</sup>). А я женился, и моя жена, Кэроли Уинстейн, стала лучшей подругой Линды. И еще я делал недурные успехи в физике.

За ужином Линда поделилась со мной замыслом научно-фантастического фильма и попросила помочь ей наполнить этот замысел конкретикой. Это могло стать ее вторым научно-фантастическим проектом, причем если над «Контактом» она работала с Карлом Саганом, то в этот раз намеревалась взять в напарники меня.

Я никогда не представлял себя в киносфере и не стремился в Голливуд, хоть и интересовался делами Линды. Однако перспектива работать с Линдой мне понравилась, к тому же ее идеи были связаны с червоточинами — с астрофизической концепцией, которую разработал я. В общем, она легко склонила меня поучаствовать в затяжном мозговом штурме.

За четыре месяца мы — общаясь лично, по электронной почте или по телефону — вчерне набросали сюжет. Там были червоточины, черные дыры, гравитационные волны, пятимерная вселенная и контакты людей с существами высших измерений.

Больше всего меня привлекала сама задумка фильма-блокбастера, построенного на положениях истинной науки. Науки на границах человеческих познаний и отчасти — за этими границами. Фильма, режиссер, сценаристы и продюсер которого уважают науку, черпают в ней вдохновение, вдумчиво и достоверно сплетая из нее ткань повествования. Фильма, который знакомит зрителей с чудесами, даруемыми нам законами физики. Фильма, вдохновляющего широкую аудиторию познакомиться с наукой, а то и встать на научную стезю.

Девять лет спустя «Интерстеллар» стал воплощением наших мечтаний. Но путь от старта до финиша изрядно напоминал «Злоключения Полины»<sup>6</sup>; случаев, когда наши планы висели на волоске, хватало. Мы привлекли к проекту легендарного Стивена Спилберга и... потеряли его. Мы заполучили прекрасного молодого сценариста Джонатана Нолана и... теряли его дважды, на самых важных этапах работы, каждый раз на много месяцев. Два с половиной года фильм находится в подвешенном состоянии — без режиссера. А потом его возродил и преобразил Кристофер Нолан, брат Джонатана, величайший режиссер своего поколения.

Стивен Спилберг, режиссер (поначалу)

Однажды в феврале 2006 года, когда мы уже начали трудиться над «Интерстеллар», Линда обедала с Тоддом Фельдманом, агентом Спилберга из «Криэйтив Артистс Эйдженси». Когда Фельдман спросил, над какими фильмами она работает, Линда рассказала о нашем проекте, нашей мечте — об «Интерстеллар», научно-фантастическом фильме, который был бы не менее научным, чем фантастическим. Фельдман был впечатлен. Он решил, что это может заинтересовать Спилберга, и посоветовал Линде сегодня же послать ему сценарную заявку! (Сценарная заявка — это описание сюжета и персонажей фильма, объемом около 20 страниц или чуть больше.)

Все, что у нас было на тот момент, — переписка по электронной почте и заметки с совместных обедов. Так что мы с ураганной скоростью взялись за работу, за пару дней сваяли свой шедевр, восьмистраничную сценарную заявку, и отправили ее. Несколько дней спустя Линда написала: «Спилберг прочел и очень заинтересовался. Возможно, понадобится встретиться с ним лично. Ты готов?»

Еще бы я не был готов! Однако всего неделю спустя, прежде чем появилась возможность устроить встречу, Линда позвонила мне: «Спилберг подписывает контракт, он будет режиссером “Интерстеллар”!» Линда была в восторге, я был в восторге, оба мы были в восторге. «В Голливуде так не бывает, — сказала она мне, — никогда». И все же это случилось.

Тогда я признался Линде, что за всю свою жизнь посмотрел лишь один фильм Спилберга — конечно же, это был «Инопланетянин». (В зрелом возрасте я вообще не слишком интересовался кино.) И Линда составила мне домашнее задание: дала список фильмов Спилберга, с которыми я должен ознакомиться.

Месяц спустя, 27 марта 2006 года, состоялась наша первая встреча со Спилбергом — со Стивеном, как я отныне стал к нему обращаться. Мы встретились в уютном конференц-зале, в самом сердце его кинопродюсерской компании «Эмблин».

На той встрече я предложил Стивену и Линде два правила относительно науки в «Интерстеллар»:

Ничто в фильме не должно противоречить общепринятым законам физики или достоверным знаниям о Вселенной.

Домыслы по поводу устройства Вселенной и малоизученных физических явлений должны быть научно подкреплены, то есть основаны на идеях, которые принимают хотя бы некоторые из уважаемых ученых.

Стивен не возражал. Кроме того, он одобрил предложение Линды привлечь других ученых для дальнейшей разработки — организовать настоящий научный семинар по «Интерстеллар».

Семинар прошел 2 июня в Калифорнийском технологическом институте, в конференц-зале напротив моего кабинета.

Это была оживленная восьмичасовая дискуссия в свободном формате, с участием четырнадцати специалистов по астробиологии, планетологии, теоретической физике, космологии, психологии и космической политике, а также Линды, Стивена, его отца Арнольда и меня. Семинар выжал из нас все соки, зато обогатил уймой новых идей, а также заставил отказаться от некоторых старых, и мы с Линдой основательно перекроили сценарную заявку.

Поскольку у нас было много других дел, на переделки ушло полгода. К январю 2007 года наша

сценарная заявка увеличилась до 37 страниц плюс 16 страниц, раскрывающих научную суть отдельных эпизодов.

Джонатан Нолан, сценарист

Параллельно с этим Линда и Стивен проводили собеседования с потенциальными сценаристами. Это заняло немало времени; в итоге был выбран 31-летний Джонатан Нолан, который прежде участвовал (в соавторстве с братом Кристофером) в создании лишь двух киносценариев («Престиж» и «Темный рыцарь», оба фильма — хиты).

Джонатан, или Джона, как называют его друзья, не очень разбирался в науке, зато был прекрасным человеком, любопытным и жадным до знаний. Много месяцев он штудировал книги, связанные с научными аспектами «Интерстеллар», и задавал мне каверзные вопросы. Мы со Стивеном и Линдой одобрили много ценных предложений Джоны.

Работать с ним было одно удовольствие. Мы провели вдвоем немало насыщенных бесед по поводу научных аспектов «Интерстеллар» — обычно это происходило во время двух-трехчасовых обедов в «Афинеуме», университетском клубе Калтеха<sup>7</sup>. Джона приходил, переполненный новыми идеями и вопросами, и я тут же отвечал: вот это с научной точки зрения возможно, а это — нет... Порой я ошибался. Джона наседал на меня: а почему так? а что если?.. Но я тугодум. Я шел домой и ложился в кровать, все еще размышляя над его вопросами. Посреди ночи, когда организм расслаблен, я часто находил подходящее обоснование для сценарного хода, который предложил Джона, или придумывал альтернативу, ведущую к тому же результату. Так уж я устроен, что иногда могу справиться со сложной задачей лишь в полусне.

Наутро я изучал свои сумбурные ночные записи, расшифровывал их и отправлял электронное письмо Джоне. Он отвечал по телефону, или по почте, или лично во время очередного обеда, и в конце концов мы приходили к согласию. Например, так мы договорились до гравитационных аномалий и до использования их для эвакуации человечества с Земли. Мне удалось найти способ, хоть и лежащий за границами нынешних познаний, сделать эти аномалии научно допустимыми.

Заплутав, мы звали на помощь Линду. Она быстро понимала, что к чему, и выводила нас из дебрей на чистую дорогу. Одновременно с этим она умудрялась удерживать «Парамаунт Пикчерз» от чрезмерного вмешательства, обеспечивая нам творческую свободу, а также планировала дальнейшие этапы кинопроизводства.

К ноябрю 2007 года Джона, Линда, Стивен и я утвердили общую структуру сюжета, отчасти основанного на нашей с Линдой первоначальной сценарной заявке, отчасти на великолепных придумках Джоны, отчасти на идеях, возникших по ходу коллективных обсуждений, — и Джона засел за сценарий. И тут 5 ноября 2007 года Гильдия сценаристов Америки объявила забастовку. Джоне запретили продолжать работу, и он исчез.

Я был в панике. Неужто все наши труды, наши мечты канут в небытие? Я бросился к Линде. Она сказала, что не стоит волноваться, но было заметно, что и сама она подавлена. История забастовки очень ярко описана в шестой главе книги Линды «Неспящие в Голливуде» [Obst 2013]. Эта глава называется «Катастрофа».

Забастовка длилась три месяца. Она закончилась 12 февраля, и Джона вернулся к работе над сценарием и к оживленным беседам с Линдой и со мной. За 16 месяцев он в общей сложности сделал сначала подробный сценарный эскиз, а затем три варианта сценария. Когда все было

готово, мы встретились со Стивеном, чтобы обсудить сценарий с ним. Стивен больше часа задавал нам вопросы, прежде чем перешел к предложениям, просьбам и поправкам. В них он был не слишком рационален, но вдумчив, проницателен, изобретателен, а кое-где — тверд.

В июне 2009 года Джона передал Стивену третий вариант сценария и покинул проект. Он давно уже должен был работать над сценарием к фильму «Темный рыцарь: Возрождение легенды» и месяц за месяцем откладывал это дело ради «Интерстеллар». Больше откладывать он не мог, и мы остались без сценариста. Кроме того, смертельно заболел отец Джоны. Джона много месяцев провел в Лондоне, у постели отца. В течение этого долгого перерыва (отец Джоны скончался в декабре) я переживал, что Стивен потеряет интерес к проекту.



Рис. 1.1. Джона Нолан, я и Линда Обст

Но Стивен, как и мы, ждал возвращения Джоны. Они с Линдой могли бы нанять кого-то другого, чтобы закончить сценарий, но они настолько ценили талант Джоны, что решили повременить.

Наконец в феврале 2010 года Джона вернулся, и 3 марта Стивен, Линда, Джона и я провели очень продуктивную встречу, обсудив написанный Джоной девять месяцев назад третий вариант сценария. Я чувствовал легкое головокружение: наконец-то мы вернулись к работе.

И тут 9 июня, когда Джона усиленно работал над четвертым вариантом сценария, я получил письмо от Линды: «Наш договор со Стивеном под угрозой. Я разбираюсь с этим». Однако проблема оказалась неразрешимой. Спилберг и «Парамаунт» не договорились по поводу следующего этапа работы над «Интерстеллар», и Линде не удалось уладить этот вопрос. Неожиданно мы оказались без режиссера.

Стивен и Линда, каждый по отдельности, рассказали мне, что бюджет «Интерстеллар» грозит превратиться в чрезмерно большую сумму. Редкому режиссеру «Парамаунт» была готова доверить столь дорогой фильм. Я почувствовал, как «Интерстеллар» медленно погружается в трясину забвения. Я был опустошен, и Линда поначалу тоже. Но в преодолении препятствий ей нет равных.

Всего через тринадцать дней после письма Линды о проблемах со Стивеном я получил от нее радостную весть: «Отлично поговорили с Эммой Томас...» Эмма — продюсер, жена Кристофера Нолана и соавтор всех его фильмов. Они с Кристофером заинтересовались «Интерстеллар». Линда была на седьмом небе. Джона позвонил ей и сказал, что «это наилучший вариант развития событий». Однако по ряду причин мы, хоть и знали, что Кристофер и Эмма готовы с нами работать, не могли заключить с ними договор раньше чем через два с половиной года.

Так что мы затаились и принялись выжидать — начиная с июня 2010-го, весь 2011-й и до сентября 2012 года. Все это время меня терзали тревоги. Линда во время наших встреч излучала уверенность, но однажды, как призналась позднее, записала в своем блокноте: «Возможно, мы завтра проснемся, а Крис Нолан пропадет — после двух с половиной лет ожидания. Вдруг он загорится какой-нибудь собственной идеей. Вдруг другой продюсер принесет ему сценарий, который понравится ему больше. А вдруг — просто решит отдохнуть от кино. Тогда окажется, что я зря ждала его все это время. Так бывает. Такова жизнь креативных продюсеров. Но Крис — лучший режиссер для нас. Поэтому будем ждать».

Наконец начались переговоры, во время которых обсуждались суммы на несколько порядков выше моей зарплаты. Нам поставили условие: Нолан станет режиссером, только если «Парамаунт» возьмет в долю «Уорнер Бразерс», студию, которая занималась его последними фильмами. Это означало заключить многостраничную сделку между двумя давними конкурентами.

В итоге 18 декабря 2012 года Линда написала мне: «Парамаунт и Уорнеры договорились. Лопни моя селезенка! Весной приступаем!!!» И с тех пор как за «Интерстеллар» взялся Кристофер Нолан, дела, насколько помню, шли как по маслу. Наконец-то работа пошла энергично и с огоньком!

Кристофер, что немудрено, был давно знаком с наработками брата. И у них уже был за плечами опыт совместной сценарной работы: «Престиж», «Темный рыцарь», «Темный рыцарь: Возрождение легенды». Сначала Джона готовил исходник, затем подключался Кристофер и, тщательно обдумывая, как он снимет ту или иную сцену, все перерабатывал.

Когда «Интерстеллар» оказался целиком в руках Кристофера, он объединил сценарий Джоны со сценарием другого своего проекта, радикально изменив канву фильма.

В середине января Крис, как я вскоре начал к нему обращаться, пригласил меня побеседовать в офис своей кинопродюсерской компании «Синкопи» на территории «Уорнер Бразерс».

По ходу разговора я понял, что Крис неплохо ориентируется в относящихся к фильму областях науки и обладает, пусть во многом интуитивным, пониманием законов физики, которое редко подводило его в дальнейшем. А еще он проявил необычайную любознательность: наш разговор то и дело перескакивал на какую-нибудь постороннюю научную проблему, завладевшую вниманием Криса.

На этой нашей первой встрече я рассказал Крису о моих двух правилах: ничто не должно противоречить общепризнанным законам физики, а любые домыслы должны иметь научную основу. Отнесся он к этому в целом одобрительно, но добавил, что если мне не понравится, как он обошелся с наукой, я не обязан буду его выгораживать. Такой ответ меня насторожил. Однако теперь, когда фильм уже на стадии постпродакшна, я впечатлен, насколько добросовестно Крис следовал этим правилам, что не мешало ему снять великолепный фильм.

С середины января по начало мая Крис напряженно трудился над сценарием. Время от времени он сам или его помощник Энди Томпсон звонил мне с просьбой прийти в офис Криса либо к нему домой или же прочитать новый вариант сценария. Обсуждения были долгими, обычно часа на полтора, а порой мы еще и созванивались день или два спустя и долго беседовали по телефону. Крис задавал мне непростые вопросы. Так же как и во времена работы с Джоной, мне лучше всего думалось посреди ночи. Утром я записывал свои соображения на нескольких листках, с графиками и рисунками, и передавал их Крису лично, из рук в руки. (Крис опасался утечки информации, которая могла бы испортить сюрприз для его поклонников. Он один из самых скрытных кинематографистов Голливуда.)

Временами казалось, что сценарные новшества Криса противоречат моим правилам, но, к собственному удивлению, я почти всегда находил способ примирить их с наукой. Лишь однажды я потерпел в этом поражение, и после двух недель напряженных дискуссий Крис отступил, придав соответствующему ответвлению сюжета другое направление.

Так что в итоге Крис и не нуждается в том, чтобы кто-то защищал его от обвинений в надругательстве над наукой. Совсем наоборот, я в восторге! Он претворил нашу с Линдой идею научного блокбастера в реальность.

Стараниями Джоны и Криса сюжет «Интерстеллар» изменился до неузнаваемости. Он лишь в общих чертах напоминает нашу с Линдой сценарную заявку. И он намного лучше! Что же касается научных идей, то ни в коем случае не стоит думать, будто все они принадлежат мне. Многие из них привнес в фильм Крис, хотя коллеги-физики считают их моими, да я и сам порой диву даюсь, как это мне самому не пришло в голову. Также немало замечательных идей родилось во время коллективных мозговых штурмов с Крисом, Джоной и Линдой.



Рис. 1.2. Я и Кристофер Нолан беседуем на съемочной площадке, в декорациях управляющего модуля «Эндюранс»

Однажды в апреле мы с Кэроли устроили у нас дома, в Пасадене, прием в честь Стивена Хокинга, пригласив добрую сотню самых разных гостей: ученых, актеров, писателей, фотографов, кинематографистов, историков, школьных учителей, общественных и профсоюзных деятелей, предпринимателей, архитекторов и т. д. Там были Крис и Эмма, Джона Нолан и его жена Лайза Джой и, конечно же, Линда. Поздним вечером мы вшестером долго стояли на балконе, под звездным небом, вдали от шума вечеринки, и тихо беседовали — впервые у меня была возможность узнать Криса как человека, а не кинематографиста. Это было здорово!

Крис — человек практического ума, обаятельный и ироничный. Он напоминает другого моего знакомого, Гордона Мура, основателя компании «Интел»: оба, достигнув высот в своей области, ведут себя просто и без претензий. Оба водят старые машины, хоть у них есть и более современные, роскошные авто. В компании обоих мне комфортно, что для такого интроверта, как я, большая редкость.

Пол Франклин, Оливер Джеймс, Эжени фон Танзелманн: команда по созданию визуальных эффектов

Однажды в разгар мая мне позвонил Крис. Он хотел послать ко мне домой парня по имени Пол Франклин, чтобы мы обсудили с ним компьютерную графику для «Интерстеллар». Пол приехал на следующий день, и мы провели увлекательнейшую двухчасовую беседу в моем рабочем кабинете. Пол, в отличие от напористого Криса, человек крайне деликатный. Он оказался большим умницей и обнаружил глубокие познания в нужных областях науки, хоть и учился в колледже на гуманитария.

Когда Пол уже уходил, я спросил, какую компанию он думает выбрать для работы над визуальными эффектами. «Мою», — ответил он просто. «А что это за компания?» — наивно поинтересовался я. «Double Negative. У нас тысяча сотрудников в Лондоне и двести — в Сингапуре».



Рис. 1.3. Пол Франклин и я

После того как Пол ушел, я ввел его имя в интернет-поисковик и обнаружил, что он не только соучредитель Double Negative, но и обладатель «Оскара» за визуальные эффекты в фильме Криса «Начало». «Пора бы начать разбираться во всем этом кинобизнесе», — пробормотал я себе под нос. Несколько недель спустя Пол устроил видеоконференцию, где представил меня ключевым игрокам в команде по созданию визуальных эффектов для «Интерстеллар» (она базировалась в Лондоне). Наиболее плотно мне предстояло общаться с Оливером Джеймсом, главным программистом, и с Эжени фон Танзелманн, руководителем группы художников, которым и должны были помочь программы Оливера в создании захватывающих изображений для фильма.

Оливер и Эжени были первыми людьми с техническим образованием, которых я встретил, работая над «Интерстеллар». У Оливера степень по оптике и атомной физике, и он в подробностях знаком со специальной теорией относительности Эйнштейна. Эжени — инженер в области информатики и организации данных, выпускник Оксфорда. Эти люди разговаривали со мной на одном языке.



Рис. 1.4. Эжени фон Танзелманн, я и Оливер Джеймс

Несколько месяцев я без продыху бился над уравнениями, описывающими пространство рядом с черными дырами и червоточинами (см. главу 8 и главу 15). Я проверял уравнения с низкой точностью с помощью удобной компьютерной системы Mathematica, а затем отсылал свои программистские поделки Оливеру. Тот превращал полученное в сложные компьютерные программы для генерации IMAX-графики сверхвысокого качества и передавал их Эжени. Работать с ними обоими было сплошное удовольствие.

В результате графика в «Интерстеллар» вышла просто изумительной, да еще и достоверной с научной точки зрения!

Вы не представляете себе мой восторг, когда Оливер прислал мне первые видеофрагменты. Впервые в жизни я — причем раньше всех остальных ученых — увидел в сверхвысоком разрешении, на что похожа быстровращающаяся черная дыра и как выглядит окружающее ее пространство.

Мэтью Макконахи, Энн Хэтэуэй, Майкл Кейн, Джессика Честейн

18 июля, за две недели до запланированного начала съемок, я получил электронное письмо от Мэтью Макконахи, актера, исполняющего роль Купера. «Я хотел бы, — писал он, — задать вам кое-какие вопросы насчет “Интерстеллар”... Хорошо бы лично, если вы неподалеку от Лос-Анджелеса. Жду ответа, спасибо, на связи, Макконахи».

Мы встретились шесть дней спустя в номере бутик-отеля «Л’Эрмитаж» в Беверли-Хиллз. Остановившийся там Мэтью старался разобраться в образе Купера и в научных основах «Интерстеллар».

Когда я приехал, он встретил меня в шортах и майке, босой, исхудавший после съемок фильма «Далласский клуб покупателей» (за который он получил «Оскар» как лучший актер). Он спросил, можно ли называть меня Кип, я ответил: «Конечно» — и спросил, как называть его. «Как угодно, только не Мэтт, ненавижу имя Мэтт. Можно Мэтью, или Макконахи, или “эй, ты” — как тебе больше нравится». Я выбрал «Макконахи» — это имя так приятно скатывается с языка, а кроме того, у меня слишком много знакомых, которых зовут Мэтью.

Из огромной гостиной номера Макконахи была убрана вся мебель, за исключением углового дивана и кофейного столика. На столике и на полу валялись листы бумаги, на каждом — разрозненные заметки, написанные вкривь и вкось. Он брал листок, вчитывался и задавал вопрос. Как правило, вопросы были довольно глубокими и требовали от меня обстоятельных разъяснений, по ходу которых Макконахи делал новые заметки.

Часто разговор уводил нас в сторону от первоначального вопроса. Для меня это была одна из самых интересных бесед за долгое время! От законов физики (в особенности квантовой физики) мы переходили к религии и мистицизму, к научным аспектам «Интерстеллар», к нашим семьям (в особенности детям), к нашим взглядам на жизнь, к тому, откуда мы черпаем вдохновение, как работает наш разум и как мы открываем для себя новое. Я ушел через два часа в состоянии эйфории.

Позже я рассказал о нашей встрече Линде. «Ну еще бы», — хмыкнула она. «Интерстеллар» — ее третий фильм с Макконахи, и Линда знала, как он подходит к своей работе. Хорошо, что она не предупредила меня об этом — сюрприз был из приятнейших.

Другое письмо, от Энн Хэтэуэй, играющей Амелию Брэнд, пришло через несколько недель. «Привет, Кип! Надеюсь, это письмо дойдет без проблем... Эмма Томас дала мне твой адрес на случай, если будут вопросы. Что ж, тема непростая, и вопросы у меня есть!.. Мы можем побеседовать? Большое спасибо, Энни».

Мы поговорили по телефону, поскольку в наших расписаниях не нашлось окон для личной встречи. Она сказала, что немного увлекается физикой и что ее героиня, Брэнд, должна знать физику назубок, а затем выдала ряд на удивление сложных вопросов: Какая связь между временем и гравитацией? Почему мы считаем возможными измерения высшего порядка? Проводились ли эксперименты в области квантовой гравитации?.. Лишь в самом конце она позволила разговору уклониться от темы, и мы поболтали о музыке: в школе она играла на трубе, а я — на саксофоне и кларнете.

Во время съемок «Интерстеллар» я крайне редко бывал на площадке. В этом не было необходимости. Но однажды утром Эмма Томас устроила мне экскурсию по декорациям «Эндюранс» — полноразмерным муляжам управляющего и навигационного отсеков корабля, построенным в тридцатом павильоне «Сони Студиос».

Что и говорить, выглядело это впечатляюще: конструкция длиной в 13,5 и шириной в 8 метров,

подвешенная в воздухе, способная перемещаться и по горизонтали, и по вертикали и проработанная до мельчайших деталей. Эффект был сногсшибательный.

«Эмма, — возник у меня вопрос, — зачем строить огромные, сложные декорации, если все это можно изобразить с помощью компьютерной графики?» «Еще неизвестно, что обойдется дороже, — ответила она. — Кроме того, компьютерная графика пока еще не обладает всеми достоинствами живой декорации». Везде, где возможно, они с Крисом использовали натуральные декорации и эффекты, и лишь то, что нельзя было снять вживую (например, черная дыра Гаргантюа), делалось на компьютере.

В другой раз я написал с дюжину уравнений и графиков на доске профессора Брэнда и наблюдал, как Крис снимает сцену в профессорском кабинете с Майклом Кейном в роли профессора и Джессикой Честейн в роли Мёрф. Я был поражен, как тепло отнеслись ко мне Кейн и Честейн. Хотя я и не был звездой фильма, меня знали как «ученого при «Интерстеллар»», который носится с идеей скрестить кино и науку.

Благодаря этой своей «известности» я смог пообщаться с такими иконами Голливуда, как братья Ноланы, Макконахи, Хэтэуэй, Кейн, Честейн. Приятное дополнение к творческому сотрудничеству с Линдой.

И вот воплощение нашей с Линдой мечты об «Интерстеллар» достигает завершающей стадии. Эта стадия — вы, наша аудитория, люди, которые заинтересовались научными аспектами «Интерстеллар» и ищут объяснения странным вещам, показанным в фильме.

Эти объяснения — здесь. Для того я и написал эту книгу. Приятного чтения!

## I

### ОСНОВЫ



#### 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 триллионной доли секунды после его начала!<sup>9</sup>

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.

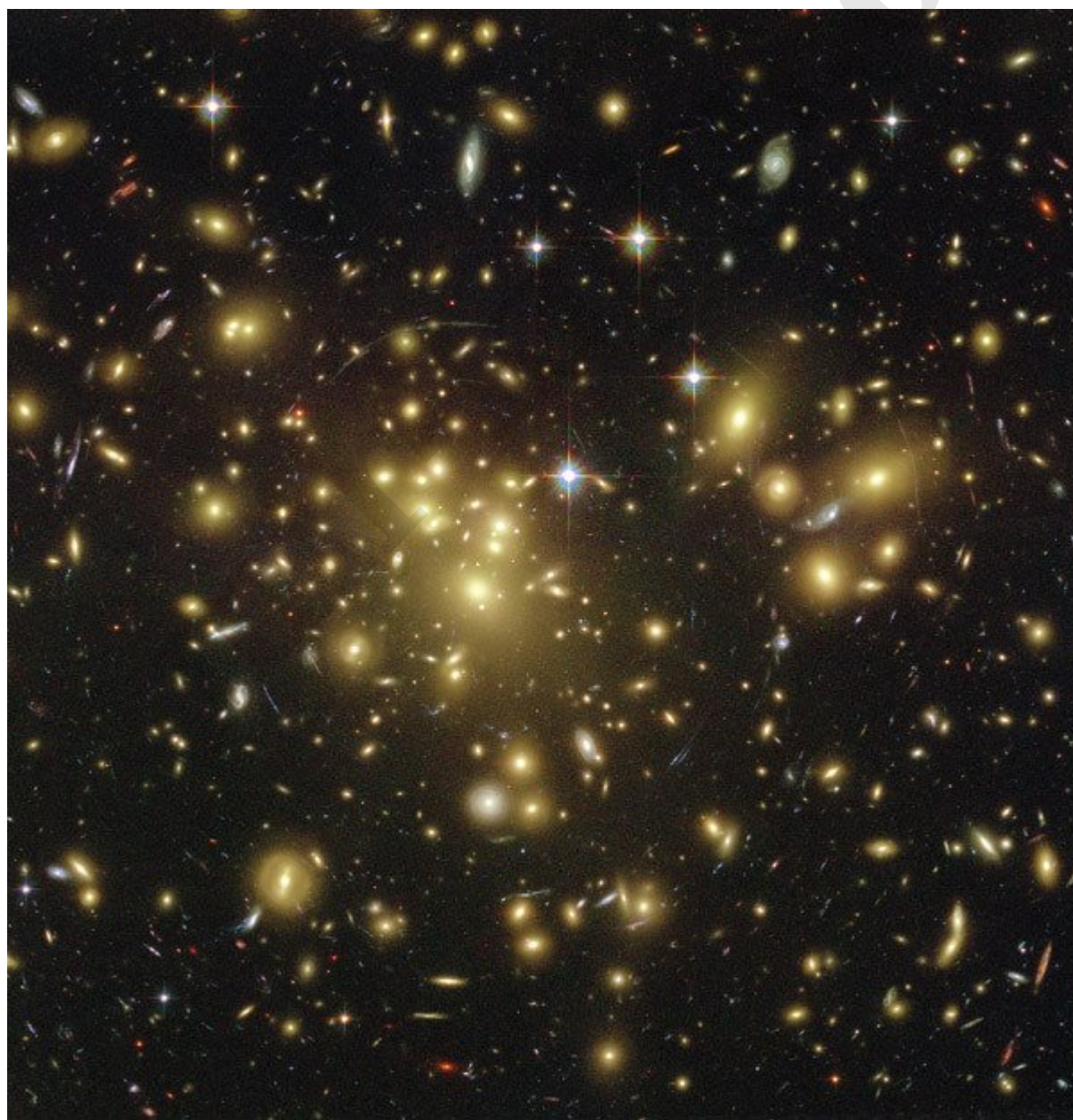


Рис. 2.1. Массивное скопление галактик под названием Abell 1689 и множество более отдаленных галактик; сфотографировано космическим телескопом «Хаббл»

В наблюдаемой Вселенной приблизительно триллион галактик. Самые большие из них содержат по несколько триллионов звезд, их поперечный размер — около миллиона световых лет<sup>10</sup>. 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<sup>11</sup>.

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 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.

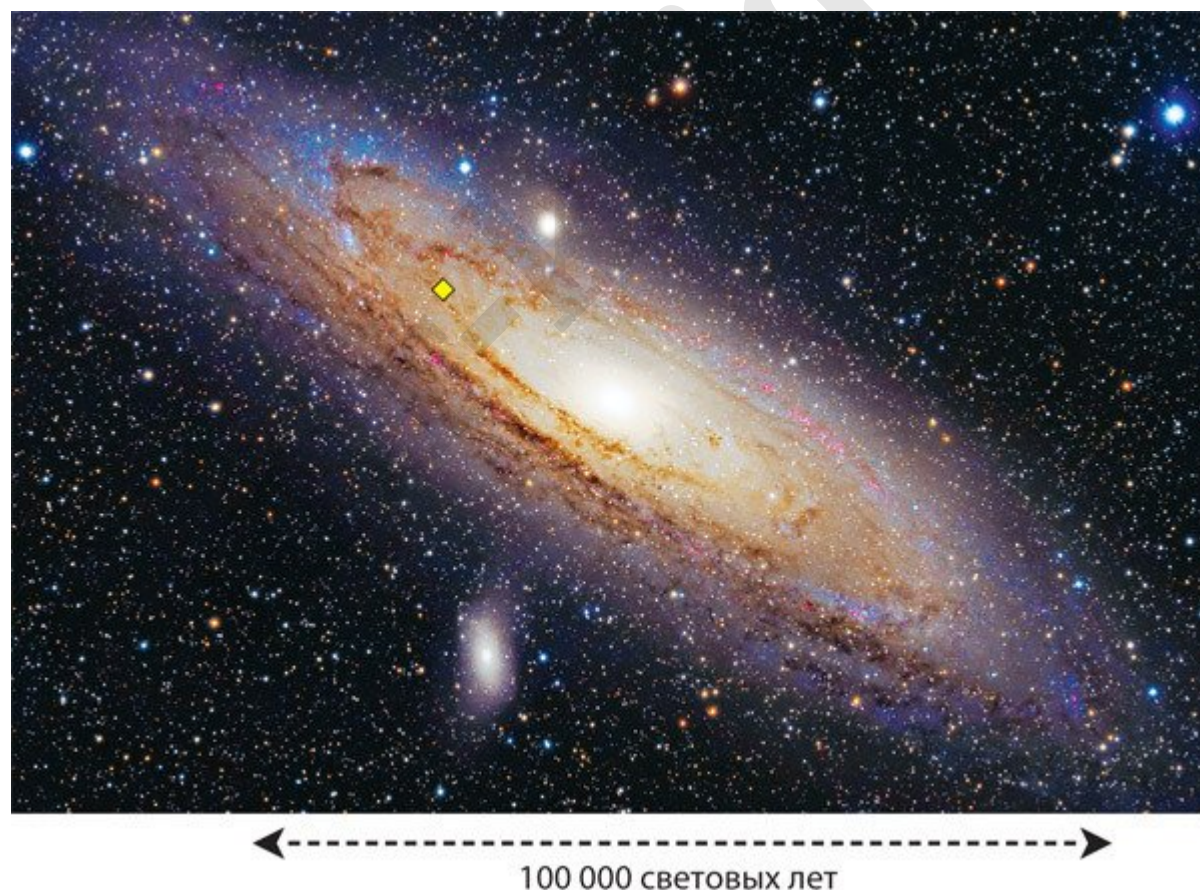


Рис. 2.2. Галактика Андромеды

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<sup>12</sup> и размер, что и у черной дыры Гаргантюа в «Интерстеллар», см. главу 6). Она находится в центре яркой сферы на рис. 2.2.

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

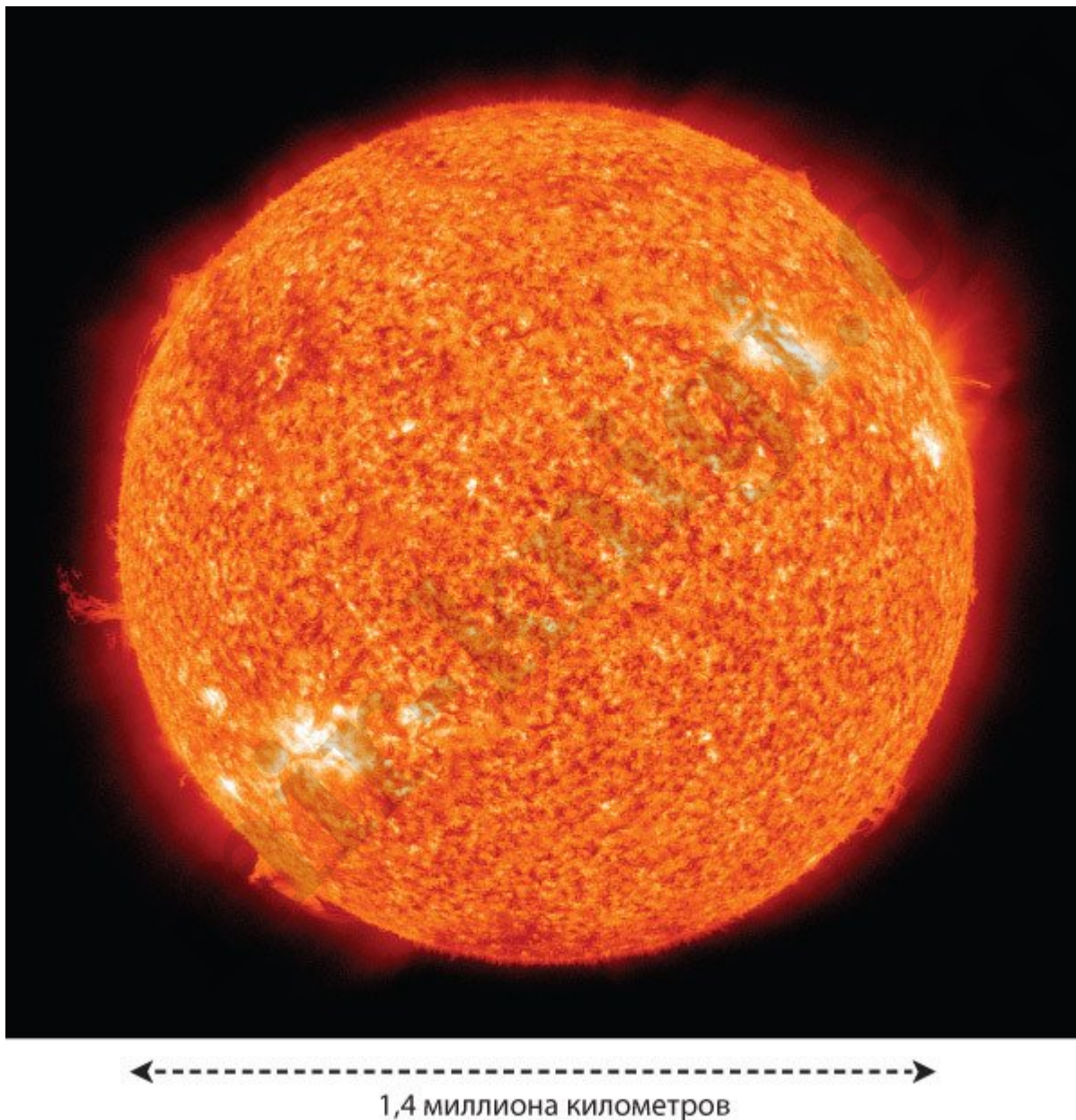


Рис. 2.3. Солнце, сфотографированное Обсерваторией солнечной динамики NASA

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).

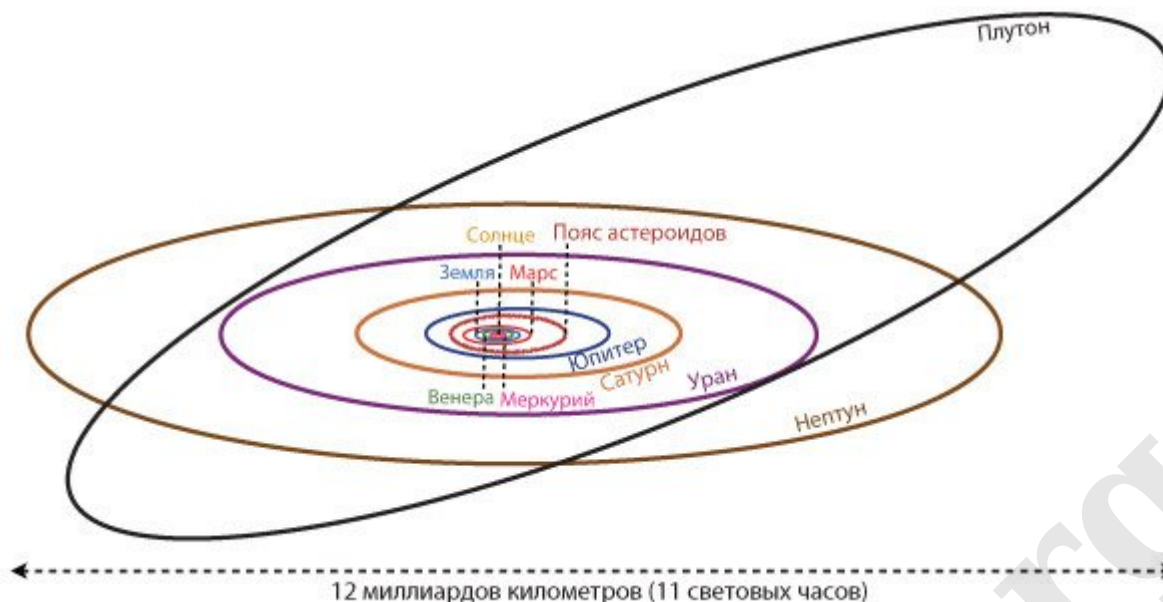


Рис. 2.4. Орбиты планет Солнечной системы и Плутона и скопление астероидов

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.

**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 в оболочке тоже закончится, а Земля сгорит, 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<sup>13</sup>: 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).

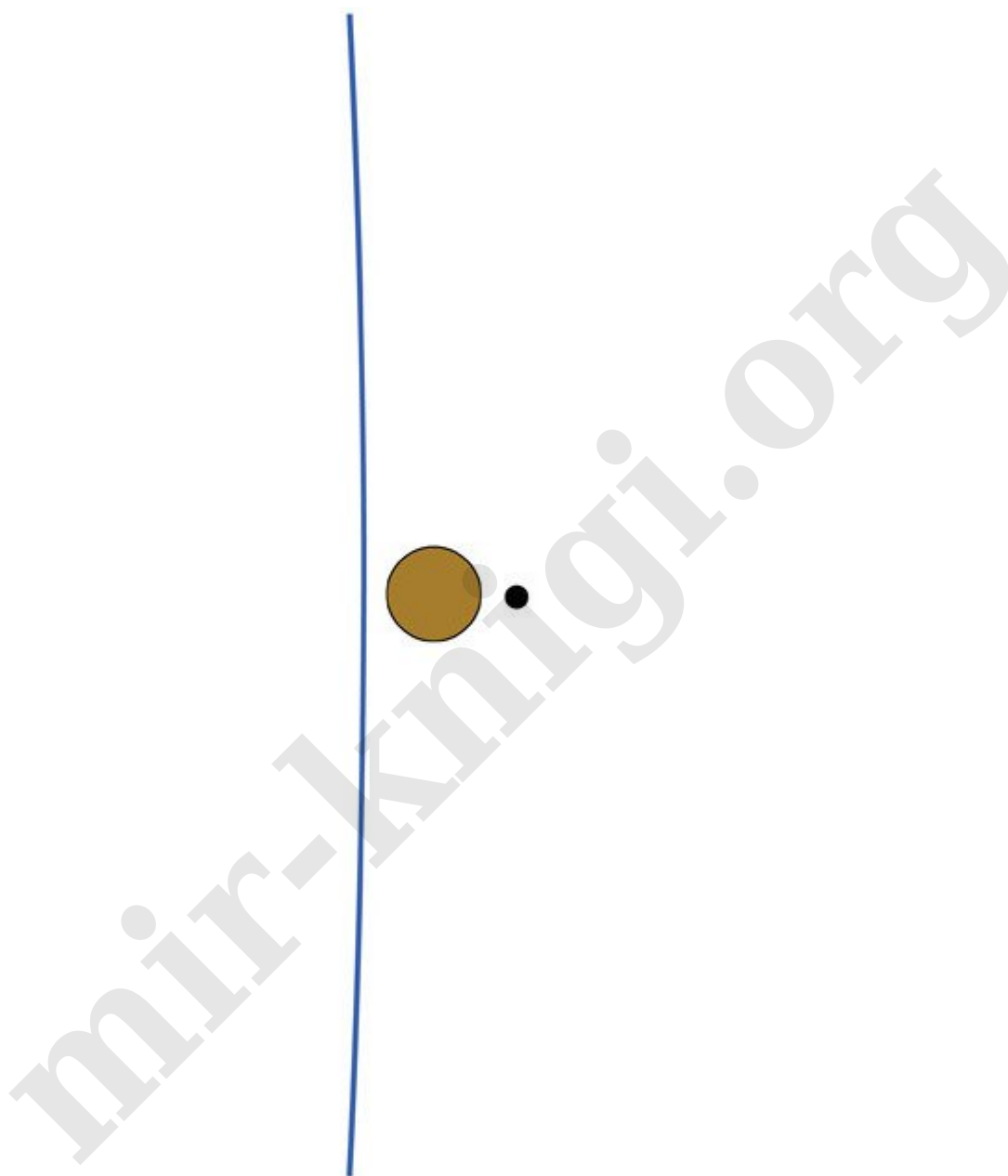


Рис. 2.5. Белый карлик (слева), нейтронная звезда (посередине) и черная дыра (справа), которые весят в 1,2 раза больше Солнца. Здесь показана лишь малая часть поверхности белого карлика

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.

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.

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.

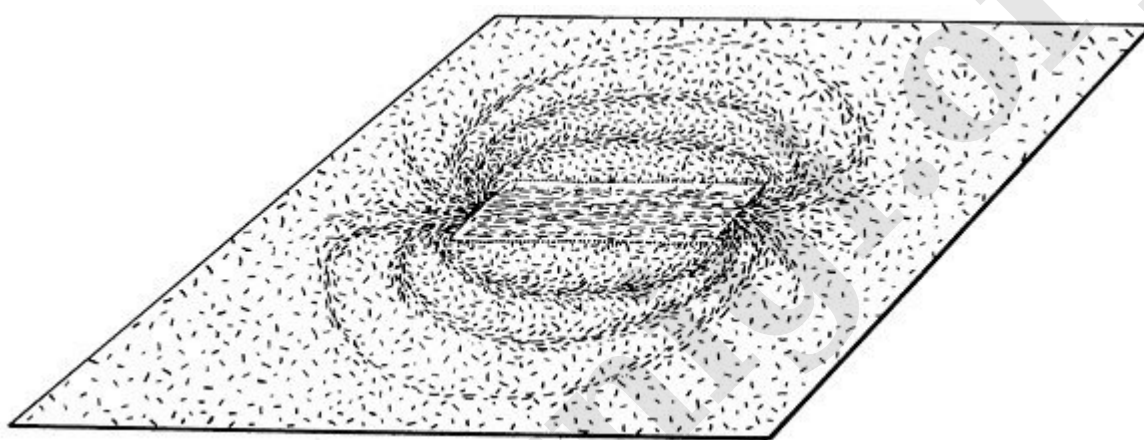


Рис. 2.6. Силовые линии магнитного поля вокруг магнитного бруска видны благодаря рассыпанным по листу бумаги железным опилкам (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из моей книги «Черные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна» [Торн 2009].)

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

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.

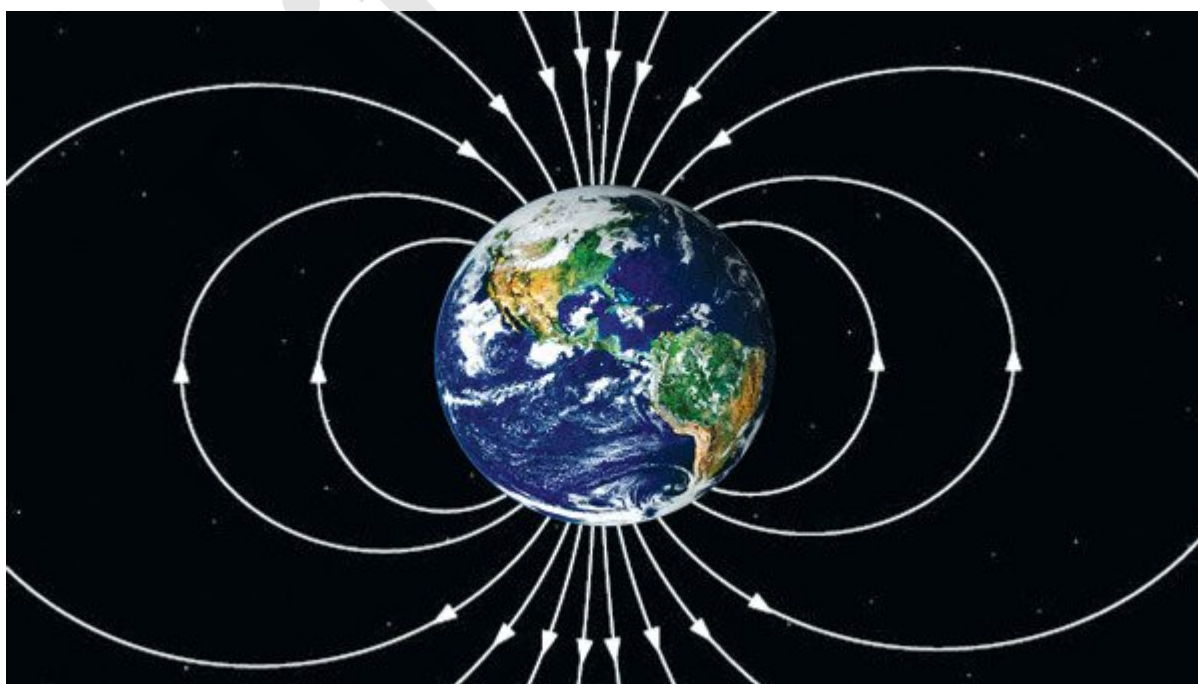


Рис. 2.8. Силовые линии магнитного поля Земли

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. Там протоны сталкиваются с молекулами кислорода и азота, заставляя их флуоресцировать<sup>14</sup>. Это свечение и есть полярное сияние.



Рис. 2.9. Полярное сияние над Хаммерфестом, Норвегия

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*<sup>15</sup> (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.

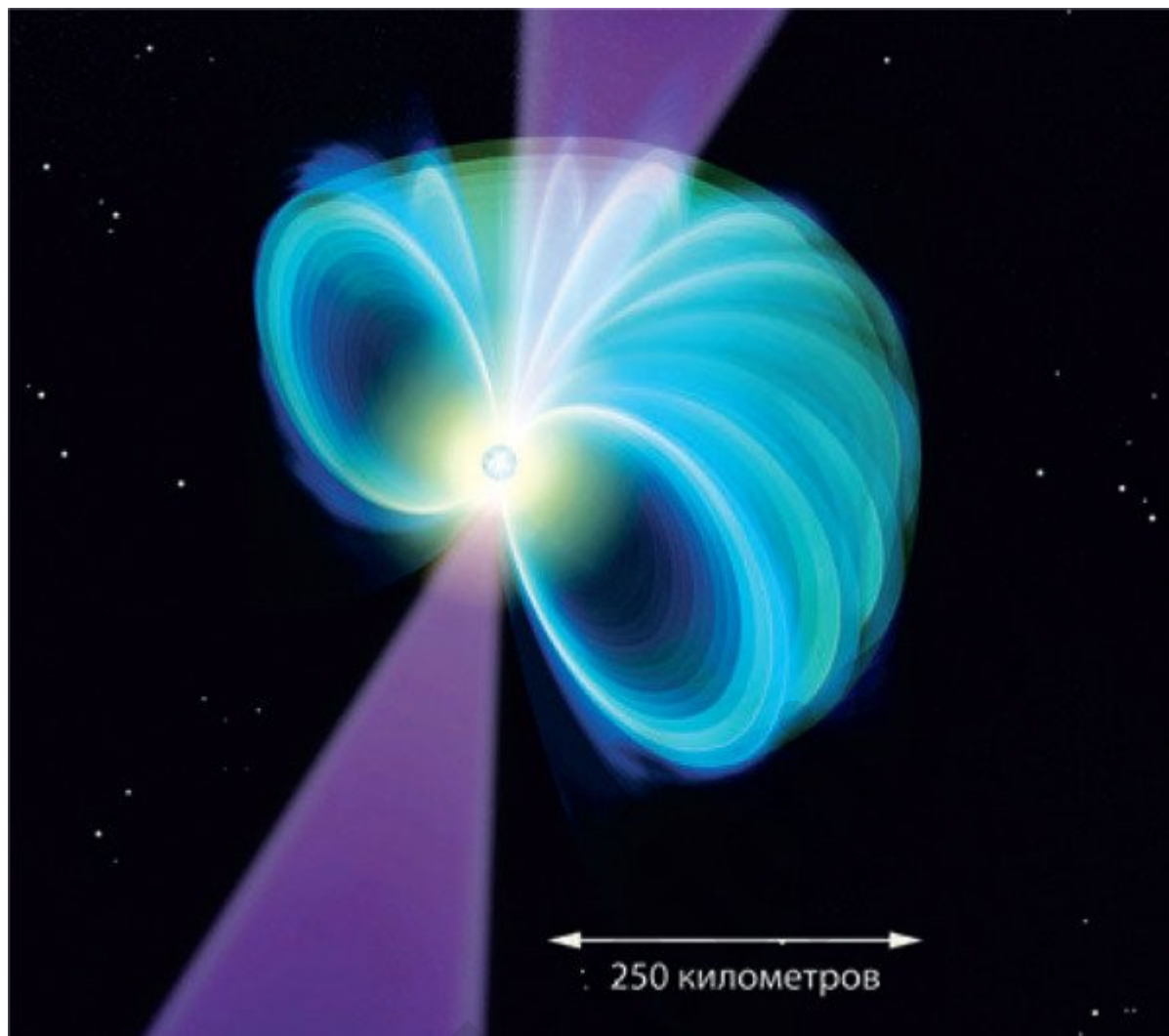


Рис. 2.10. Условное изображение нейтронной звезды с магнитным полем в форме пончика и джетами

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

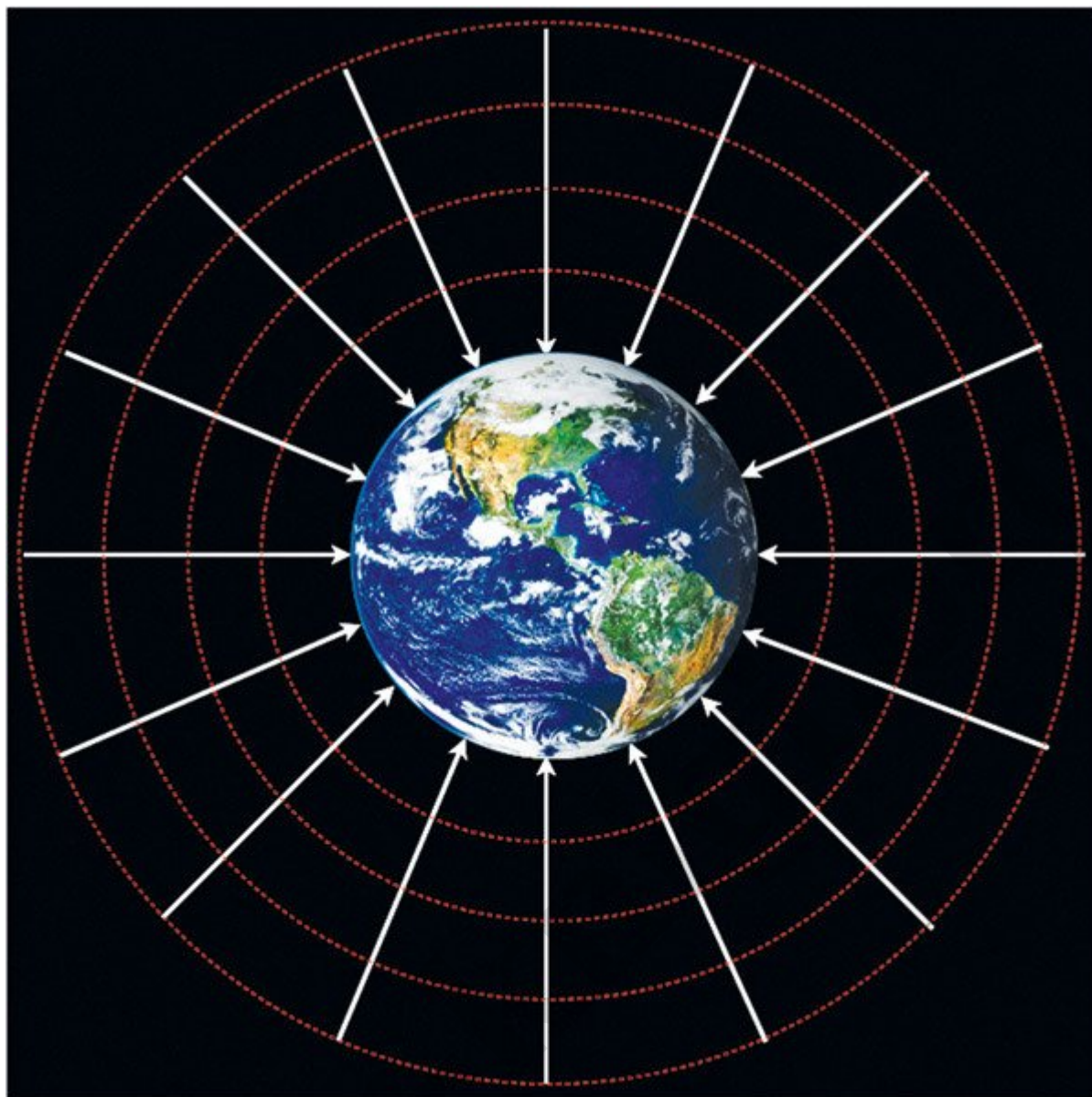


Рис. 2.11. Силовые линии гравитационного поля Земли



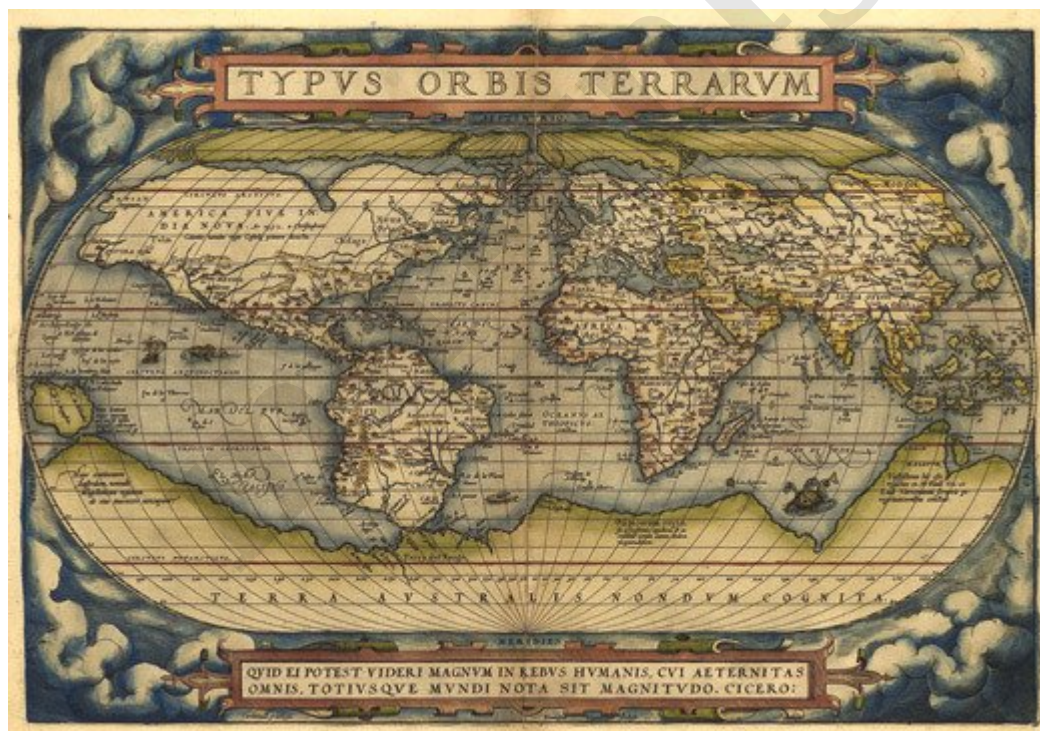
## Законы, управляющие Вселенной

### 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).



Мартин Вальдземюллер, 1506



Абрахам Ортелий, 1570



Эмануэль Боуэн, 1744

Рис. 3.1. Карты мира

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.



Рис. 3.2. Законы физики, управляющие Вселенной

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, 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»<sup>16</sup>, 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<sup>17</sup>. Например, когда речь идет о рождении Вселенной в Большом взрыве (см. главу 2); о ядрах черных дыр, подобных Гаргантюа (см. главу 26 и главу 28); или о путешествиях назад во времени (см. главу 30). «Пылкий брак»<sup>18</sup> 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 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).

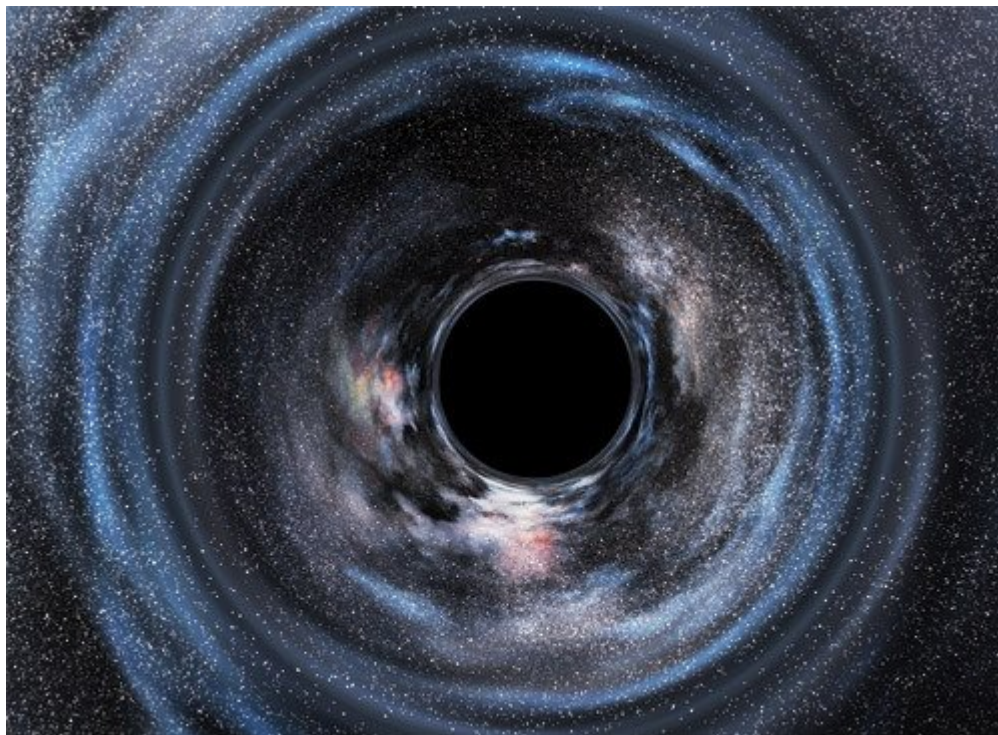


Рис. 3.3. Звезды вблизи тени Гаргантюа. Гаргантюа искривляет лучи света, идущие от каждой из звезд, чудовищно искажая облик своей галактики — «гравитационно линзируя» ее (Компьютерная модель, сделанная для этой книги командой по созданию визуальных эффектов студии Double Negative.)

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 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.



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

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. главу 24 и главу 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 «брana»), находящаяся в многомерном «гиперпространстве», которое физики называют словом «балк» (см. рис. 3.5 и главу 4 и главу 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.

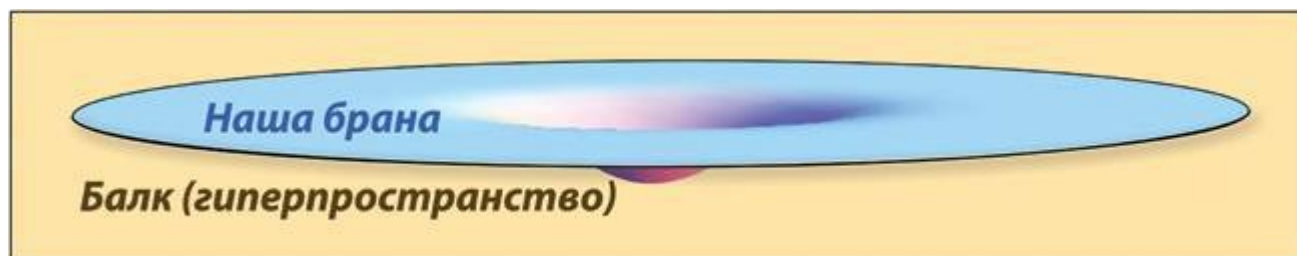


Рис. 3.5. Наша Вселенная в окрестности Солнца, изображенная как двумерная поверхность (или брана), находящаяся в трехмерном балке. В действительности наша брана обладает тремя пространственными измерениями, а балк — четырьмя. Эта схема будет рассмотрена подробнее в главе 4, см. в особенности рис. 4.4

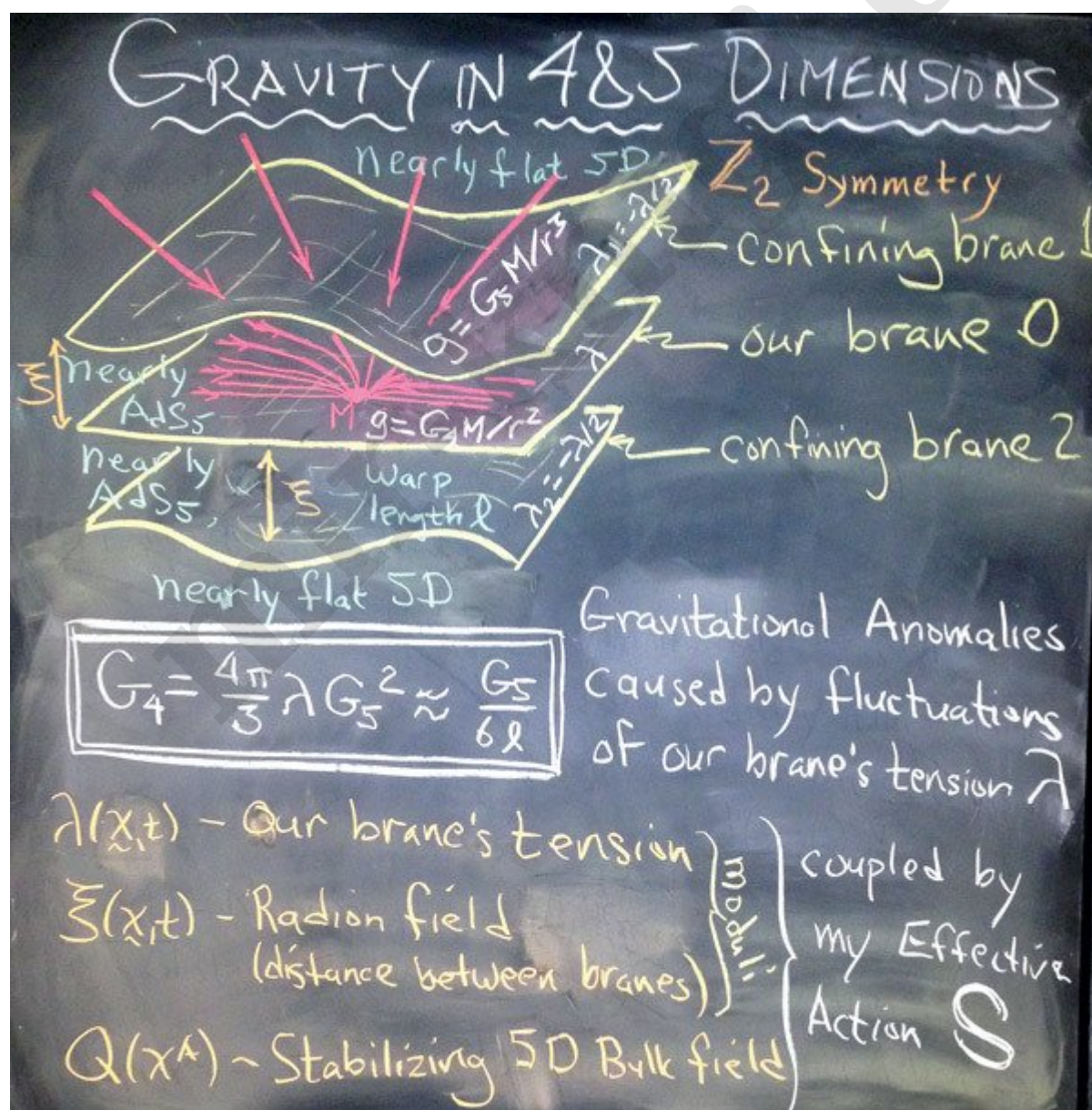


Рис. 3.6. Релятивистские уравнения на доске профессора Брэнда, описывающие возможные

обоснования гравитационных аномалий. Подробнее см. в главе 25

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:



истина



обоснованное предположение



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. главу 28 и главу 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?

## Искривления пространства и времени, приливная гравитация



### Эйнштейновский закон искривления времени

Эйнштейн бился над загадками гравитации с 1907 года. Наконец в 1912 году его посетило гениальное озарение. Он понял, что массивные тела вроде Земли или черных дыр могут искривлять время и это искривление является причиной гравитации. Он выразил эту идею в виде «эйнштейновского закона искривления времени» (как я его называю) — точной математической формулы<sup>19</sup>, суть которой можно описать фразой: *Все стремится существовать там, где оно медленнее всего стареет, и гравитационное притяжение направлено именно туда.*

Чем больше замедление времени, тем сильнее гравитационное притяжение. На Земле замедление времени составляет лишь несколько микросекунд в день, поэтому силы гравитации здесь умеренные. На поверхности нейтронной звезды, где замедление времени составляет несколько часов в день, гравитация сильна чрезвычайно. А у поверхности черной дыры, где время почти не движется, гравитация настолько огромна, что даже свет не может ее преодолеть.

Замедление времени вблизи черной дыры играет в «Интерстеллар» важную роль. Купер переживает, что больше не увидит свою дочь Мёрф, поскольку, находясь вблизи Гаргантюа, он стареет лишь на несколько часов, тогда как для Мёрф на Земле проходят годы.

В течение примерно полувека после того, как Эйнштейн вывел свою теорию, человеческие технологии оставались слишком примитивными, чтобы ее проверить. Первое достоверное подтверждение появилось в 1959 году, когда Боб Паунд и Глен Ребка воспользовались новым методом под названием «эффект Мёссбауэра»<sup>20</sup> для сравнения скорости течения времени в подвале 22-метровой башни Гарвардского университета со скоростью его течения на вершине этой же башни. Эксперимент был отменно точным: достаточно точным, чтобы определить разницу с погрешностью до 0,0000000000016 секунды (1,6 триллионной доли секунды) в день. Примечательно, что полученная разница превысила предел точности в 130 раз, в полном соответствии с теорией относительности: время в подвале текло на 210 триллионных долей секунды в день медленнее, чем наверху башни.

Точность проверки повысилась в 1976 году, когда Роберт Вессот из Гарварда с помощью ракеты NASA поднял атомные часы на 10 000 километров и посредством радиосигналов сравнил их ход с часами, которые остались на Земле (рис. 4.1). Вессот обнаружил, что время на Земле течет примерно на 30 микросекунд (0,00003 секунды) в день медленнее, чем на высоте 10 000 километров, и этот результат удовлетворял эйнштейновскому закону искривления времени в пределах точности эксперимента. Эта точность (погрешность эксперимента Вессота) равнялась 0,00007 от 30 микросекунд в день.

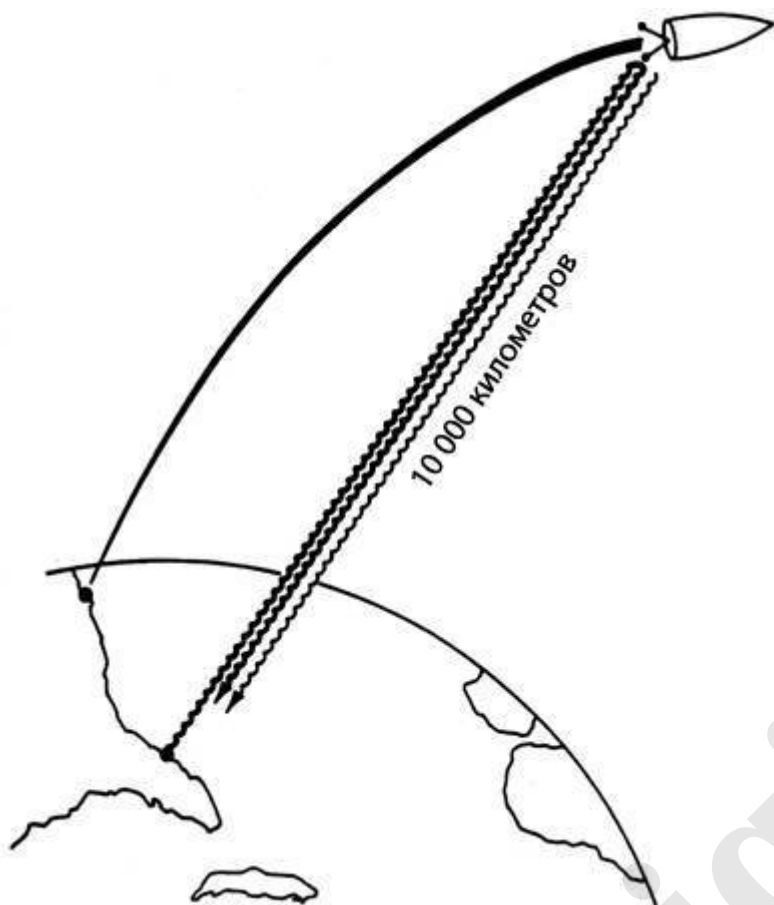


Рис. 4.1. Определение замедления времени на Земле с помощью атомных часов (из книги Клиффорда Уилла «Был ли прав Эйнштейн? Проверка общей теории относительности» [Will 1993])

Система глобального позиционирования (GPS), благодаря которой наши смартфоны могут определять свое положение с точностью до 10 метров, работает благодаря радиосигналам от 27 спутников, вращающихся вокруг Земли на высоте 20 000 километров (рис. 4.2). Обычно с какой-либо конкретной точки на Земле «просматривается» от 4 до 12 спутников. Радиосигналы с каждого из доступных спутников сообщают смартфону координаты спутника и время отправки сигнала. Смартфон сравнивает время отправки сигнала со временем его получения, чтобы вычислить пройденный этим сигналом путь, то есть расстояние между спутником и смартфоном. Зная координаты нескольких спутников и расстояния до них, смартфон может триангулировать собственное местоположение.

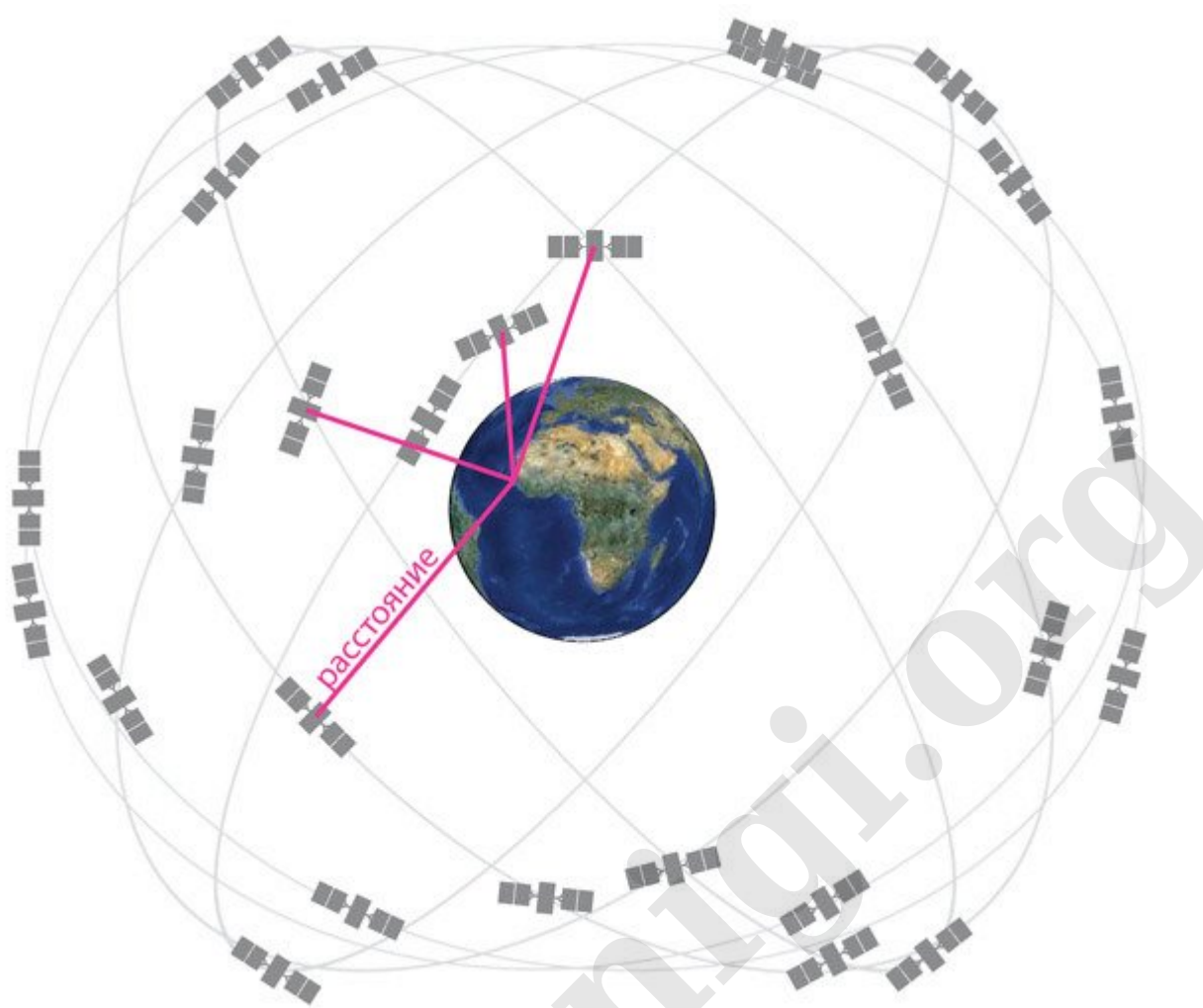


Рис. 4.2. Система глобального позиционирования (GPS)

Этот способ дал бы ошибку, если бы значения времени отправки сигналов соответствовали замерам действительного текущего времени на спутниках. На высоте 20 000 километров время течет на 40 микросекунд в день быстрее, чем на Земле, и спутники должны это компенсировать. Они измеряют время с помощью встроенных часов, а затем, перед передачей сигнала на телефон, «замедляют» его, подгоняя под скорость земного времени.

Эйнштейн был гением. Возможно, величайшим ученым в истории. Я привел лишь один из многих примеров одновременно применения и подтверждения теории Эйнштейна, которые были недоступны на тот момент, когда он сформулировал открытые им законы. Потребовалось полвека развития технологий, чтобы провести точную проверку, и прошло еще полвека, прежде чем описанный им феномен стал частью повседневной жизни людей. К другим примерам такого рода относятся лазеры, ядерная энергетика и квантовая криптография.

#### Искривление пространства: балк и наша брана

В 1912 году Эйнштейн осознал, что если массивные тела способны искривлять время, то должно искривляться и пространство. Но, несмотря на самые напряженные умственные усилия в его жизни, полная картина искривлений пространства долгое время от него ускользала.

Он работал над этим с 1912 года до конца 1915-го. И наконец в ноябре 1915 года благодаря величайшему озарению он вывел свое знаменитое «уравнение гравитационного поля в общей

теории относительности», включающее в себя все релятивистские законы, в том числе — искривления пространства.

И снова уровень технологий оказался слабоват для высокоточной проверки<sup>21</sup>. На этот раз потребовалось 60 лет разработок, которые увенчались несколькими решающими экспериментами. Самый, на мой взгляд, интересный из них провели гарвардские ученые Роберт Ризенберг и Ирвин Шапиро. В 1976–1977 годах они передавали радиосигналы двум космическим аппаратам на околомарсианской орбите. Аппараты — они назывались «Викинг-1» и «Викинг-2» — усиливали сигналы и отправляли их обратно на Землю, где замерялось общее время пути сигналов туда и обратно. Поскольку Земля и Марс движутся по орбитам вокруг Солнца, траектории радиосигналов менялись. Сначала они проходили вдалеке от Солнца, затем рядом с Солнцем, затем снова вдалеке (см. рис. 4.3, под графиком).

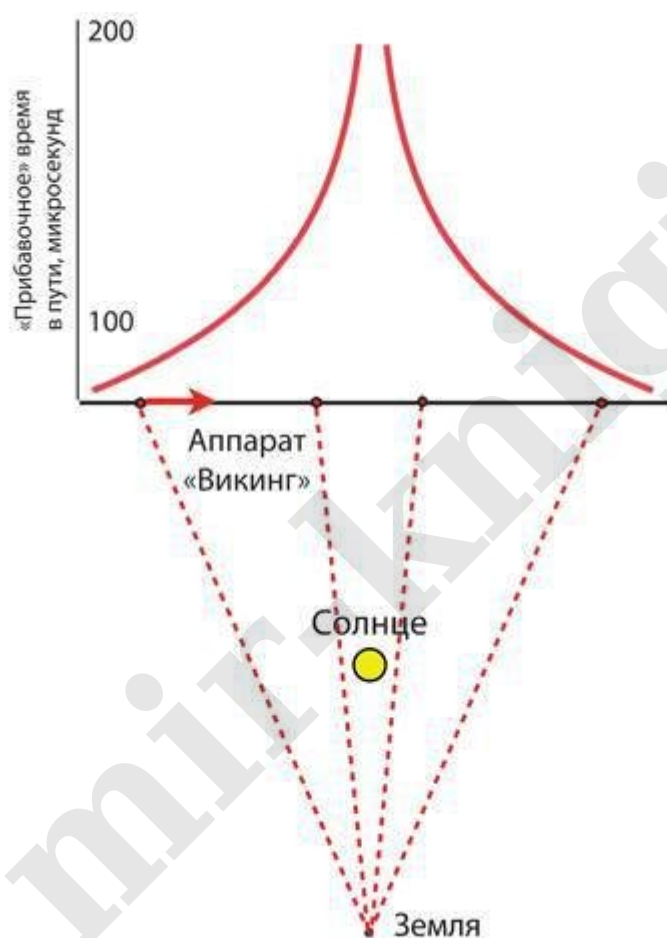


Рис. 4.3. Время пути радиосигналов от Земли до «Викинга» и обратно

Если бы пространство было ровным<sup>22</sup>, время пути сигнала менялось бы плавно и монотонно. Но этого не произошло. Когда радиоволны проходили вблизи Солнца, время их пути было больше (на сотни микросекунд) ожидаемого. Это «прибавочное» время показано в верхней части рис. 4.3 как функция от положения «Викинга» — сначала она возрастает, затем убывает. Так вот, один из эйнштейновских законов гласит, что радиоволны и свет всегда распространяются с неизменной скоростью<sup>23</sup>. Следовательно, расстояние от Земли до «Викинга», находящегося вблизи Солнца, должно быть больше ожидаемого — больше на сотни микросекунд, помноженных на скорость света; около 50 километров.

Подобная «добавка к расстоянию» была бы невозможна, будь пространство ровным, как лист

бумаги. Следовательно, всему виной искривление пространства вблизи Солнца. Учитывая задержку сигнала и зависимость этой задержки от положения космического аппарата относительно Земли, Ризенберг и Шапиро сделали выводы о форме искривления пространства. Точнее, они рассчитали форму двумерной поверхности, образованной траекториями радиосигналов. Эта поверхность оказалось очень близка к (искривленной) экваториальной плоскости Солнца, поэтому так я и буду ее называть.

Форма найденной учеными поверхности для экваториальной плоскости Солнца показана на рис. 4.4, причем искривление здесь преувеличено. Эта форма в точности совпадает с предсказаниями теории относительности — в пределах погрешности эксперимента, которая составляла 0,001, то есть одну тысячную часть действительного искривления. Вблизи нейтронной звезды искривления пространства гораздо сильнее. А вблизи черной дыры — сильны необычайно.

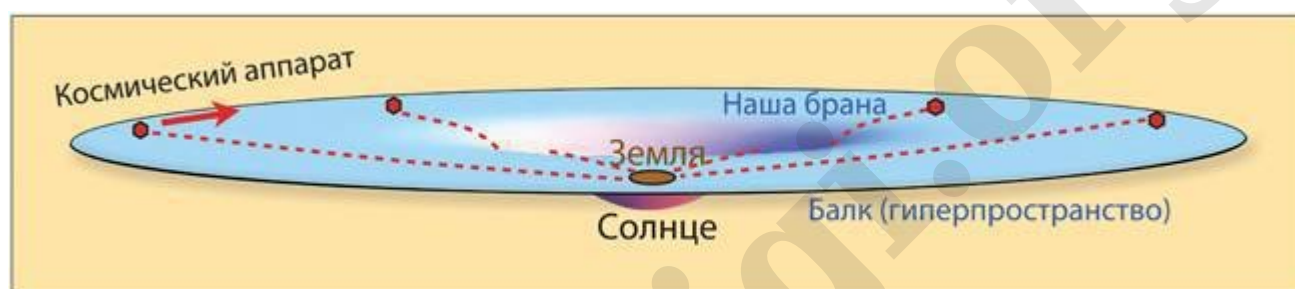


Рис. 4.4. Траектории пути радиосигналов от аппаратов «Викинг» через искривленную экваториальную плоскость Солнца

Экваториальная плоскость Солнца разделяет пространство на две половины — над плоскостью и под ней. Тем не менее на рис. 4.4 экваториальная плоскость изогнута, словно чаша. Внутри Солнца и рядом с ним она прогибается вниз, так что если взять окружность с центром, совпадающим с центром солнечной сферы, то диаметр этой окружности, помноженный на  $\pi$  (3,14159...), окажется больше, чем ее длина, — в случае окружности самого Солнца разница составит примерно 100 километров. Это небольшая разница, но космический аппарат измерил ее с точностью до одной тысячной.

Каким же образом пространство может прогибаться и куда оно может прогибаться? Оно прогибается внутрь многомерного гиперпространства (балка), которое не принадлежит нашей Вселенной!

Об этом стоит рассказать подробнее. На рис. 4.4 экваториальная плоскость Солнца показана как двумерная поверхность, которая прогибается внутрь трехмерного балка. Подобным образом мы, физики, представляем себе Вселенную в целом. У нашей Вселенной три измерения (назовем их «восток — запад», «север — юг» и «верх — низ»), и мы представляем ее себе как трехмерную мембрану (брану), которая прогибается в многомерный балк. Сколько же измерений у балка? Я тщательно разберу этот вопрос в главе 21, но в «Интерстеллар» балк имеет лишь одно дополнительное измерение: итого получается четыре пространственных измерения.

Однако нам с вами очень сложно вообразить, как наша трехмерная Вселенная, наша брана, существует в четырехмерном балке и прогибается в него. Поэтому в этой книге я, изображая нашу брану и балк, опускаю одно измерение, как на рис. 4.4.

Персонажи «Интерстеллар» часто говорят про пять измерений. Три из них — это пространственные измерения нашей браны (восток — запад, север — юг и верх — низ), четвертое — время, а пятое — это дополнительное пространственное измерение балка.

Существует ли балк на самом деле? Есть ли пятое, а возможно, и другие, неизвестные людям измерения? Вполне вероятно, что да. Мы еще рассмотрим этот вопрос в главе 21.

Искривление пространства (нашей браны) играет в «Интерстеллар» важнейшую роль. Например, без него не могло бы существовать червоточины, соединяющей Солнечную систему с далеким участком Вселенной, где находится Гаргантюа. Еще оно искажает звездное небо вокруг червоточины и вокруг черной дыры Гаргантюа; это эффект гравитационного линзирования (см. рис. 3.3).

На рис. 4.5 показан крайний случай искривления пространства. Эту фантастическую иллюстрацию создала моя подруга, художница Лия Хэллоран; на ней изображена гипотетическая область Вселенной со множеством червоточин (см. главу 14) и черных дыр (см. главу 5), которые проникают из нашей браны внутрь балка и сквозь него. Черные дыры сходятся к точкам, которые называются сингулярностями, а червоточины соединяют один участок браны с другим. Здесь, как и раньше, опущено одно измерение браны, из-за чего она выглядит как двумерная поверхность.



Рис. 4.5. Черные дыры и червоточины, проникающие из нашей браны в балк и сквозь него. Одно измерение как браны, так и балка опущено (Рисунок Лии Хэллоран.)

## Приливная гравитация

Теория относительности Эйнштейна утверждает, что планеты, звезды и космические аппараты

с отключенными двигателями движутся в окрестностях черной дыры по траекториям настолько прямым, насколько это позволяют искривленное дырой пространство и время<sup>24</sup>. На рис. 4.6 дан пример четырех таких траекторий. Две фиолетовые траектории, идущие к черной дыре, сначала были параллельны. Каждая траектория стремилась остаться прямой, и из-за искривления пространства и времени траектории стали сближаться. Зеленые траектории, идущие вокруг дыры, тоже сначала были параллельны. Но из-за искривлений они, наоборот, разошлись в разные стороны.

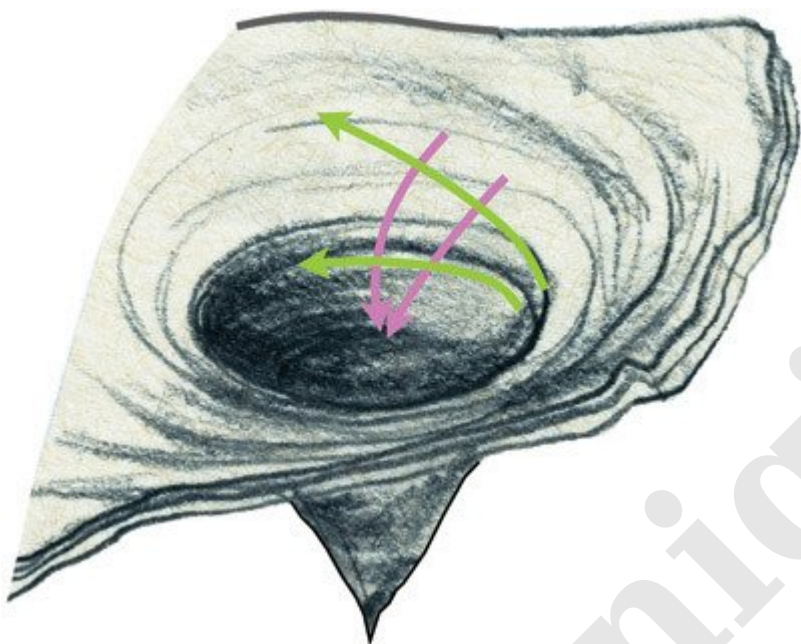


Рис. 4.6. Четыре траектории планетарного движения вблизи черной дыры. Изображение дыры взято с рисунка Лии Хэллоран (рис. 4.5)

Несколько лет назад мы с моими студентами смогли по-новому взглянуть на эти планетарные траектории. В теории относительности Эйнштейна используется такая математическая величина, как тензор Римана. Он подробно описывает искривление пространства и времени. Мы обнаружили заложенные в математическую модель риманова тензора силовые линии, которые одни планетарные траектории сводят вместе, а другие разводят в стороны. Мой студент Дэвид Николс назвал их «тендекс-линиями» (от латинского слова *tendere*, что значит «растягивать»).

На рис. 4.7 показано несколько тендекс-линий вокруг черной дыры с рис. 4.6. Зеленые траектории начинаются (справа) как параллельные, но затем красные тендекс-линии разводят их в стороны. Я пририсовал фигурку женщины, лежащей на красной тендекс-линии. Она явственно чувствует, как тендекс-линия растягивает ее от макушки до пяток.

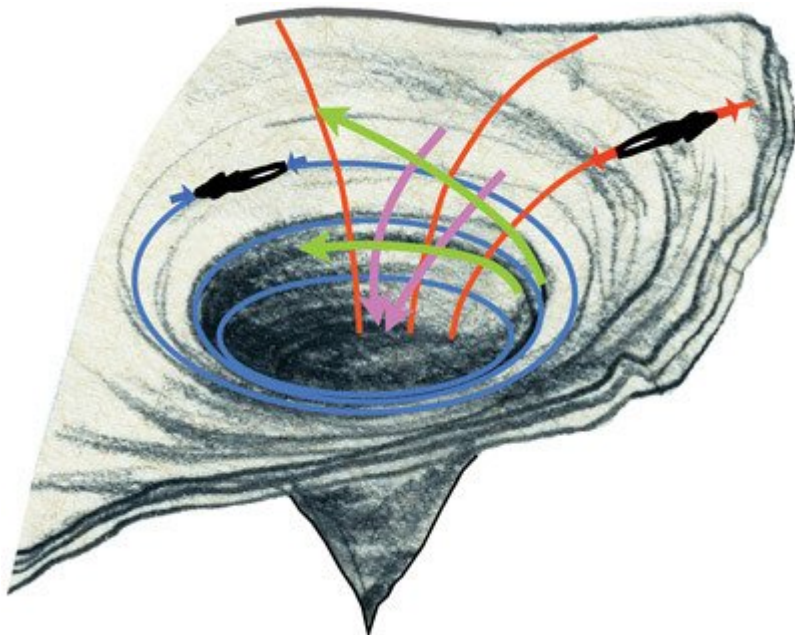


Рис. 4.7. Тендекс-линии вокруг черной дыры. Изображение дыры взято с рисунка Лии Хэллоран (рис. 4.5)

Фиолетовые траектории начинаются (сверху) как параллельные, но затем синие тендекс-линии сводят их вместе, и женщина, лежащая на синей тендекс-линии, чувствует сжатие.

Эти растяжения и сжатия — лишь способ описать искривления пространства и времени. С одной стороны, траектории сходятся или расходятся из-за того, что планетарные траектории в искривленном пространстве и времени стремятся к самым прямым путям из возможных. С другой стороны, это происходит из-за растяжений и сжатий, вызванных тендекс-линиями. Следовательно, тендекс-линии должны отображать искривления пространства и времени. Согласно математической модели тензора Римана, так оно и есть.

Черные дыры — не единственные объекты, порождающие силы растяжения и сжатия. Также их вызывают звезды, планеты и их спутники. В 1687 году Исаак Ньютон, работая над своей теорией гравитации, обнаружил эти силы и объяснил с их помощью феномен океанских приливов.

Лунная гравитация сильнее на ближней к Луне стороне Земли, чем на дальней, решил Ньютон. Притяжение «по бокам» Земли направлено слегка «внутрь», поскольку устремлено к центру Луны, и эти направления для каждого из «боков» чуть-чуть различаются. Таков привычный взгляд на лунную гравитацию, схематически изображенный на рис. 4.8 слева.

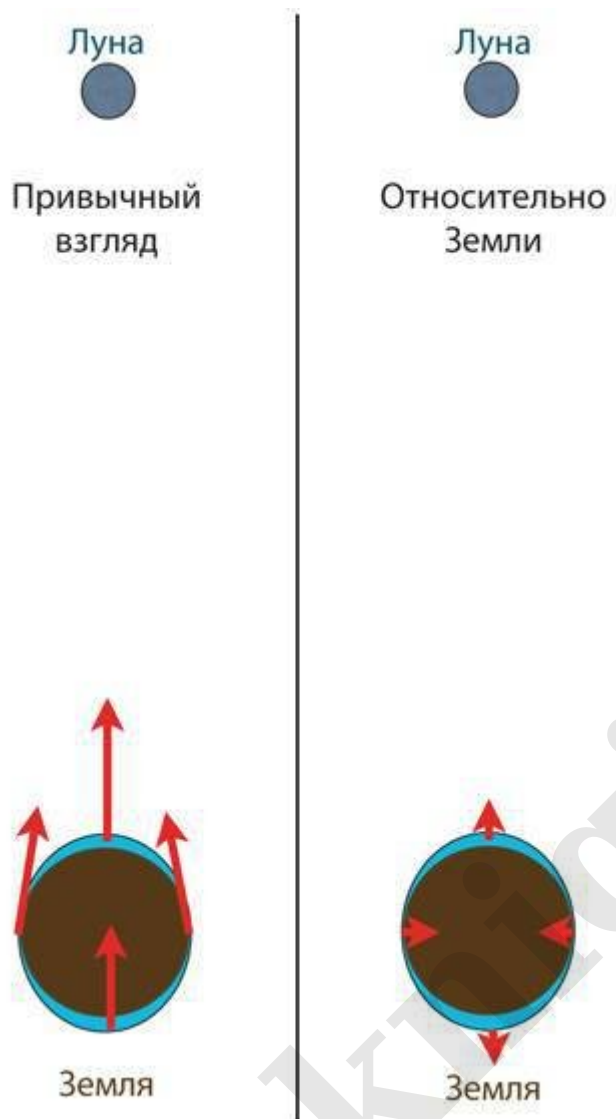


Рис. 4.8. Ньютоновское объяснение океанских приливов на Земле

Усредненная сила гравитационных воздействий остается для Земли как бы незамеченной, поскольку Земля свободно падает вдоль своей орбиты<sup>25</sup>. (Так же как члены экипажа «Эндюранс» не чувствуют притяжения Гаргантюа, пока находятся внутри «Эндюранс», движущегося по орбите вокруг черной дыры. Они испытывают действие лишь центробежных сил, вызванных вращением «Эндюранс» вокруг собственной оси.) А действуют на Землю силы лунного притяжения, обозначенные красными стрелками на левой половине рис. 4.8, за вычетом их усредненной величины — то есть растяжения по направлению к Луне и от Луны и сжатия «с боков» (правая половина рис. 4.8). Это качественно соответствует тому, что происходило бы возле черной дыры.

Эти «ощущаемые» силы оттягивают океанскую воду от земной поверхности на ближней и дальней от Луны сторонах, вызывая приливы. А также притягивают воду к поверхности Земли «с боков», что приводит к отливам. По мере того как Земля поворачивается вокруг своей оси (один полный оборот за 24 часа), мы наблюдаем два прилива и два отлива. Таково, по Ньютону, объяснение океанских приливов, если не считать небольшого осложнения: приливная гравитация Солнца тоже играет роль в этом процессе. Вызываемые ею растяжения и сжатия суммируются с влияниями Луны.

Из-за влияния на приливы и отливы эти гравитационные силы растяжения и сжатия — силы, «ощущаемые» на Земле, — называют приливными. И если рассчитать эти силы по

ньютоновским законам тяготения, результат будет с высочайшей точностью соответствовать расчетам по законам теории относительности Эйнштейна. Так и должно быть, поскольку релятивистские законы Эйнштейна и законы Ньютона всегда дают одинаковый результат в условиях умеренной гравитации и значительно меньших, чем скорость света, скоростей.

Согласно релятивистскому объяснению лунных приливов (рис. 4.9), приливные силы возникают из-за синих тендекс-линий, сжимающих Землю «с боков», и красных тендекс-линий, растягивающих в направлении к Луне и от нее. Здесь все так же, как с тендекс-линиями черной дыры (рис. 4.7). Тендекс-линии Луны — это способ зримо представить вызываемые Луной искривления пространства и времени. Поразительно, но столь малое искривление может породить силы столь мощные, что они способны вызывать океанские приливы!

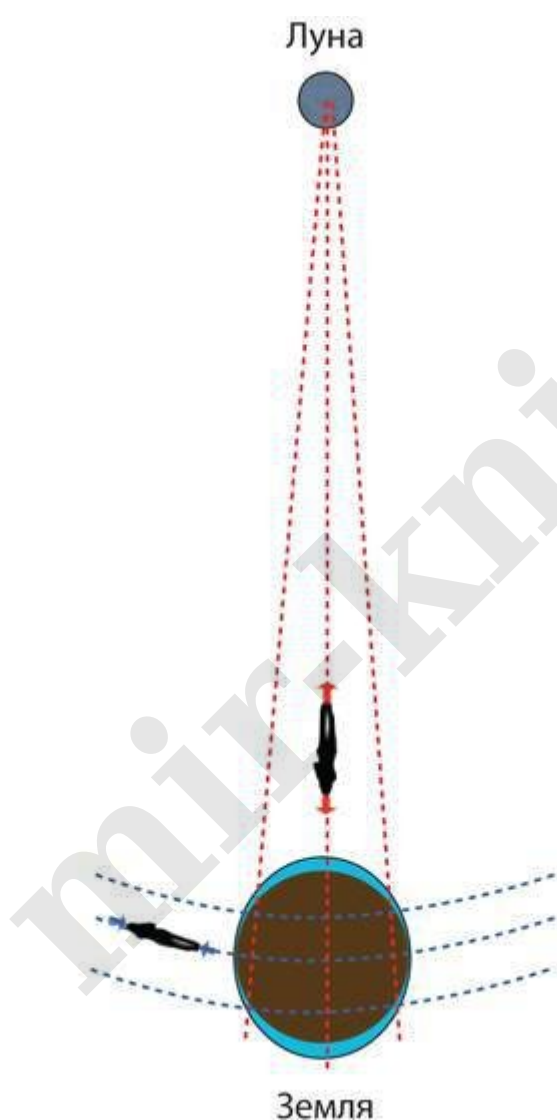


Рис. 4.9. Релятивистское объяснение приливов: тендекс-линии Луны

На планете Миллер (см. главу 17) приливные силы велики невероятно, и это причина возникновения огромных волн, с которыми сталкивается десант во главе с Купером.

Итак, у нас есть три точки зрения на приливные силы:

Объяснение Ньютона (рис. 4.8): Земля «ощущает» не полное гравитационное притяжение Луны, а полное притяжение (которое различно в разных точках Земли) минус усредненное притяжение.

Объяснение через тендекс-линии (рис. 4.9): тендекс-линии Луны растягивают и сжимают земные океаны, а тендекс-линии черной дыры (рис. 4.7) растягивают и сжимают траектории планет и звезд вблизи черной дыры.

Объяснение с помощью наиболее прямого пути (рис. 4.6): траектории движения звезд и планет вокруг черной дыры — самые прямые пути из возможных, учитывая вызванные дырой искривления пространства и времени.

Очень полезно иметь три разные точки зрения на одно явление. Ученые и инженеры львиную долю времени занимаются тем, что решают головоломки, например это может быть задача по проектированию космолета или исследования черной дыры. Как бы то ни было, если одна точка зрения на проблему не дает результатов, может помочь другая. Так профессор Брэнд в «Интерстеллар» подходит к изучению и укрощению гравитационных аномалий (см. главу 24 и главу 25). И таким образом провел большую часть своей взрослой жизни я.



## Черные дыры



Черная дыра Гаргантюа играет в «Интерстеллар» ключевую роль. В этой главе мы ознакомимся с общими сведениями о черных дырах, а в следующей — перейдем непосредственно к Гаргантюа. Начну я со странного заявления: черные дыры состоят из искривленного времени и искривленного пространства. И больше ничего — никакой материи. А теперь некоторые пояснения.

### Муравей на батуте: искривленное пространство черной дыры

Представьте, что вы муравей, который живет на детском батуте — резиновом полотнище, натянутом между высокими шестами. Под тяжестью лежащего на нем камня батут прогибается вниз (рис. 5.1). Вы — слепой муравей и не можете видеть ни шестов, ни камня, ни прогибающегося полотнища. Но вы умный муравей. Резиновое полотнище — это ваша вселенная, и вы подозреваете, что она искривлена. Чтобы узнать ее форму, вы ползаете по кругу в верхней ее части, измеряя длину окружности, а потом ползаете с одного края на другой через центр, чтобы измерить диаметр. Если бы ваша вселенная была плоской, длина окружности равнялась бы числу  $\pi$  (3,14159...), помноженному на диаметр. Но, как выясняется, длина окружности меньше диаметра, даже не помноженного на  $\pi$ . Ваша вселенная, понимаете вы, сильно искривлена!

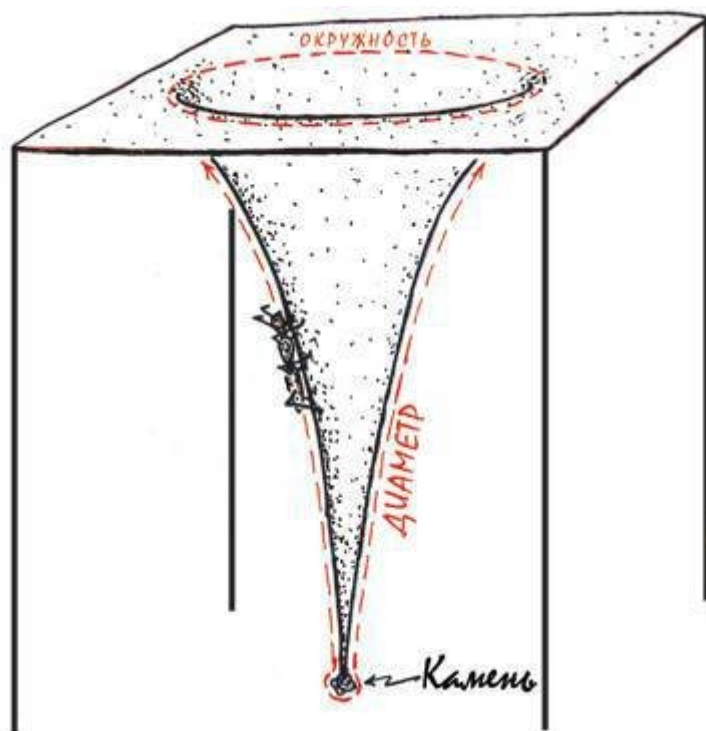


Рис. 5.1. Муравей на прогибающемся батуте (Мой набросок от руки.)

Пространство вблизи невращающейся черной дыры изгибается подобно батуту. Сделаем экваториальный срез черной дыры, получив двумерную поверхность. Если смотреть из балка, эта поверхность окажется искривленной, словно батут. Рис. 5.2 почти ничем не отличается от рис. 5.1, только там нет шестов и муравья, а вместо камня в центре черной дыры находится сингулярность.

Сингулярность — это крошечная область, где поверхность «бесконечно искривляется» и сходится в точку, в которой силы приливной гравитации бесконечно велики, из-за чего материя в том виде, как мы ее знаем, растягивается и сжимается вплоть до полного исчезновения. В главах 26, 28 и 29 рассказывается, как и почему сингулярность Гаргантюа несколько отличается от сингулярности на рис. 5.2.

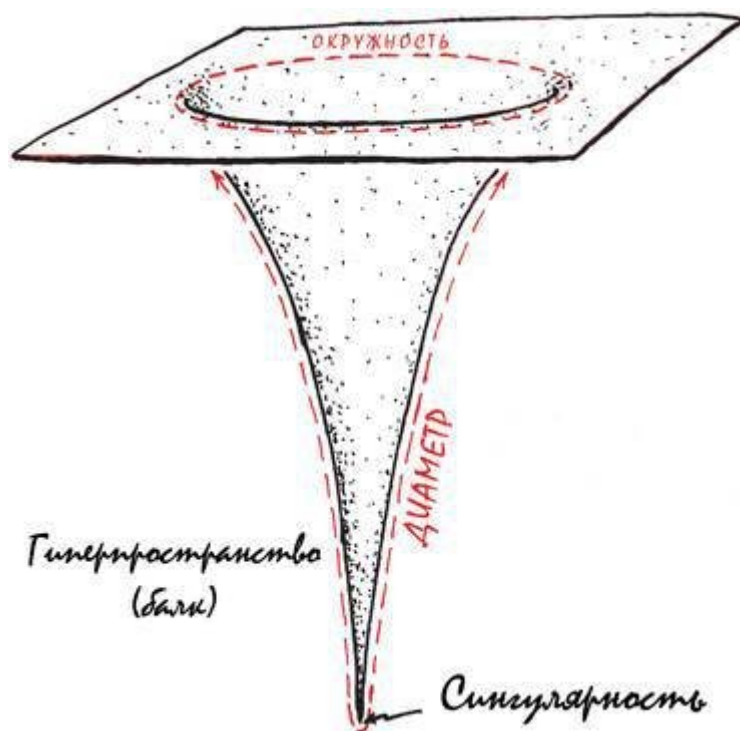


Рис. 5.2. Искривленное пространство внутри и вблизи черной дыры, взгляд из балка (Мой набросок от руки.)

Искривление батуа вызвано тяжестью камня. По аналогии можно предположить, что искривление пространства вблизи черной дыры вызвано ее сингулярностью, однако это не так. В действительности пространство черной дыры искривлено чудовищной энергией его искривления<sup>26</sup>. Вам не почудилось, я сказал именно то, что хотел сказать. Если вам кажется, что это утверждение закольцовано, что ж, так оно и есть, но в этом заключен глубокий смысл.

Чтобы согнуть лук перед выстрелом, требуется много энергии. Чтобы «согнуть» пространство, тоже нужно много энергии. И так же, как энергия изгиба «хранится» в согнутом луке (до тех пор пока не спустят тетиву и эта энергия не перейдет к стреле), энергия искривления хранится в искривленном пространстве черной дыры. Причем энергия эта столь велика, что сама вызывает искривление.

Искривление порождает искривление — нелинейным, закольцованным образом. Это следствие из теории относительности Эйнштейна лежит за гранью повседневного опыта и отчасти напоминает научно-фантастический сюжет, где герой, переместившись назад во времени, становится собственным родителем.

Этот сценарий самопорождающего искривления практически невозможен в нашей Солнечной системе. Искривления пространства в ней столь малы, что их энергия слишком слаба, чтобы привести к закольцованному искривлению<sup>27</sup>. Почти все случаи искривления пространства в Солнечной системе вызваны непосредственно материей: веществом Солнца, Земли и других планет, тогда как для черной дыры искривление целиком порождается самим искривлением.

#### Горизонт событий и искривление времени

Когда вы слышите «черная дыра», то, скорее всего, думаете не об искривлении пространства, а о том, как черная дыра засасывает объекты (см. рис. 5.3).

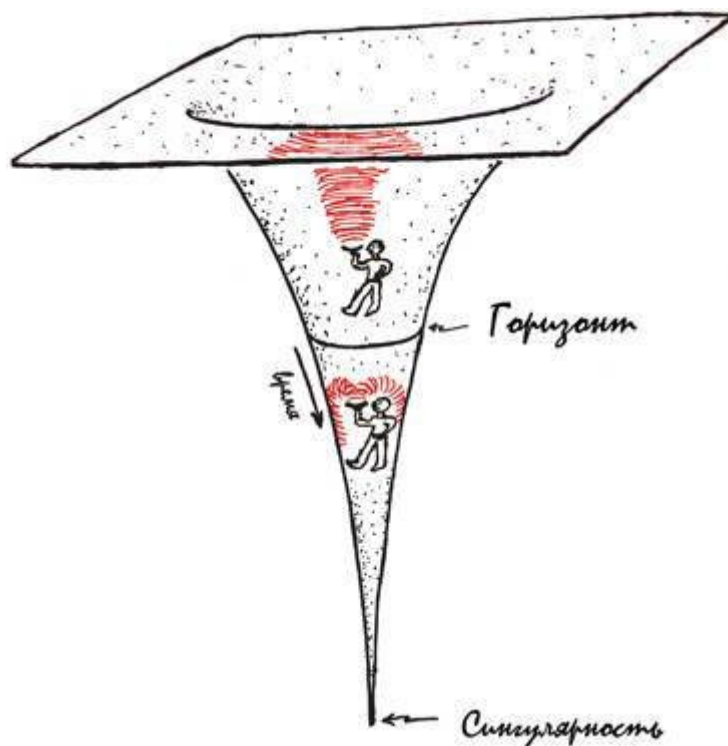


Рис. 5.3. Сигналы, которые я посылаю после пересечения горизонта событий, не могут выйти наружу. Важная оговорка: поскольку одно измерение тут опущено, я — двумерный Кип, скользящий по искривленной двумерной поверхности, части нашей браны (Мой набросок от руки.)

Если бы я с микроволновым передатчиком в руках падал в черную дыру, после пересечения горизонта событий меня бы неотвратно затягивало вниз, к сингулярности, и любые передаваемые мной сигналы устремлялись бы туда же вместе со мной. Никто, находясь снаружи горизонта событий, не сможет получить отправленные после пересечения горизонта сигналы — они, как и я сам, станут пленниками черной дыры (см. главу 28, где рассказывается, какую роль это играет в «Интерстеллар»).

По сути, черная дыра становится ловушкой из-за искривления времени. Если я зависну над дырой, сдерживая падение с помощью ракетных двигателей, то чем ниже я буду опускаться, тем медленнее будет течь для меня время. На горизонте событий время замедлится до полной остановки, и в соответствии с эйнштейновским законом искривления времени я должен буду ощутить бесконечно сильное гравитационное притяжение<sup>28</sup>.

Что же происходит внутри, за горизонтом событий? Время там искривлено настолько сильно, что, можно сказать, приобретает свойства пространственного измерения<sup>29</sup>: оно течет вниз, устремляясь к сингулярности. Этот нисходящий поток времени и служит причиной того, что выбраться из черной дыры невозможно. Все на свете неизбежно стремится к будущему<sup>30</sup>, а поскольку будущее в черной дыре нисходит вниз, прочь от горизонта, ничто не способно прорваться сквозь горизонт вверх.

### Пространственный вихрь

Черные дыры могут вращаться — так же, как вращается Земля. Вращающаяся дыра затягивает пространство вокруг себя в воронкообразное завихрение (рис. 5.4). Подобно воздуху в воронке смерча, ближе к центру черной дыры пространство завихряется быстрее, а по мере удаления от дыры — медленнее. Все, что падает к горизонту дыры, затягивается в пространственный

вихрь и кружится там, словно подхваченная смерчем соломинка. Как-либо защититься от этого вихревого движения, находясь вблизи горизонта, невозможно<sup>31</sup>.

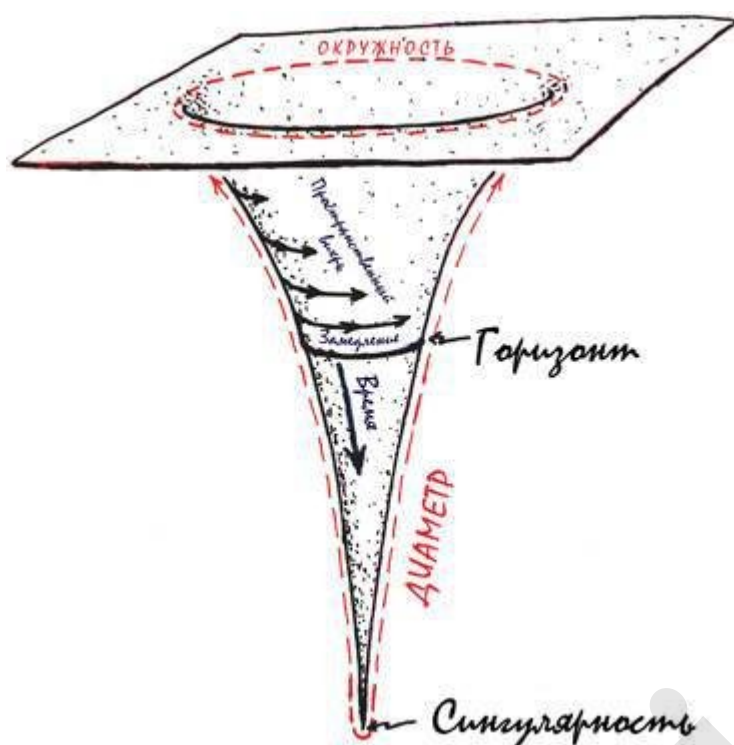


Рис. 5.4. Пространство вблизи вращающейся черной дыры затягивается в вихревую воронку (Мой набросок от руки.)

#### Искривления пространства и времени у черной дыры в точных цифрах

Все три аспекта искривления пространства — времени (искривление пространства, замедление и искажение времени, пространственный вихрь) описываются математическими формулами. Эти формулы были выведены из теории относительности Эйнштейна. Результаты их прогнозов отображены на рис. 5.5 количественно — в отличие от рис. 5.1–5.4, изображающих искривления лишь качественно.

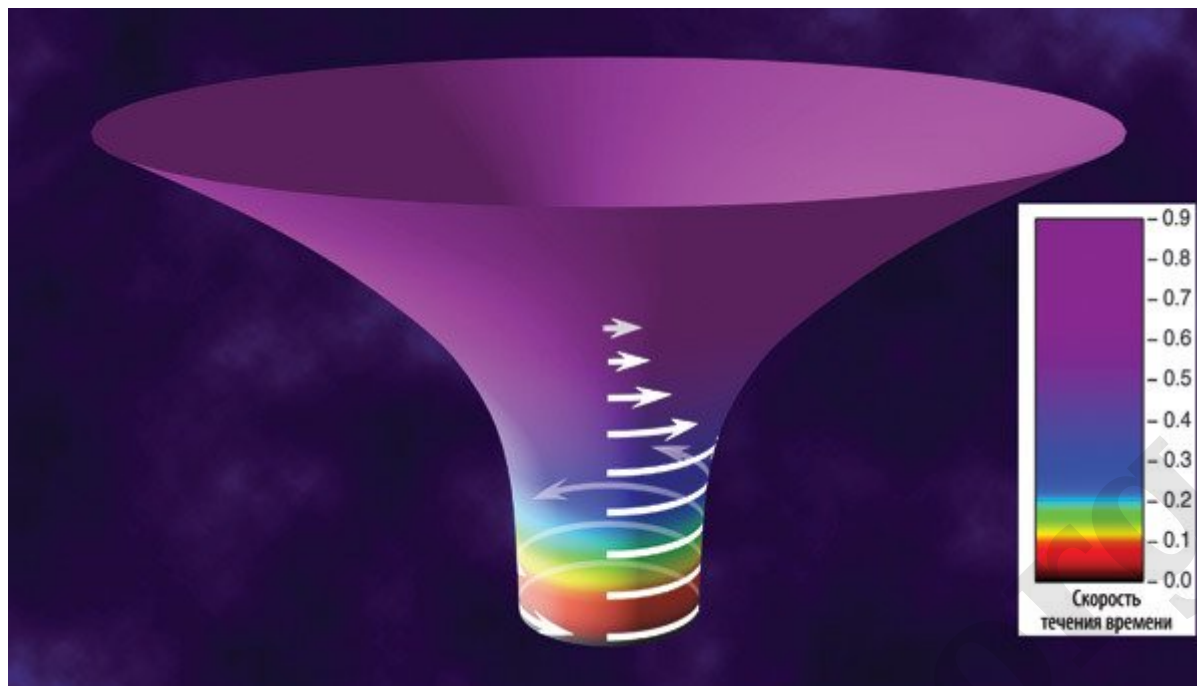


Рис. 5.5. Численно точное изображение искривления пространства и времени вблизи быстровращающейся черной дыры. Скорость вращения составляет 99,8 процента от максимально возможной (Рисунок Дона Дэвиса по моему наброску.)

Искривленная форма поверхности на рис. 5.5 в точности такова, какой мы бы видели экваториальную плоскость дыры из балка. Изменяющиеся цвета отображают замедление времени, как если бы его измерял некто, зависнув на постоянной высоте над горизонтом. В области перехода от синего цвета к зеленому скорость течения времени составляет 20 процентов от его скорости вдалеке от дыры. В области перехода от желтого к красному время замедляется до 10 процентов от его «нормальной» скорости. А у самого подножия, в районе черной окружности, время замирает. Это горизонт событий; он выглядит как окружность, а не как сфера, поскольку мы рассматриваем лишь экваториальную плоскость и используем только два измерения нашей Вселенной (нашей браны). Если бы мы восстановили третье пространственное измерение, горизонт выглядел бы сплюснутой сферой — сфероидом. Скорости, с которой пространство закручивается вокруг черной дыры, показаны белыми стрелками: на горизонте событий пространственный вихрь вращается быстро, а по мере того, как мы будем подниматься на космическом корабле вверх, он будет замедляться.

На численно точном рис. 5.5 не показана внутренняя область дыры. Об этом мы поговорим позже, в главах 26 и 28.

Искривление, показанное на рис. 5.5, является сущностью черной дыры. Из его подробного математического описания физики могут получить любые сведения о дыре, за исключением природы сингулярности, находящейся в ее центре. Чтобы разобраться с сингулярностью, нужны малоизученные законы квантовой гравитации (см. главу 26).

### Как выглядит черная дыра

Мы, люди, принадлежим нашей бране. Мы не можем покинуть ее и попасть в балк (разве что какая-нибудь сверхразвитая цивилизация переправит нас туда в тессеракте или ином устройстве, как это произошло с Купером, см. главу 29). Следовательно, нам не дано увидеть искривленное пространство черной дыры так, как оно изображено на рис. 5.5. Воронки и завихрения вокруг черных дыр, которые так часто показывают в кино, например в

фантастическом фильме студии Диснея «Черная дыра» (1979), никогда не сможет увидеть ни один житель нашей Вселенной.

«Интерстеллар» — первый голливудский фильм, в котором черная дыра изображена правильно: так, как воспринимали бы ее люди на самом деле. Посмотрите, например, на рис. 5.6 (это не кадр из фильма). Черная дыра отбрасывает черную тень на звездное поле позади нее. Исходящие от звезд лучи света изогнуты искривленным пространством дыры — эффект гравитационного линзирования проявляется в виде концентрического узора. Лучи света, доходящие до нас с левого края тени, движутся в том же направлении, что и завихрения пространства дыры. Пространственный вихрь подталкивает их, позволяя проходить мимо дыры ближе к горизонту событий, чем лучам справа от тени, которые сопротивляются завихрению пространства. Поэтому слева тень сплющена, а справа у нее небольшой выступ. В главе 8 я расскажу подробнее, как выглядит вблизи черная дыра, если смотреть на нее из нашей Вселенной, из нашей браны.



Рис. 5.6. Быстровращающаяся черная дыра (вверху), которая движется на фоне звездного поля, изображенного внизу (Компьютерная модель студии Double Negative, специально для этой

книги.)

Почему мы считаем это истиной

Теория относительности Эйнштейна проверена с большой точностью. Я не сомневаюсь в ее корректности, за исключением тех случаев, когда она вступает в противоречие с квантовой физикой. Для большой черной дыры, вроде Гаргантюа в «Интерстеллар», квантовая физика применима лишь вблизи ее центра, ее сингулярности, так что если черные дыры вообще существуют в нашей Вселенной, они должны обладать свойствами, продиктованными теорией относительности, свойствами, которые я описал выше.

Эти и другие свойства были выведены из уравнений Эйнштейна целой чередой физиков, причем достижения одних основывались на работах других (рис. 5.7). В первую очередь это Карл Шварцшильд, Рой Керр и Стивен Хокинг. В 1915 году, незадолго до гибели на русско-германском фронте Первой мировой войны, Шварцшильд рассчитал особенности искривления пространства вблизи невращающейся черной дыры; на сленге физиков эти выкладки зовутся метрикой Шварцшильда. В 1963 году Керр, новозеландский математик, сделал то же самое для вращающейся черной дыры, он вывел метрику Керра. А в начале семидесятых Стивен Хокинг и другие вывели набор законов, которым черные дыры должны подчиняться при поглощении звезд, при столкновениях и слияниях, а также при воздействии на черную дыру приливных сил других объектов.



Рис. 5.7. Исследователи черных дыр. Слева направо: Карл Шварцшильд (1873–1916), Рой Керр (род. 1934), Стивен Хокинг (род. 1942), Роберт Оппенгеймер (1904–1967), Андреа Гез (род. 1965)

Черные дыры определенно существуют. Теория относительности утверждает, что, когда у массивной звезды заканчивается ядерное топливо, которое поддерживает ее жар, она коллапсирует. В 1939 году Роберт Оппенгеймер и его студент Хартланд Снайдер, пользуясь законами Эйнштейна, обнаружили, что если коллапс будет в точности сферическим, звезда образует вокруг себя черную дыру, затем создаст сингулярность в ее центре и, наконец, будет поглощена этой сингулярностью. Никакой материи не останется — вообще ничего.

Образовавшаяся черная дыра будет состоять только из искривленного пространства и искривленного времени. За прошедшие с 1939 года десятилетия физики, используя теорию относительности, показали, что если коллапсирующая звезда деформирована и вращается, она также порождает черную дыру. Детали этого процесса были раскрыты при помощи компьютерного моделирования.

Астрономы нашли убедительные подтверждения того, что во Вселенной существует множество черных дыр. Замечательный пример — огромная черная дыра в центре нашей галактики,

Млечного Пути. Андреа Гез из UCLA (Калифорнийский университет в Лос-Анджелесе) и небольшая группа астрономов под ее руководством наблюдали за движением звезд вокруг этой черной дыры: см. рис. 5.8. Точки на орбитах обозначают позиции звезд, зафиксированные с интервалом в год. Положение черной дыры я пометил белой звездочкой. Исходя из наблюдаемых перемещений звезд Гез вычислила силу гравитации черной дыры: она выше, чем сила гравитации Солнца на таком же расстоянии, в 4,1 миллиона раз. Следовательно, масса этой черной дыры составляет 4,1 миллиона солнечных масс!

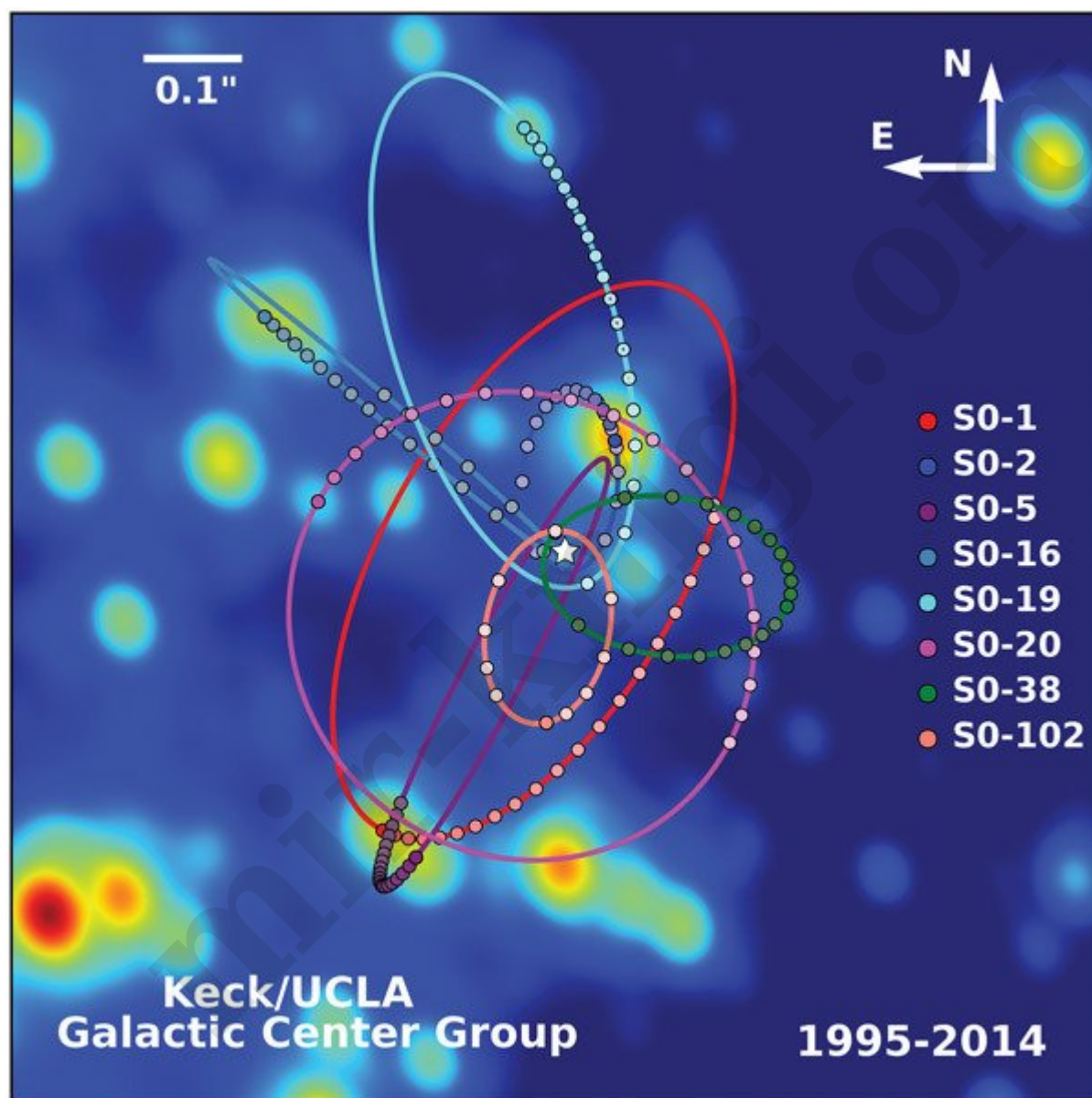


Рис. 5.8. Наблюдаемые орбиты движения звезд вокруг массивной черной дыры, находящейся в центре галактики Млечный Путь. Данные наблюдений Андреа Гез и ее коллег

На рис. 5.9 показано положение этой черной дыры на летнем ночном небе. Она находится у правого нижнего угла астеризма<sup>32</sup> Чайник в созвездии Стрельца, там, где нарисован белый крестик.

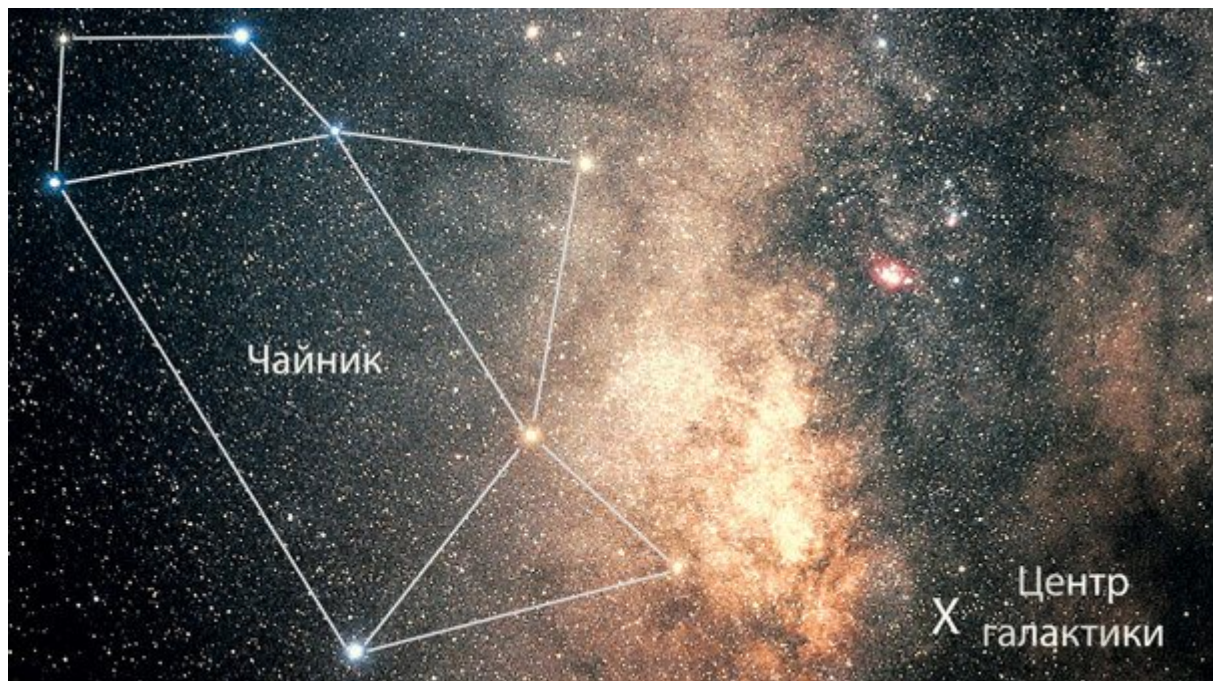


Рис. 5.9. Положение центра нашей галактики на ночном небе. Там находится гигантская черная дыра

В центре практически каждой большой галактики Вселенной обитает массивная черная дыра. Многие из этих дыр так же тяжелы, как Гаргантюа (100 солнечных масс), или даже тяжелее. Самая тяжелая черная дыра из обнаруженных весит в 17 миллиардов раз больше Солнца; она располагается в галактике NGC1277, в 250 миллионах световых лет от Земли — это примерно десятая часть расстояния до границы наблюдаемой Вселенной.

Также в нашей галактике находится примерно 100 миллионов относительно небольших черных дыр весом от трех до 30 солнечных масс. Мы знаем об этом не потому, что располагаем данными относительно каждой из этих дыр, а потому, что астрономы составили перечень массивных звезд, которые должны стать черными дырами после того, как иссякнет их ядерное топливо, и вычислили, для каких из этих звезд данное превращение уже произошло.

Так что черные дыры в нашей Вселенной не редкость. К счастью, в Солнечной системе их нет, иначе воздействие гравитации черной дыры на земную орбиту привело бы к катастрофе. Земля переместилась бы ближе к Солнцу и там поджарилась, или переместилась дальше от Солнца и там замерзла, а может, даже покинула Солнечную систему или угодила в черную дыру. Мы, люди, протянули бы при таком раскладе не больше года!

Астрономы определили, что ближайшая к Земле черная дыра находится от нее примерно в 300 световых годах — в сто раз дальше, чем ближайшая к нам звезда (не считая Солнца) проксима Центавра.

А теперь, вооруженные главными знаниями о Вселенной, силовых полях, искривлениях пространства — времени и в особенности о черных дырах, мы наконец готовы поговорить о Гаргантюа.

## II

### ГАРГАНТЮА

## Анатомия Гаргантюа

Если мы знаем массу черной дыры и скорость ее вращения, то, воспользовавшись законами теории относительности, мы можем узнать и все остальные ее свойства: размер, силу гравитационного притяжения, насколько сильно ее горизонт событий вытянут центробежными силами в плоскости экватора, особенности гравитационного линзирования находящихся позади дыры объектов... Все что угодно.

Поразительная вещь, которой не найти аналогов в повседневной жизни. Представьте, что, зная мой вес и скорость ходьбы, вы могли бы узнать обо мне все: цвет глаз, длину носа, коэффициент интеллекта...

Джон Уилер (мой наставник, придумавший название «черная дыра») изрек по этому поводу фразу: «У черных дыр нет волос», — то есть нет каких-либо дополнительных, независимых свойств, помимо массы и скорости вращения. По-хорошему ему стоило сказать: «У черной дыры лишь два волоса, по которым можно узнать о ней все», но это звучит не столь хлестко, как его фраза, быстро ставшая крылатой<sup>33</sup>.

Как показано в фильме, знающий теорию относительности физик способен вывести из свойств планеты Миллер массу и скорость вращения Гаргантюа и, следовательно, узнать о ней все остальное. Разберемся, как это работает<sup>34</sup>.

## Масса Гаргантюа



Планета Миллер (о которой я подробно расскажу в главе 17) находится настолько близко к Гаргантюа, насколько это возможно без того, чтобы планете угрожала гибель. Мы знаем об этом, поскольку экипаж, находясь там, тратит очень много «земного времени» — такое возможно лишь в предельной близости к Гаргантюа.

На столь малом расстоянии приливная гравитация черной дыры (см. главу 4) особенно сильна. Она растягивает планету Миллер в направлениях к Гаргантюа и от нее и сжимает «по бокам» (рис. 6.1).

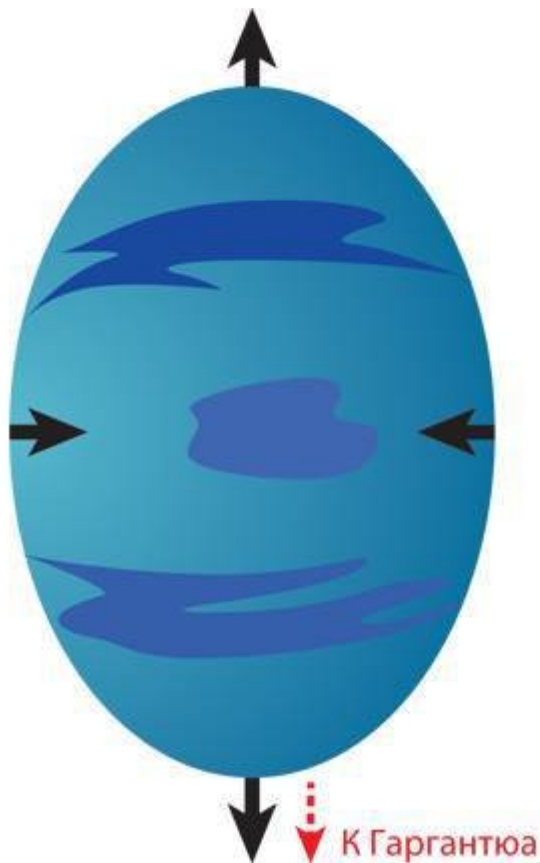


Рис. 6.1. Приливная гравитация Гаргантюа растягивает и сжимает планету Миллер

Сила этих растяжений и сжатий обратно пропорциональна квадрату массы Гаргантюа. Почему это так? Чем больше масса Гаргантюа, тем больше ее окружность, а значит, тем меньше разница между гравитационными силами, действующими на разные части планеты, то есть тем слабее приливные силы (см. ньютоновскую интерпретацию приливных сил, рис. 4.8). Исходя из этого можно сделать вывод, что масса Гаргантюа превышает солнечную не менее чем в 100 миллионов раз. Будь Гаргантюа не такой массивной, планету Миллер разорвало бы на части!

Во всех дальнейших рассуждениях я буду считать, что масса Гаргантюа равна массе 100 миллионов Солнц<sup>35</sup>. Например, объясняя в главе 17, как приливные силы Гаргантюа могут вызвать на планете Миллер гигантские волны, которые обрушиваются на «Рейнджер», я исхожу из этого значения.

Длина окружности горизонта событий черной дыры пропорциональна ее массе. Для Гаргантюа, масса которой составляет 100 миллионов Солнц, окружность горизонта приблизительно совпадает по размерам с орбитой движения Земли вокруг Солнца — около миллиарда километров. Неслабо! Посоветовавшись со мной, команда по созданию визуальных эффектов Пола Франклина использовала именно это значение.

Физики принимают радиус черной дыры равным длине ее окружности, деленной на  $2\pi$  (около 6,28). Из-за чудовищных искривлений пространства внутри черной дыры это значение не соответствует ее истинному радиусу, оно не равно расстоянию от горизонта до центра дыры, если измерять его в нашей Вселенной. Зато оно равно радиусу (половине диаметра) горизонта событий, если измерять его из балка (см. рис. 6.3). Понимаемый так радиус Гаргантюа составляет примерно 150 миллионов километров; столько же, сколько радиус орбиты Земли вокруг Солнца.



Когда Кристофер Нолан сказал мне, какое замедление времени на планете Миллер ему нужно — один час там на семь земных лет, — я был ошарашен. Я полагал это невозможным, о чем и сказал Крису. «Это не обсуждается», — отрезал он. Что ж, не в первый и не в последний раз я отправился в раздумьях домой, сделал кое-какие расчеты и... нашел выход.

Я обнаружил, что если планета Миллер будет настолько близко к Гаргантюа, насколько это возможно без риска упасть в черную дыру<sup>36</sup>, и если скорость вращения Гаргантюа будет достаточно высокой, замедление «один час за семь лет» возможно. Но Гаргантюа должна вращаться чертовски быстро.

Для скорости вращения черных дыр есть предел. Если он будет превышен, горизонт событий исчезнет, оставив на виду у всей Вселенной обнаженную сингулярность. А это, по всей видимости, противоречит законам физики (см. главу 26).

Выяснилось, что для замедления, которое нужно Крису, Гаргантюа должна вращаться со скоростью, близкой к предельной, меньше ее примерно на одну стотриллионную долю<sup>37</sup>. В Кип-версии я по большей части исхожу из этого значения.

Экипаж «Эндюранс» мог бы измерить скорость вращения дыры непосредственно: наблюдая с большого расстояния, как робот ТАРС падает к Гаргантюа (рис. 6.2)<sup>38</sup>. Для стороннего наблюдателя ТАРС никогда не окажется за горизонтом событий (поскольку посылаемые им сигналы не смогут выйти наружу после пересечения горизонта). Вместо этого будет казаться, что падение ТАРСа замедлилось, как будто он завис над горизонтом. При этом завихряющееся пространство Гаргантюа будет кружить его вокруг черной дыры. При скорости вращения Гаргантюа, близкой к предельной, орбитальный период ТАРСа — с точки зрения стороннего наблюдателя — составит около одного часа.

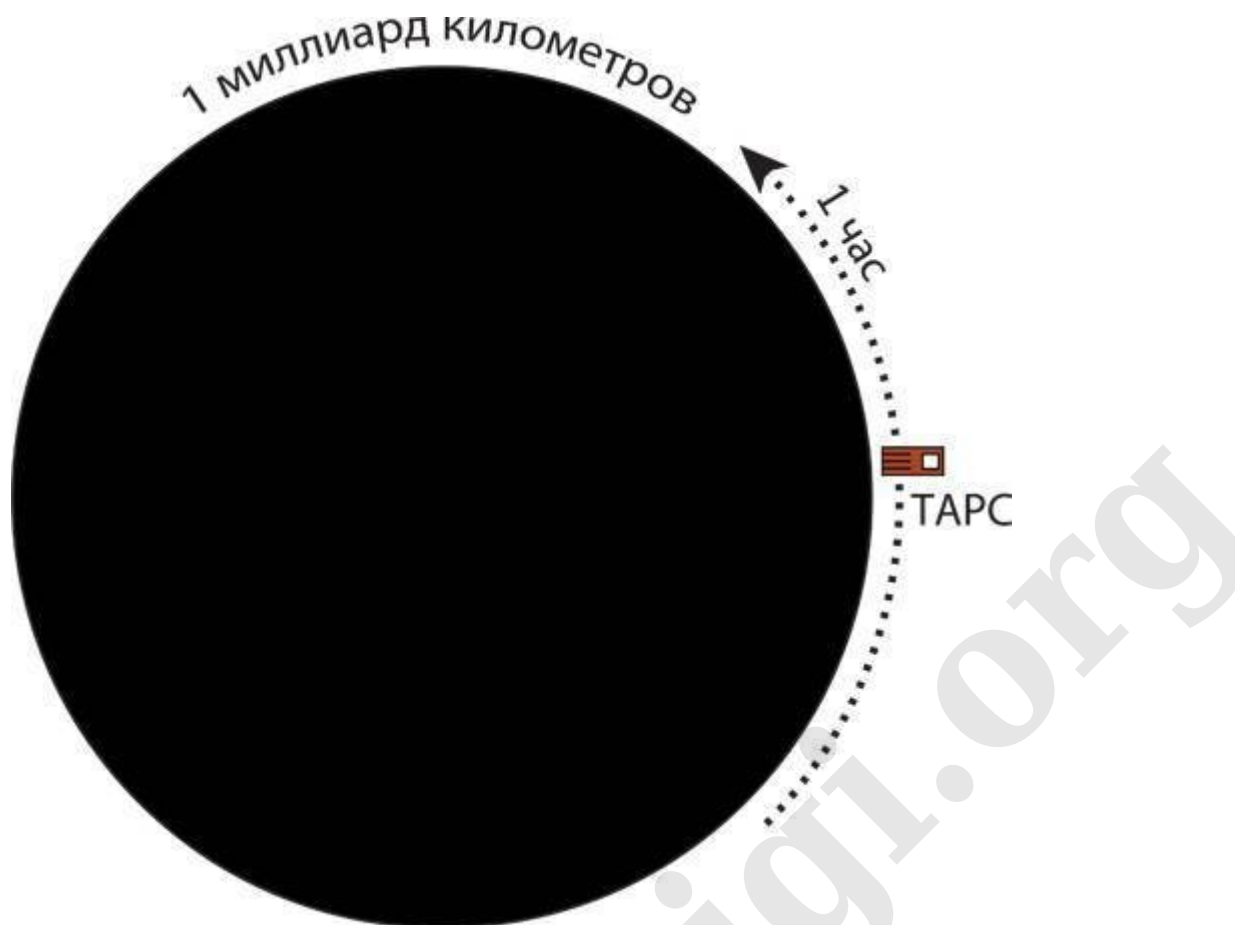


Рис. 6.2. TAPC, падающий к Гаргантюа, будет вращаться по окружности в миллиард километров; один оборот за час (для стороннего наблюдателя)

Можете подсчитать сами: длина орбиты TAPCа, вращающегося вокруг Гаргантюа, равна миллиарду километров, и TAPC покрывает это расстояние за один час, и стало быть, его скорость (для стороннего наблюдателя) равна примерно миллиарду километров в час — это почти скорость света! Если бы скорость вращения Гаргантюа была выше предельной, TAPC крутился бы вокруг дыры со сверхсветовой скоростью, что нарушает запрет Эйнштейна. Это косвенное доказательство того, что скорость вращения любой черной дыры не может быть выше предельной.

В 1975 году я обнаружил механизм, с помощью которого природа предохраняет черные дыры от превышения предельной скорости вращения: когда скорость близка к предельной, черной дыре сложно захватить объект, который летит по орбите в ту же сторону, что вращается она, и который, будь он захвачен, увеличил бы скорость ее вращения. Однако черная дыра с легкостью захватывает объекты, летящие в сторону, противоположную направлению ее вращения, то есть те объекты, захват которых уменьшает скорость вращения черной дыры. Поэтому черная дыра легко замедляется, как только скорость ее вращения приближается к предельной.

В моем тогдашнем исследовании я уделил особое внимание газовому диску (он напоминает кольца Сатурна), который вращается в одном направлении с черной дырой. Этот диск называется аккреционным (см. главу 9). Силы трения в диске вынуждают газ постепенно, по спирали, переходить в черную дыру, увеличивая скорость ее вращения. Кроме того, трение нагревает газ, и он излучает фотоны. Завихрение пространства вокруг дыры захватывает эти движущиеся по ходу ее вращения фотоны и отбрасывает их прочь, из-за чего они не могут попасть внутрь. И напротив, завихрение захватывает фотоны, которые движутся в сторону,

противоположную вращению дыры, и засасывает их внутрь, где они замедляют ее вращение. В итоге, когда скорость вращения черной дыры достигает 0,998 от предельной, устанавливается баланс, при котором замедление за счет захваченных фотонов в точности компенсирует убыстрение за счет поступающего в дыру газа. По-видимому, этот баланс довольно устойчив, и в большинстве случаев можно ожидать, что скорость вращения черной дыры не превышает 0,998 от предельной.

Однако я могу вообразить ситуации — очень редкие, если вообще встречающиеся в реальной Вселенной, и все же возможные, — когда скорость вращения подходит к предельной гораздо ближе, и даже настолько близко, насколько это требовалось Крису, чтобы замедлить время на планете Миллер: скорость на одну стотриллионную долю меньше предельной. Маловероятно, но возможно.

В кино это не редкость: чтобы снять шедевр, режиссер часто доводит все до предела. В фэнтезийных фильмах вроде «Гарри Поттера» этот предел находится далеко за границами научной достоверности. В научной же фантастике он, как правило, остается в границах вероятного. Собственно, это главное отличие между фэнтези и научной фантастикой. «Интерстеллар» — научная фантастика, а не фэнтези. Сверхбыстрая скорость вращения Гаргантюа с научной точки зрения возможна.

## Анатомия Гаргантюа



Узнав массу и скорость вращения Гаргантюа, я использовал уравнения Эйнштейна, чтобы рассчитать ее анатомию. Так же как и в главе 5, здесь мы рассмотрим только внешнюю анатомию, отложив внутреннее строение (особенно сингулярность) Гаргантюа до глав 26 и 28.

В верхней части рис. 6.3 показана форма экваториальной плоскости Гаргантюа, если смотреть на нее из балка. Этот рисунок напоминает рис. 5.5, но, поскольку скорость вращения Гаргантюа гораздо ближе к предельной (одна стотриллионная, а не две тысячные, как на рис. 5.5), «горловина» у Гаргантюа намного длиннее. Она тянется далеко-далеко вниз, прежде чем достигает горизонта. Область возле горизонта, если смотреть на нее из балка, похожа на продолговатый цилиндр. Длина этого цилиндра составляет около двух окружностей горизонта, то есть два миллиарда километров.

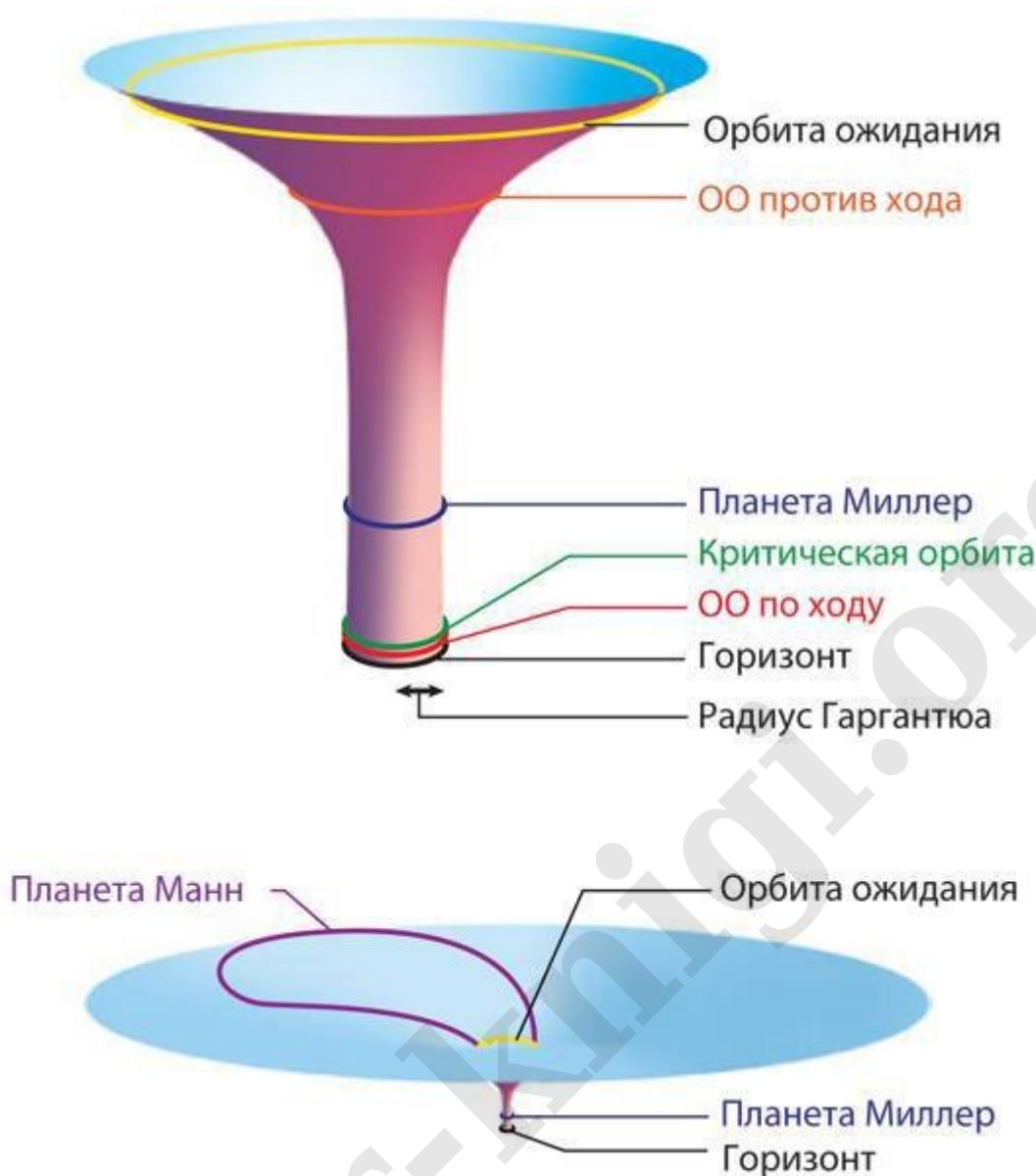


Рис. 6.3. Анатомия Гаргантюа при скорости вращения на одну стотриллионную меньше предельной (что необходимо для радикального замедления времени на планете Миллер)

На рис. 6.3 поперечные сечения цилиндра представлены окружностями, но если бы мы, сдвинувшись от экваториальной плоскости Гаргантюа, восстановили третье измерение нашей браны, эти сечения стали бы сплюснутыми сферами (сфероидами).

Я отметил на экваториальной плоскости Гаргантюа некоторые специфические участки: горизонт событий (черная окружность); критическая орбита, с которой Купер и ТАРС падают к Гаргантюа (зеленая окружность; см. главу 27); орбита планеты Миллер (синяя окружность; см. главу 17); орбита, на которой остается «Эндюранс», ожидая возвращения экипажа с планеты Миллер (желтая окружность); сегмент неэкваториальной орбиты планеты Манн в проекции на экваториальную плоскость (фиолетовая окружность). Дальняя часть орбиты планеты Манн пролегает на столь большом расстоянии от Гаргантюа (не менее 600 радиусов Гаргантюа; см. главу 19), что, чтобы изобразить ее, понадобилось перейти на другой масштаб (нижняя часть рис. 6.3), и даже после этого пришлось схитрить: я нарисовал дальнюю часть орбиты на расстоянии 100 радиусов Гаргантюа вместо 600. Сокращение ОО в подписях к красным окружностям означает «огненная оболочка» (о ней — следующий параграф).

Откуда мне знать, как располагаются все эти окружности? Орбиту ожидания я определил

ориентировочно, а о прочем расскажу позже. В фильме Купер описывает орбиту ожидания так: «Мы встанем на высокую орбиту, параллельную орбите планеты Миллер, но немного дальше». При этом, по его словам, корабль должен находиться достаточно далеко от Гаргантюа, чтобы «избежать сдвига времени», то есть достаточно далеко, чтобы замедление времени относительно земного было незначительным. Я выбрал орбиту в пять радиусов Гаргантюа (желтая окружность на рис. 6.3). Время, которое «Рейнджер» в фильме затрачивает на путь от орбиты ожидания до планеты Миллер, — 2,5 часа — как раз подходит для этого расстояния.

Однако тут есть одна заковыка. На таком расстоянии Гаргантюа выглядела бы огромной, она бы закрывала для «Эндюранс» около 50 градусов обзора. Впечатляюще, конечно, но чересчур впечатляюще, когда до конца фильма еще далеко! Поэтому Крис и Пол решили изобразить Гаргантюа, видимую с орбиты ожидания, гораздо меньшей: примерно два с половиной градуса обзора, то есть в пять раз больше Луны, видимой с Земли, — все еще впечатляюще, но в меру.

## Огненная оболочка



Гравитация вблизи Гаргантюа настолько сильна, а пространство и время настолько искривлены, что свет (фотоны) может задерживаться на орбитах снаружи горизонта событий, снова и снова путешествуя вокруг дыры, прежде чем ее покинуть. Такие орбиты нестабильны в том смысле, что фотоны всегда, рано или поздно, их покидают. (В отличие от фотонов, попавших за горизонт, которые, напротив, уже никогда не выйдут наружу.)

Я называю такой задержавшийся на орбите свет «огненной оболочкой». Эта огненная оболочка играет важную роль в компьютерном моделировании (см. главу 8) для «Интерстеллар».

В случае невращающейся черной дыры огненная оболочка представляет собой сферу с окружностью в 1,5 раза больше, чем окружность горизонта. Свет путешествует по этой сфере огромными кругами (похожими на земные меридианы); часть его уходит в черную дыру, а часть — просачивается наружу, улетаая прочь.

Если же черная дыра вращается, ее огненная оболочка расширяется к дыре и от нее, приобретая таким образом некую конечную толщину, а не образуя лишь поверхность сферы. Для Гаргантюа, с ее огромной скоростью вращения, огненная оболочка занимает на экваториальной плоскости (рис. 6.3) участок от нижней красной окружности до верхней красной окружности. Она настолько широка, что включает в себя и планету Миллер, и критическую орбиту, и много чего еще! Нижняя красная окружность — это луч света (фотонная орбита), который движется вокруг Гаргантюа по ходу ее вращения. Верхняя красная окружность — фотонная орбита, которая движется против хода вращения дыры. Нетрудно понять, что пространственный вихрь позволяет свету, направленному по ходу вращения дыры, не падать в дыру, находясь гораздо ближе к горизонту, чем это может свет, направленный против хода вращения. Вот сколь сильно воздействие пространственного вихря!

Часть пространства, которую огненная оболочка занимает над и под экваториальной плоскостью, показана на рис. 6.4. Это большая пончикообразная область. На рисунке я опускаю искривления пространства: они бы помешали изобразить огненную оболочку в трех измерениях.

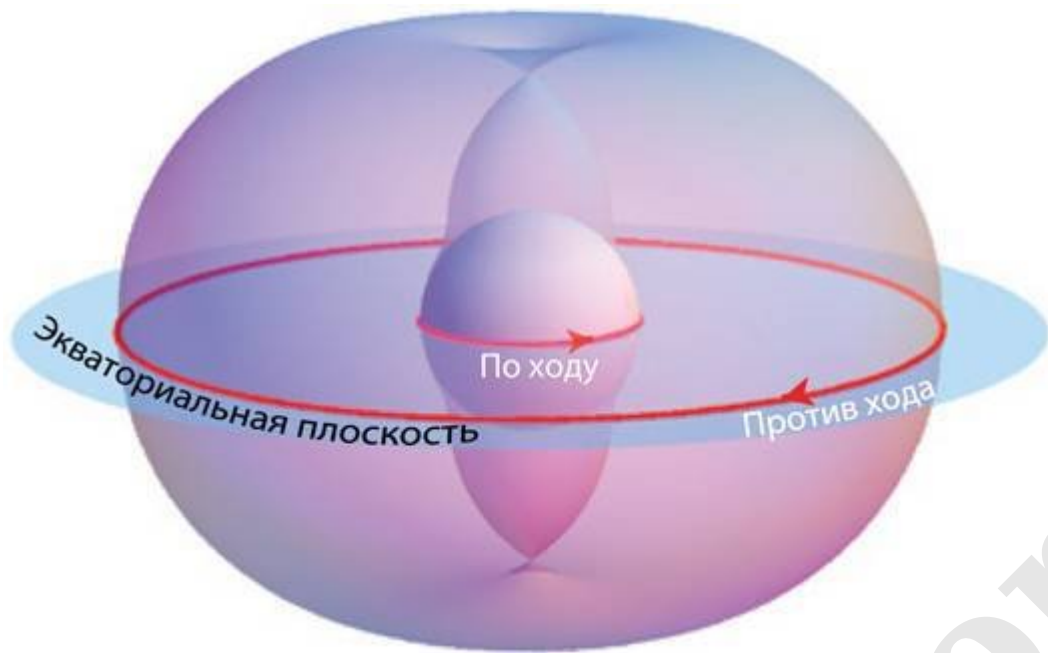


Рис. 6.4. Пончиковобразная область вокруг Гаргантюа, занятая огненной оболочкой

На рис. 6.5 показаны примеры лучей света (фотонных орбит), задержавшихся в огненной оболочке.

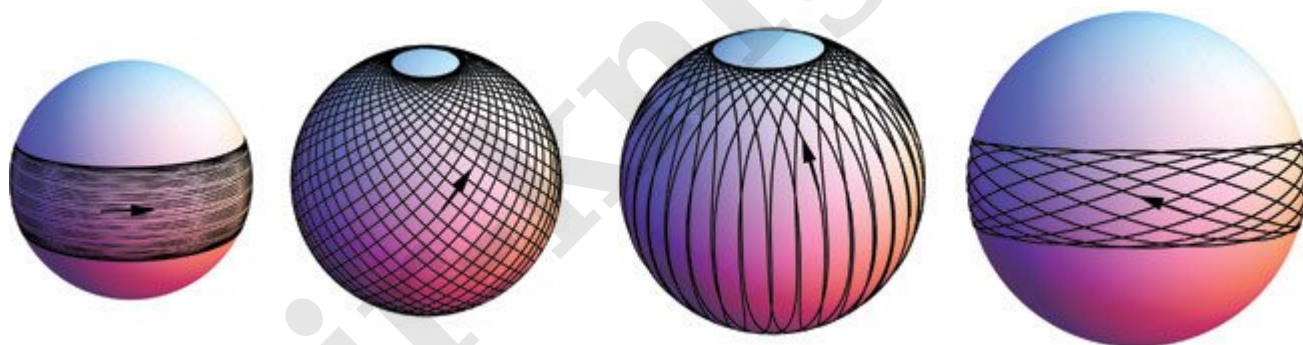


Рис. 6.5. Примеры лучей света (фотонных орбит), задержавшихся в огненной оболочке; рассчитано с помощью уравнений теории относительности

Черная дыра находится в центре каждой из этих орбит. Крайняя слева орбита закручивается вокруг экваториальной области небольшой сферы, всегда в направлении вращения Гаргантюа, и примерно совпадает с нижней (внутренней) красной орбитой на рис. 6.3 и 6.4. Следующая орбита на рис. 6.5 закручивается вокруг сферы побольше, в направлении, близком к осевому, но со смещением в сторону хода вращения дыры. Третья орбита еще больше и тоже близка к осевому направлению, но со смещением против хода. Четвертая — направлена против вращения, она находится почти в экваториальной области и приблизительно совпадает с верхней (внешней) красной экваториальной орбитой на рис. 6.3 и 6.4. На самом деле все эти орбиты вложены одна в другую, как матрешки, раздельно я показал их для наглядности.

Некоторые из задержавшихся в огненной оболочке фотонов покидают ее, вылетая наружу и удаляясь от Гаргантюа по спирали. Остальные фотоны покидают оболочку, приближаясь по спирали к Гаргантюа и падая за горизонт. Задержавшиеся в огненной оболочке, но покидающие ее фотоны имеют большое значение для изображения Гаргантюа в фильме. Они подчеркивают тень Гаргантюа, как ее видит экипаж «Эндюранс», и формируют вокруг края

тени тонкую яркую линию, «огненное кольцо» (см. главу 8).

## 7

### Гравитационные пращи

и

Управлять космическим кораблем вблизи Гаргантюа нелегко — из-за очень больших скоростей. Чтобы не погибнуть, планета, звезда или космический корабль должны противопоставить огромной гравитации Гаргантюа центробежную силу сравнимой величины. Это означает, что необходимо двигаться с очень большой скоростью — скоростью, близкой к световой. В Кип-версии космолет «Эндюранс», ожидающий на орбите в 10 радиусов Гаргантюа возвращения экипажа с планеты Миллер, движется со скоростью в одну треть скорости света ( $c/3$ ). А планета Миллер движется со скоростью, составляющей 55 процентов от скорости света ( $0,55c$ ).

В Кип-версии «Рейнджер» может добраться от орбиты ожидания до планеты Миллер (рис. 7.1), если снизит скорость с трети световой до значительно меньшей, чтобы гравитация Гаргантюа потянула его к дыре. Когда же он окажется рядом с планетой, «Рейнджер» должен развернуться в направлении от Гаргантюа. А поскольку, падая к дыре, он наберет слишком большую скорость, ему нужно будет замедлиться примерно на  $c/4$ , чтобы его скорость сравнялась со скоростью планеты ( $0,55c$ ) и он мог с ней сблизиться.



Рис. 7.1. Полет «Рейнджера» к планете Миллер в Кип-версии

Каким же способом Купер, пилот «Рейнджера», может добиться таких резких изменений скорости?

Требуемый перепад скорости примерно равен  $c/3$ , или 100 000 километров в секунду (в секунду, не в час!).

Однако самые мощные из ракет, созданных на сегодняшний день людьми, способны развить скорость лишь до 15 километров в секунду, то есть в семь тысяч раз меньше, чем нужно. В фильме космолет «Эндюранс» долетает от Земли до Сатурна за два года, средняя его скорость при этом равна 20 километрам в секунду, то есть в пять тысяч раз меньше, чем нужно. Думаю, самый быстрый космический корабль, который люди смогут построить в XXI веке, будет развивать скорость до 300 километров в секунду. Это потребует масштабных научно-исследовательских работ по созданию термоядерного ракетного двигателя, и все же его скорость будет в три тысячи раз меньше, чем нужно.

К счастью, природа все же дарит нам возможность совершать огромные скачки скоростей, такие как  $c/3$ : гравитационные пращи вблизи черных дыр гораздо меньших размеров, чем Гаргантюа.

### Через гравитационную пращу к планете Миллер

Звезды и небольшие черные дыры собираются вокруг гигантских черных дыр вроде Гаргантюа (подробнее об этом — в следующем параграфе). В Кип-версии Купер и его команда разузнали обо всех небольших черных дырах, вращающихся вокруг Гаргантюа. Они нашли среди них дыру, положение которой подходит, чтобы ее гравитация отклонила «Рейнджер» от его почти круговой орбиты и направила его к планете Миллер (рис. 7.2). Такой маневр называется «гравитационной пращой», и NASA успела не раз применить его в Солнечной системе; правда, использовалась не черная дыра, а планетарная гравитация (об этом — в конце главы).

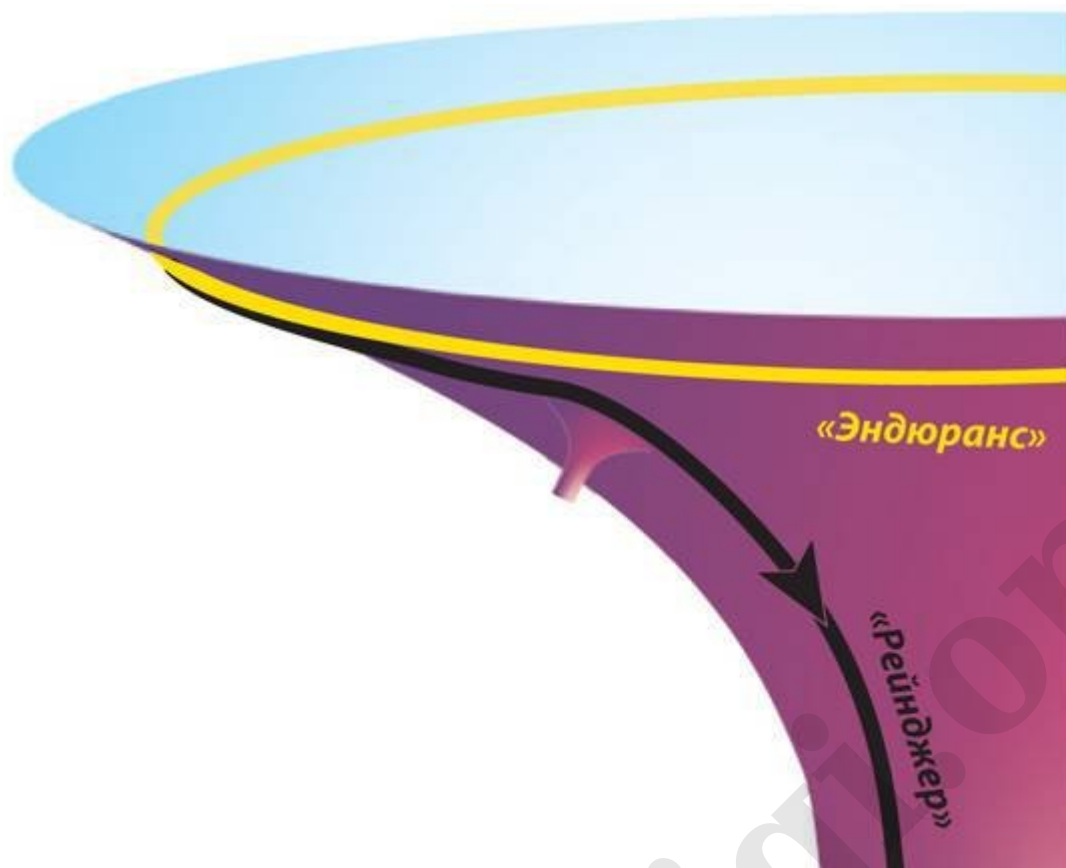


Рис. 7.2. «Рейнджер» выполняет гравитационный маневр вокруг небольшой черной дыры, которая отклоняет его к планете Миллер

Этот маневр не показан и не обсуждается в «Интерстеллар», но позже Купер говорит: «Смотри, я могу обогнуть эту нейтронную звезду, чтобы притормозить». Торможение необходимо, поскольку, падая с орбиты «Эндюранс» к орбите планеты Миллер под действием огромного гравитационного притяжения Гаргантюа, «Рейнджер» набирает слишком большую скорость — он движется на  $c/4$  быстрее, чем планета Миллер. На рис. 7.3 нейтронная звезда, находящаяся «слева» от планеты Миллер, меняет курс «Рейнджера» и замедляет его движение, что позволяет ему аккуратно приблизиться к планете.

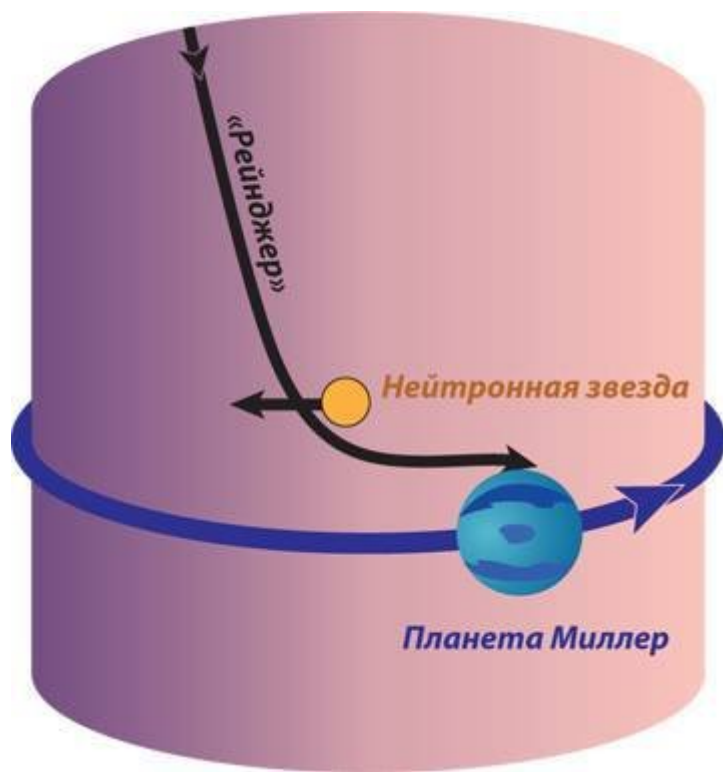


Рис. 7.3. Гравитационная праща вокруг нейтронной звезды позволяет совершить посадку на планету

Однако в гравитационной праше есть своя опасность — это приливные силы (см. главу 4).

Чтобы резко сбросить скорость аж на  $c/4$  или  $c/3$ , «Рейнджер» должен подлететь достаточно близко к небольшой черной дыре и неизбежно попадет под воздействие ее мощной гравитации. Если для маневра использовать нейтронную звезду или черную дыру с радиусом менее 10 000 километров, вблизи нее «Рейнджер» и его экипаж разорвет на части приливными силами (см. главу 4). Чтобы «Рейнджер» с экипажем уцелел, черная дыра должна быть не менее 10 000 километров в диаметре (приблизительно размер Земли).

Такие черные дыры встречаются в природе. Их называют черными дырами средней массы, и несмотря на их внушительный размер по сравнению с Гаргантюа, они совсем крохотные; они меньше ее в десять тысяч раз.

Поэтому Кристоферу Нолану стоило использовать для замедления «Рейнджера» не нейтронную звезду, а черную дыру средней массы. Мы обсуждали это с Крисом, когда он переписывал сценарий Джоны, и все же Крис выбрал нейтронную звезду. Почему? Потому что боялся, что зритель запутается, если в фильме будет более одной черной дыры. Одна черная дыра, одна червоточина да еще нейтронная звезда и прочие сложные для понимания явления, и все это в динамичном двухчасовом фильме, — Крис считал, что этого уже более чем достаточно. Уяснив, что для навигации вблизи Гаргантюа необходимы мощные гравитационные пращи, Крис вложил упоминание о такой праше в уста Купера, хоть и ценой уменьшения научной достоверности (нейтронная звезда вместо черной дыры).

#### Черные дыры средней массы в ядрах галактик

Черная дыра средней массы весит примерно как десять тысяч Солнц. Это в десять тысяч раз меньше, чем масса Гаргантюа, но в тысячу раз больше, чем вес обычных черных дыр, — как раз то, что нужно Куперу для маневров.

Считается, что порой дыры средней массы возникают в центре плотных скоплений звезд, которые называют шаровыми звездными скоплениями. И некоторые из них с немалой долей вероятности попадают в ядра галактик, туда, где располагаются гигантские черные дыры.

Возьмем для примера галактику Андромеды, ближайшую к нашей крупную галактику (рис. 7.4), в ядре которой скрывается черная дыра размером с Гаргантюа, массой в 100 миллионов Солнц. К таким гигантским черным дырам стягивается огромное количество звезд — до тысячи звезд на кубический световой год. Когда дыра средней массы проходит через столь насыщенную область, она силой своей гравитации смещает звезды, оставляя за собой след повышенной звездной плотности. Данный след, в свою очередь, притягивает дыру средней массы, замедляя ее движение; этот процесс называется динамическим трением. По мере того как дыра средней массы замедляется, ее затягивает ближе к гигантской черной дыре. Таким образом, природа (в Кип-версии) может «снабдить» Купера черной дырой средней массы, необходимой для его гравитационных маневров<sup>39</sup>.

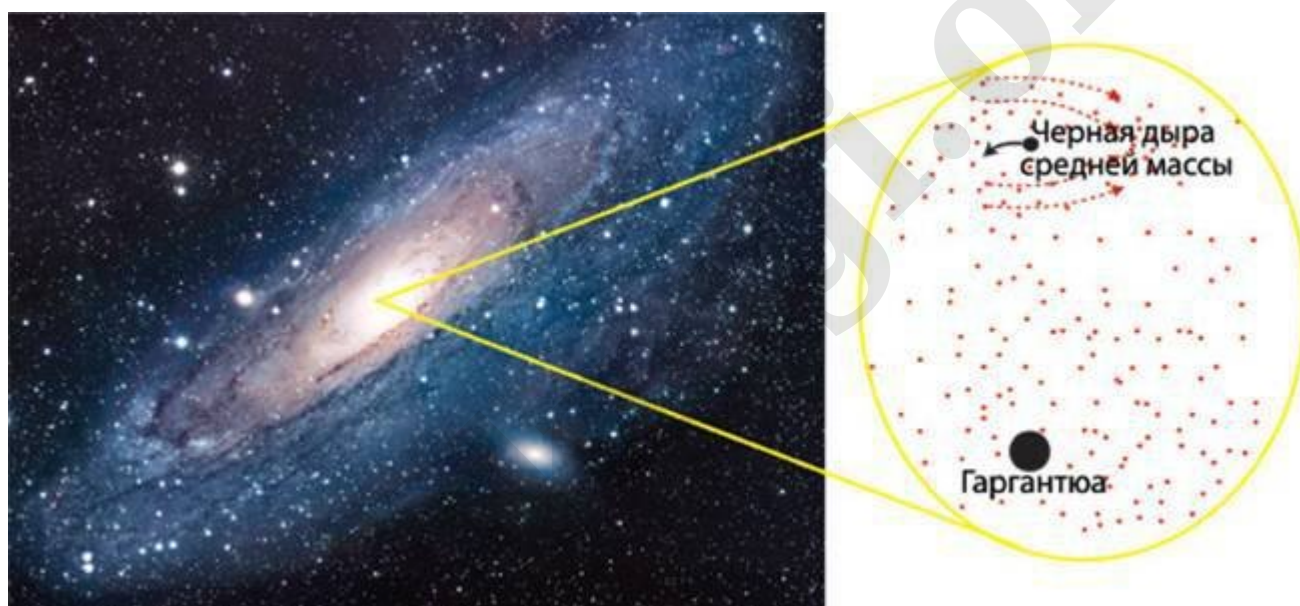


Рис. 7.4. Слева: галактика Андромеды, в ядре которой скрывается черная дыра размером с Гаргантюа. Справа: динамическое трение, благодаря которому дыра средней массы постепенно замедляется и притягивается все ближе к гигантской черной дыре

#### Орбитальная навигация сверхразвитых цивилизаций

Орбиты планет и комет в Солнечной системе имеют вид, близкий к правильным эллипсам (рис. 7.5). Это прямо следует из законов гравитации Ньютона.

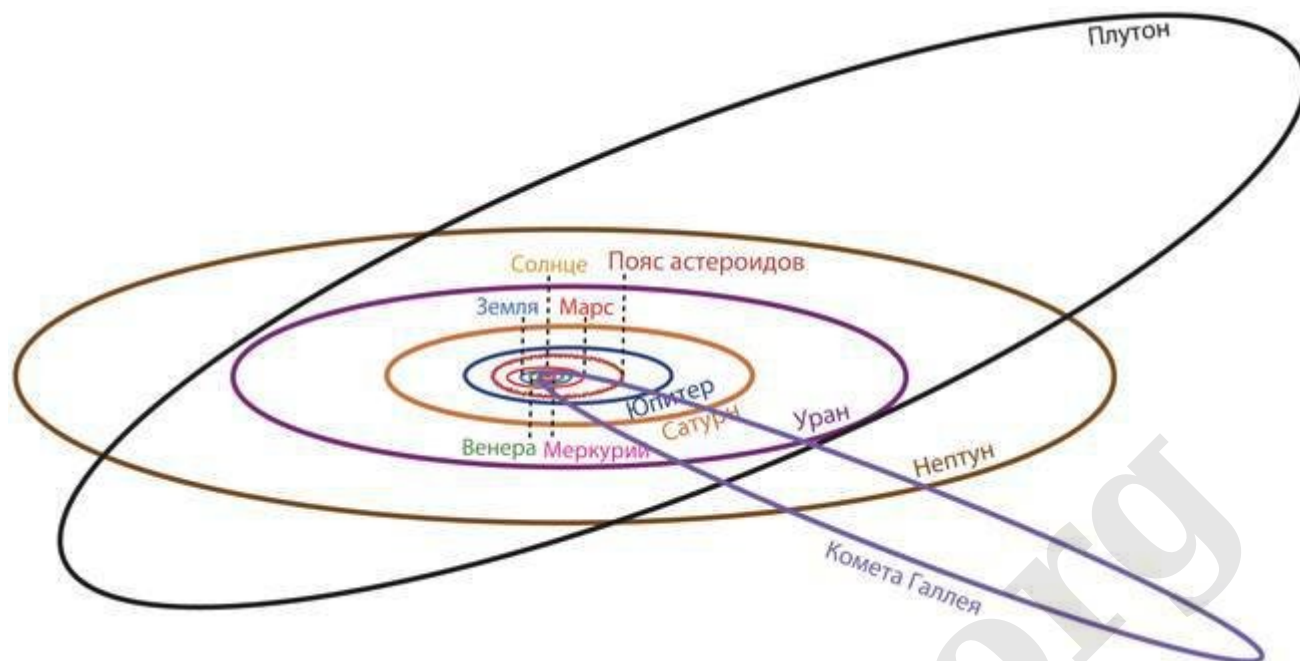


Рис. 7.5. Орбиты планет, Плутона и кометы Галлея в Солнечной системе — эллиптические

Однако вблизи вращающейся гигантской черной дыры вроде Гаргантюа, где правят релятивистские законы Эйнштейна, орбиты гораздо сложнее; пример см. на рис. 7.6. В такой орбите есть витки различной продолжительности — от нескольких часов до нескольких дней, так что она очертит узор вроде показанного на рис. 7.6 в течение приблизительно года. За несколько лет орбита (допустим, космолета) пройдет практически через все координаты, какие только можно пожелать, однако скорость полета может оказаться неподходящей для конкретных целей. Чтобы, например, опуститься на планету или совершить стыковку, необходимо будет изменить скорость, для чего понадобится гравитационная праща.

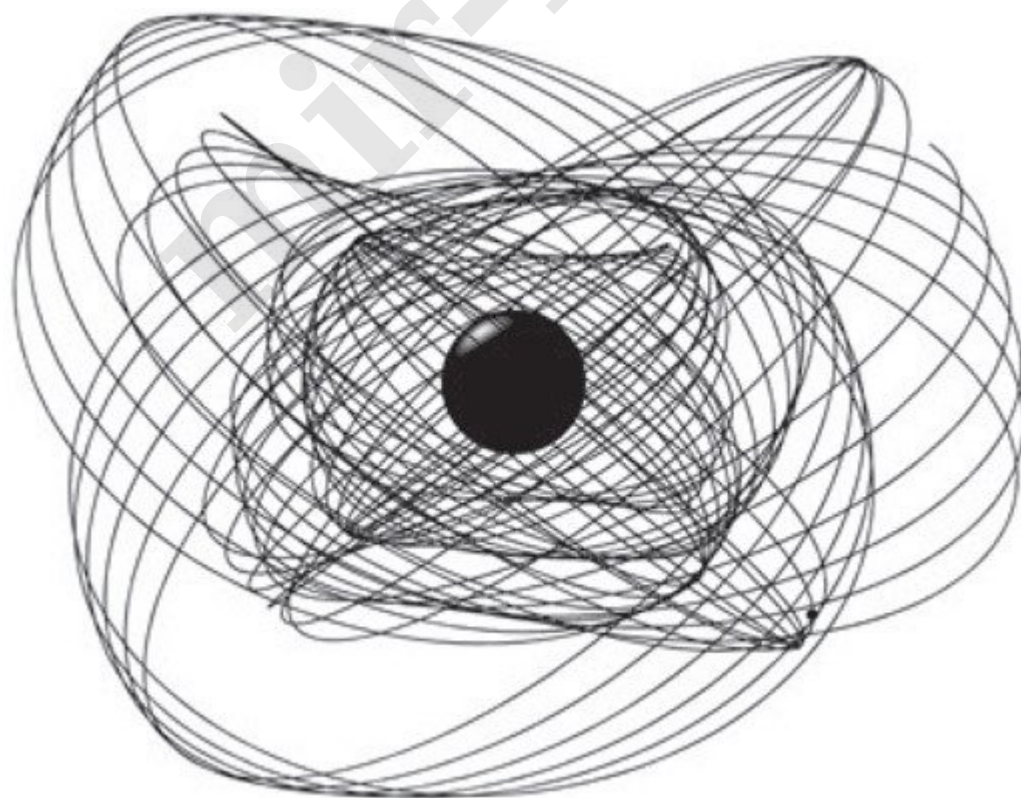


Рис. 7.6. Орбита космолета или планеты вокруг гигантской быстровращающейся черной дыры, такой как Гаргантюа (Модель Стива Драско.)

Попробуйте вообразить, как сверхразвитые цивилизации могли бы использовать такие орбиты. Интерпретируя события фильма, я для простоты, как правило, избегаю подобных траекторий в пользу круговых экваториальных орбит (таких, как орбита ожидания «Эндюранс», орбита планеты Миллер и критическая орбита) и максимально элементарных траекторий перехода «Эндюранс» с одной круговой орбиты на другую. Исключение — орбита планеты Манн, о чем мы поговорим в главе 19.

#### Гравитационные маневры NASA в Солнечной системе

Давайте вернемся из мира вероятностей (то есть всего, что допускают законы физики) к реальным, без изысков, гравитационным пращам в уютных пределах нашей Солнечной системы (по состоянию на 2014 год).

Возможно, вы слышали о космолете NASA «Кассини» (рис. 7.7). Он был запущен с Земли 15 октября 1997 года и мог взять на борт слишком мало топлива, чтобы достичь своей цели — планеты Сатурн. С проблемой нехватки горючего удалось справиться за счет гравитационных пращей: праща вокруг Венеры 26 апреля 1998 года и вторая праща вокруг Венеры 24 июля 1999 года, праща вокруг Земли 18 августа 1999 года и вокруг Юпитера 30 декабря 2000 года. Прибыв к Сатурну 1 июля 2004 года, «Кассини» снизил скорость за счет пращи вокруг ближайшего спутника Сатурна, Ио.

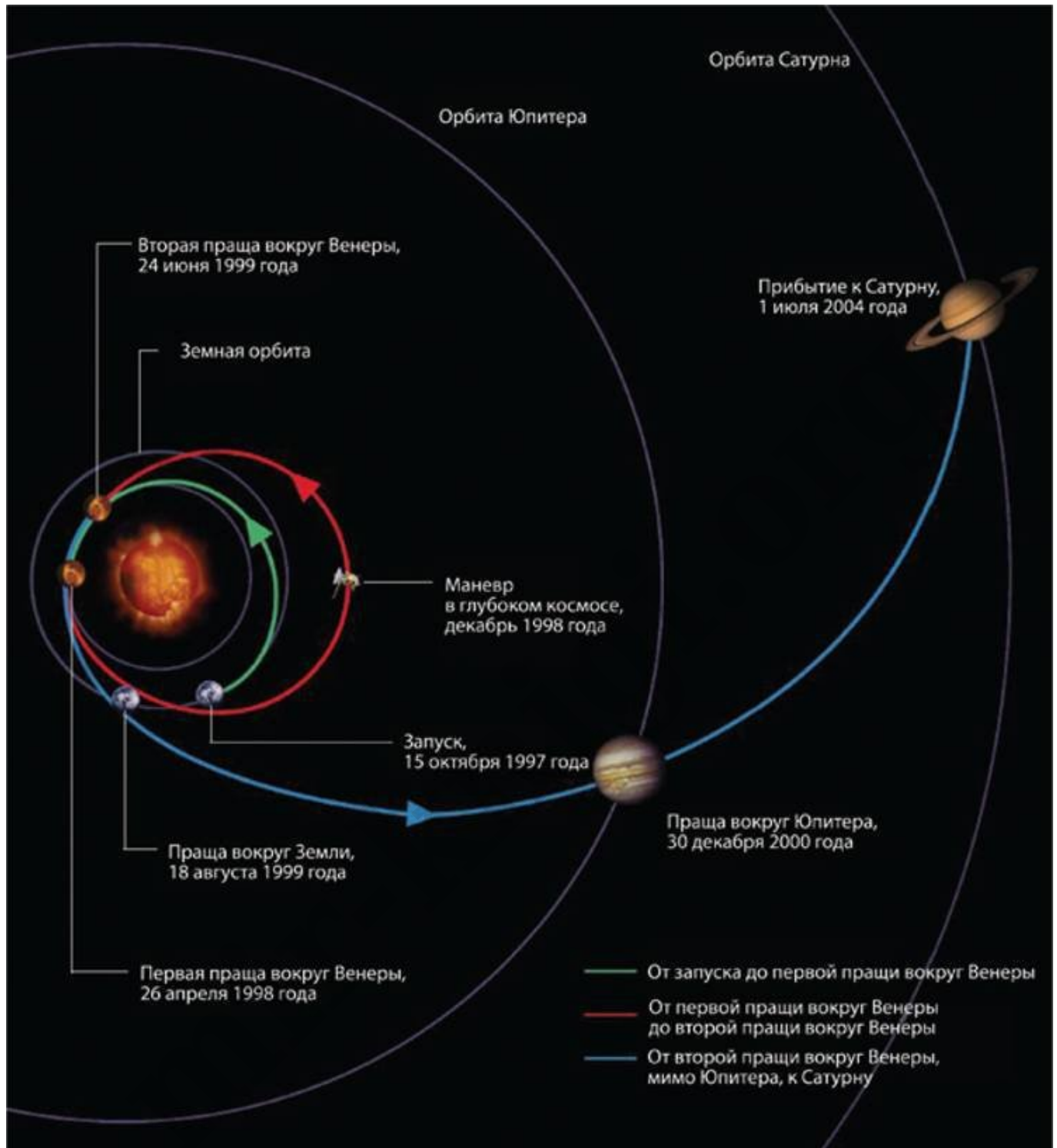


Рис. 7.7. Траектория полета «Кассини» от Земли до Сатурна

Ни одна из этих прассей не похожа на те, о которых я говорил раньше. Вместо того чтобы резко отклонить траекторию космолета, Венера, Земля, Юпитер и Ио влияют на нее весьма умеренно. Почему?

Их гравитация слишком слаба, чтобы вызвать сильные отклонения траектории. В случае Венеры, Земли и Ио отклонения действительно были предсказуемо малы. Гравитация Юпитера значительно сильнее, но большое отклонение развернуло бы «Кассини» в неверном направлении; чтобы достичь Сатурна, ему требовалось отклониться совсем немного.

Несмотря на такие слабые отклонения, прассы помогли «Кассини» в достаточной мере, чтобы

скомпенсировать недостаток топлива. В каждом из случаев (кроме Ио) «Кассини» огибал отклоняющие его планеты под таким углом, чтобы планетарная гравитация оптимальным образом толкала «Кассини» вперед, увеличивая его скорость. «Эндюранс» в «Интерстеллар» выполняет похожую пращу вокруг Марса.

«Кассини» исследовал Сатурн и его спутники в течение последних 10 лет, отправляя на Землю потрясающие фотографии и данные — сущий клад для ученых. Вы можете узнать об этом больше по адресу [nasa.gov/mission\\_pages/cassini/main/](http://nasa.gov/mission_pages/cassini/main/).

В отличие от слабых гравитационных пращей в Солнечной системе мощная гравитация Гаргантюа способна захватывать объекты, движущиеся даже со сверхвысокими скоростями, и отбрасывать их в разных направлениях. Даже лучи света. Из-за этого и возникает гравитационное линзирование, столь существенное для изображения Гаргантюа в фильме.



### Внешний вид Гаргантюа



Черные дыры не светятся, поэтому увидеть Гаргантюа можно лишь постольку, поскольку черная дыра влияет на излучения от других объектов. В «Интерстеллар» эти объекты — аккреционный диск (см. главу 9) и галактика, в которой находится Гаргантюа, включая туманности и насыщенное звездное поле.

Гаргантюа отбрасывает черную тень на звездное поле, а также отклоняет идущие от звезд лучи света, искажая для камеры узор звездного неба. Это искажение — эффект гравитационного линзирования, который мы уже обсуждали в главе 3.

На рис. 8.1 показана быстровращающаяся черная дыра (пусть это будет Гаргантюа) на фоне звездного поля, как бы она выглядела при наблюдении из экваториальной плоскости. Полностью черная область — это тень Гаргантюа. С наружной стороны тени можно увидеть очень тонкое кольцо звездного света, «огненное кольцо», яркость которого я усилил, чтобы граница тени стала заметнее. Снаружи огненного кольца видна плотная звездная россыпь с узором в виде концентрических оболочек, узором гравитационного линзирования.



Рис. 8.1. Звездное поле вокруг быстровращающейся черной дыры, подобной Гаргантюа, искаженное эффектом гравитационного линзирования. При наблюдении издалека угловой диаметр тени в радианах  $40$  составит девять радиусов Гаргантюа, деленных на расстояние от наблюдателя до Гаргантюа (Компьютерная модель студии Double Negative, специально для этой книги.)

Когда камера вращается вокруг Гаргантюа, смена ракурса в сочетании с гравитационным линзированием порождает постоянные метаморфозы светового узора. Одни звезды будто бы стремительно летят, другие — медленно плывут, а третьи — стоят на месте: посмотрите видеоролик на сайте [Interstellar.withgoogle.com](http://Interstellar.withgoogle.com).

В этой главе я расскажу обо всех составляющих внешнего вида Гаргантюа. Начну я с тени и огненного кольца, а затем поведаю о том, каким образом были получены изображения черной дыры в «Интерстеллар».

Напомню, что считаю Гаргантюа быстровращающейся черной дырой, поскольку это необходимо, чтобы вызвать огромные расхождения по времени с Землей, с которыми сталкивается экипаж «Эндюранс» (см. главу 6). Однако в случае дыры, которая вращалась бы действительно быстро, зрителей могло бы смутить уплощение в левой части тени Гаргантюа (рис. 8.1), а также необычное перетекание звездного поля и вид аккреционного диска, поэтому для отображения Гаргантюа в фильме Кристофер Нолан и Пол Франклин решили взять скорость вращения в 60 процентов от максимальной, см. последний параграф главы 9.

Внимание, содержание следующих трех параграфов может потребовать тщательного осмысления; однако не беспокойтесь: вы можете пропустить их без ущерба для понимания остальных частей книги!

Тень и огненное кольцо

Огненная оболочка (см. главу 6) — одна из главных черт во внешнем виде Гаргантюа. На рис.

8.2 огненная оболочка — это фиолетовая область, окружающая Гаргантюа, в которой временно заключены лучи света (фотонные орбиты), вроде той, что показана в правом верхнем углу<sup>41</sup>.

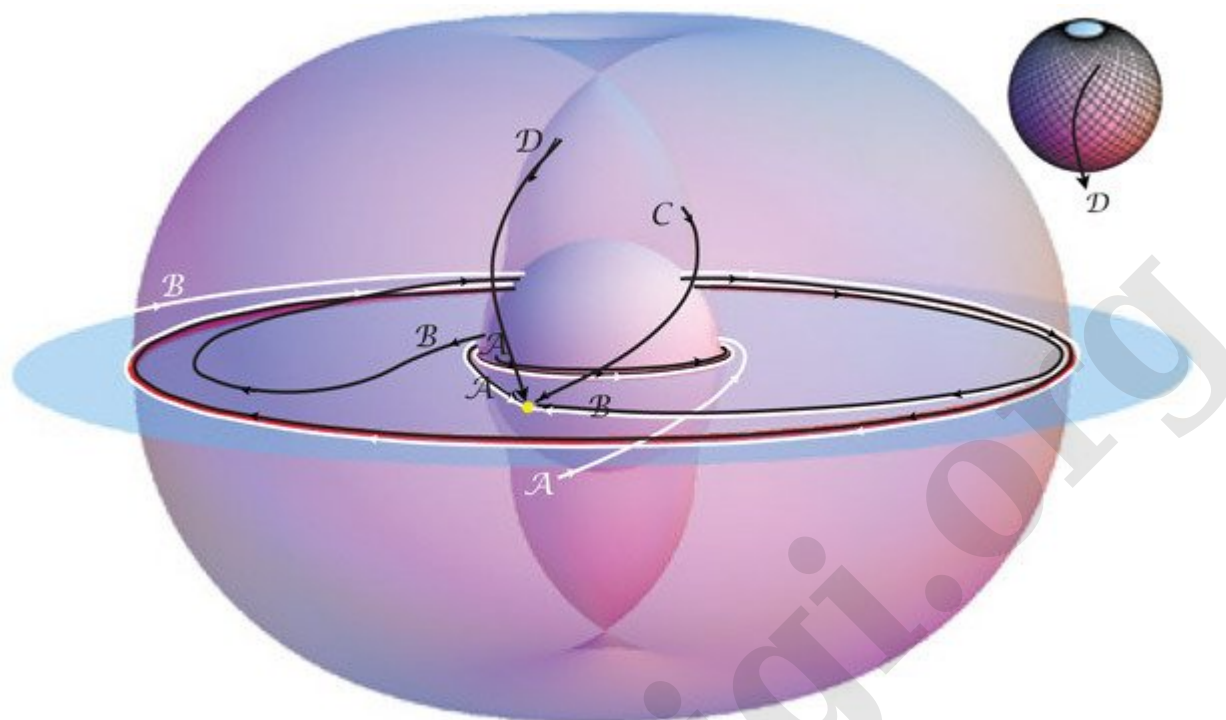


Рис. 8.2. Гаргантюа (центральный сфероид), ее экваториальная плоскость (изображена голубым), ее огненная оболочка (изображена фиолетовым); черными и белыми линиями обозначены лучи света, формирующие для наблюдателя край тени и тонкое кольцо вокруг нее

Предположим, что вы находитесь в позиции, которая отмечена желтой точкой. Белые лучи *A* и *B* и другие им подобные формируют для вас изображение огненного кольца, тогда как черные лучи *A* и *B* формируют края тени. Пусть, например, белый луч *A* идет от далекой звезды, доходит до Гаргантюа и застревает во внутреннем слое огненной оболочки в экваториальной плоскости Гаргантюа, где летает кругами, движимый пространственным вихрем, а затем вырывается наружу и, наконец, доходит до ваших глаз. Черный луч, также помеченный буквой *A*, идет наружу от горизонта событий *Гаргантюа*, оказывается заключен все в том же внутреннем слое огненной оболочки, где летает кругами, а затем вырывается наружу и достигает ваших глаз вместе с белым лучом *A*. Белый луч сформирует для вас часть изображения тонкого кольца, а черный — часть края тени. Огненная оболочка сводит эти лучи вместе и направляет к вашим глазам.

Для белого и черного лучей *B* все аналогично, с той разницей, что они заключены во внешнем слое огненной оболочки и движутся по часовой стрелке (сопротивляясь пространственному вихрю), тогда как лучи *A* заключены во внутреннем слое оболочки и движутся против часовой стрелки (втягиваемые пространственным вихрем). Тень на рис. 8.1 приплюснутая с левого края и округлая с правого из-за лучей *A* (левый край), исходящих из внутреннего, очень близкого к горизонту слоя огненной оболочки, и лучей *B* (правый край), исходящих из значительно более удаленного внешнего слоя оболочки.

Черные лучи *C* и *D* на рис. 8.2 берут начало от горизонта, двигаются наружу и застревают на неэкваториальных орбитах огненной оболочки. Затем они вырываются с этих орбит и достигают ваших глаз, формируя те участки края тени, которые находятся вне экваториальной плоскости. Орбита «временного заключения» для луча *D* показана в правом верхнем углу.

Белые лучи *C* и *D* (на рисунке не показаны) исходят от далеких звезд, застревают там же, где черные лучи *C* и *D*, а затем с ними вместе достигают ваших глаз, формируя ту часть огненного кольца, которая находится рядом с краем тени.

### Линзирование невращающейся черной дыры

Чтобы разобраться с узором из гравитационно линзированных звезд вокруг тени, а также с мнимым движением звезд при перемещении камеры, рассмотрим сначала невращающуюся черную дыру и лучи света, исходящие от единственной звезды (рис. 8.3). Два луча света исходят от звезды и достигают камеры. Каждый из них стремится следовать по наиболее прямому пути, однако из-за того, что черная дыра искривляет пространство, луч искривляется тоже.

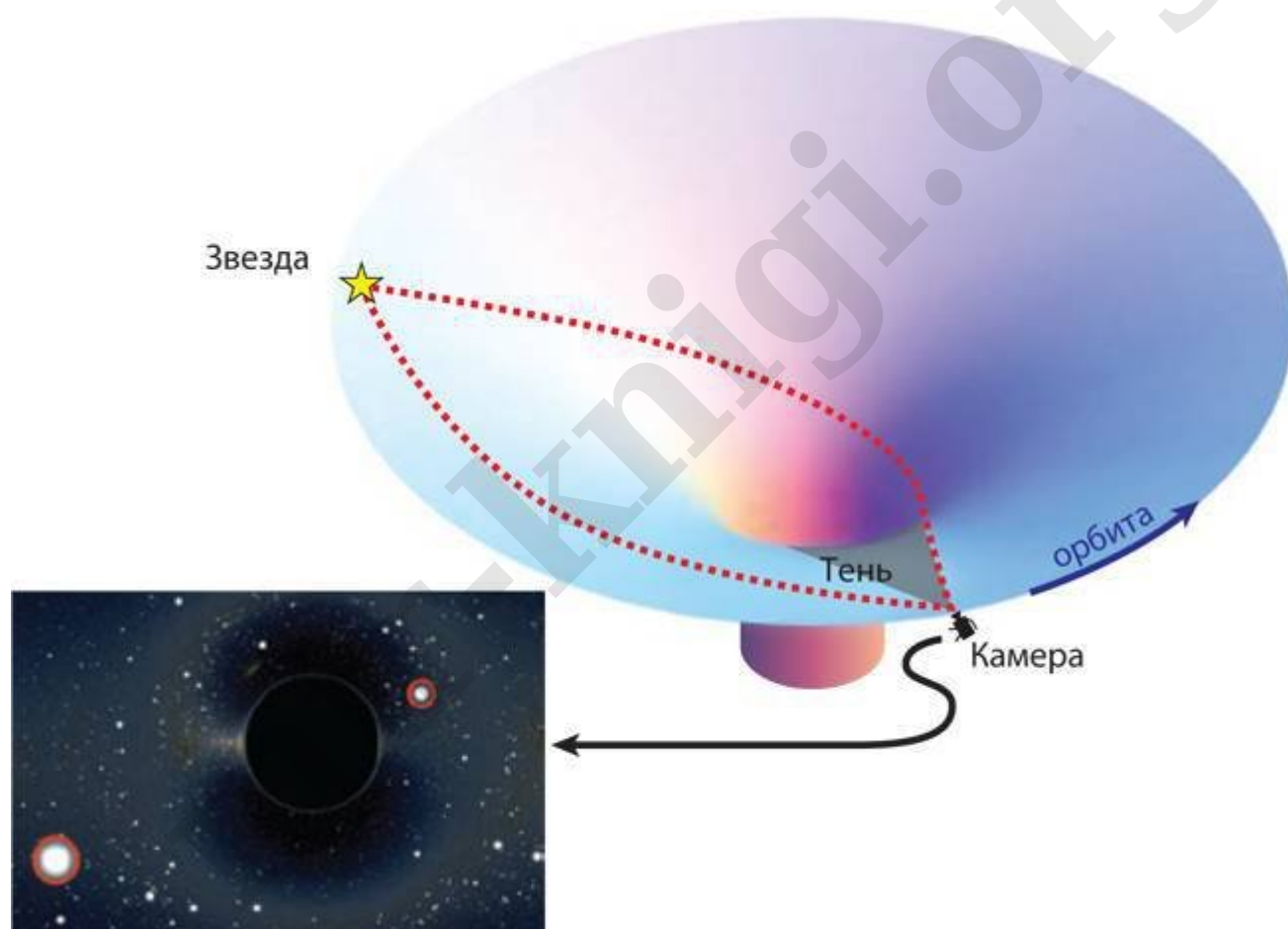


Рис. 8.3. Сверху: искривленное пространство вокруг невращающейся черной дыры (взгляд из балка) и два луча, идущих от звезды к камере через искривленное пространство. Снизу: гравитационно линзированный звездный узор, как он виден камере (Моделирование Алена Риасуэло.)

Один искривленный луч движется к камере, огибая дыру с левой стороны, другой — с правой. Каждый из лучей формирует в камере свое отдельное изображение звезды. Эти два изображения показаны на врезке рис. 8.3. Я обвел их красными кружками, чтобы выделить среди прочих видимых камере звезд. Обратите внимание, что правое изображение гораздо ближе к тени черной дыры, чем левое. Причина в том, что путь соответствующего луча проходил ближе к горизонту событий.

Все прочие звезды также видны дважды, по разные стороны от тени. Можете найти парные изображения? Что же касается самой тени черной дыры, она является совокупностью направлений, с которых лучи попасть в камеру не могут — см. серую треугольную область с надписью «Тень». Все лучи, «желающие остаться в тени», захватывает и поглощает черная дыра.

По мере того как камера движется слева направо по своей орбите (рис. 8.3), видимый камере звездный узор меняется, как показано на рис. 8.4.

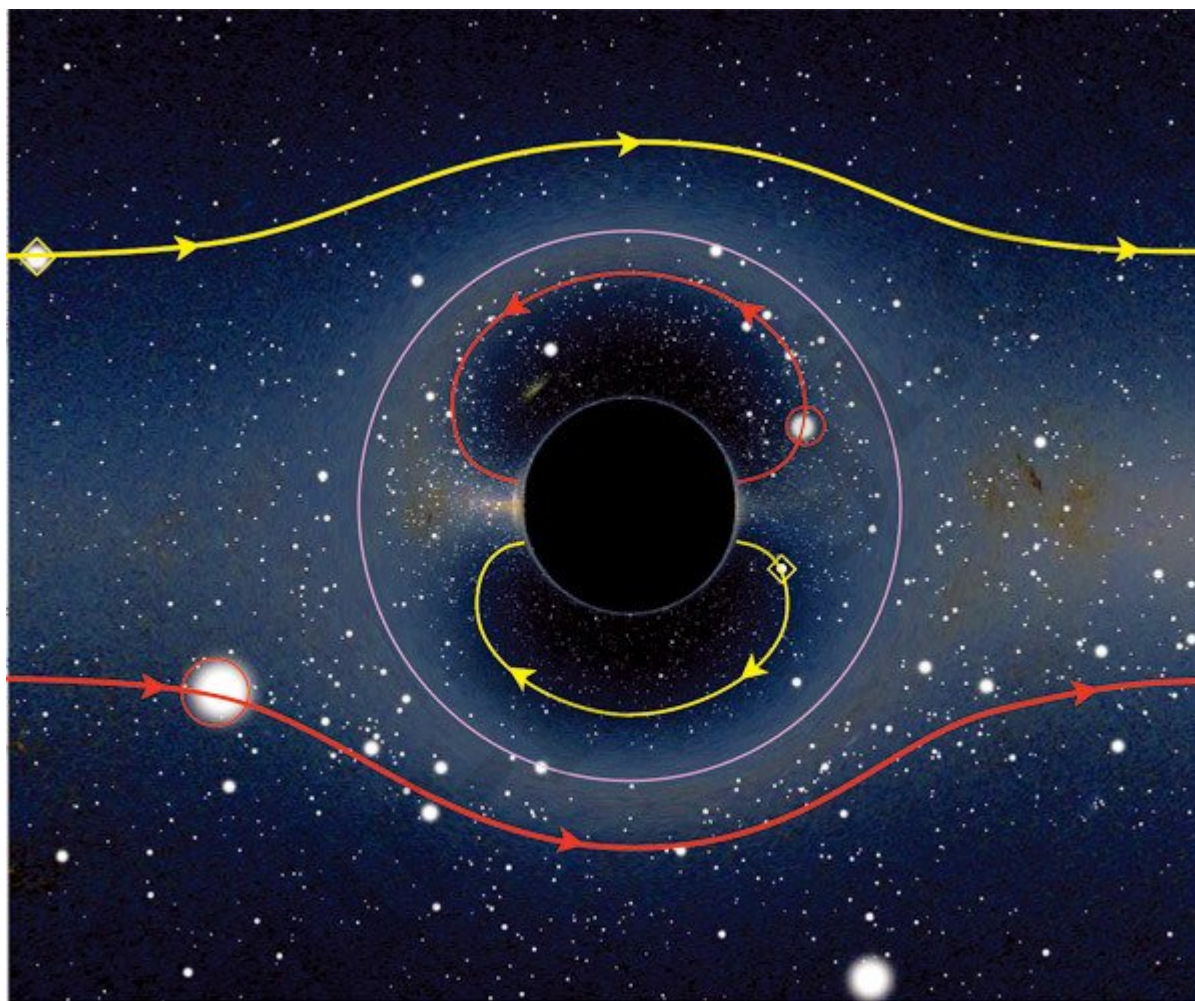


Рис. 8.4. Меняющийся звездный узор, видимый камере при ее движении слева направо по орбите, показанной на рис. 8.3 (Моделирование Алена Риасуэло, см. [www2.iap.fr/users/riazuelo/-interstellar](http://www2.iap.fr/users/riazuelo/-interstellar).)

На этом рисунке выделены две звезды. Одна обведена красным (та же звезда, что и на рис. 8.3). Другая находится внутри желтого ромбика. Можно видеть по два изображения каждой звезды: одно — снаружи фиолетовой окружности, другое — внутри нее. Эта фиолетовая окружность называется кольцом Эйнштейна.

По мере того как камера движется направо, изображения звезд движутся вдоль желтой и красной линий.

Те изображения звезд, что находятся за пределами кольца Эйнштейна (назовем их первичными), двигаются ожидаемым образом: постепенно слева направо, однако, приближаясь к черной дыре, они отклоняются от нее. (Можете ответить, почему они отклоняются от дыры, а

не к ней?)

Изображения же из второй пары, лежащие внутри кольца Эйнштейна, движутся весьма странным образом: они будто выходят из-за правого края тени, движутся наружу, но, не выходя за кольцо Эйнштейна, плавно поворачиваются к левой стороне тени и приходят к левому ее краю.

Понять, что здесь происходит, можно, обратившись к схеме на рис. 8.3. Правый луч проходит вблизи черной дыры, и правое изображение звезды оказывается рядом с тенью. Раньше, когда камера находилась левее, правый луч проходил еще ближе к дыре (чтобы сильнее изогнуться и достичь камеры), поэтому тогда правое изображение было еще ближе к тени. Левый же луч, напротив, раньше проходил довольно далеко от тени, оставаясь почти прямым, и формировал изображение звезды на отдалении от дыры.

А теперь, если вам все понятно, подумайте, как изображения, показанные на рис. 8.4, станут перемещаться далее.

### Линзирование быстровращающейся черной дыры — Гаргантюа

Пространственный вихрь, образующийся из-за огромной скорости вращения Гаргантюа, влияет на гравитационное линзирование. Звездный узор на рис. 8.1 (Гаргантюа) заметно отличается от изображенного на рис. 8.4 (невращающаяся черная дыра), а эффект при движении камеры отличается еще больше.

Для Гаргантюа (рис. 8.5) при движении камеры проявляются два кольца Эйнштейна, обозначенных на рисунке фиолетовыми замкнутыми кривыми. Снаружи внешнего кольца звёзды «движутся» вправо (в частности, вдоль двух пар красных кривых), так же как и для невращающейся черной дыры на рис. 8.4. Однако у заднего края тени пространственный вихрь сжимает поток движения в узкие полосы, которые довольно резко изгибаются у экватора, и ускоряет его. Также вихрь образует в потоке «водовороты» (замкнутые красные кривые).

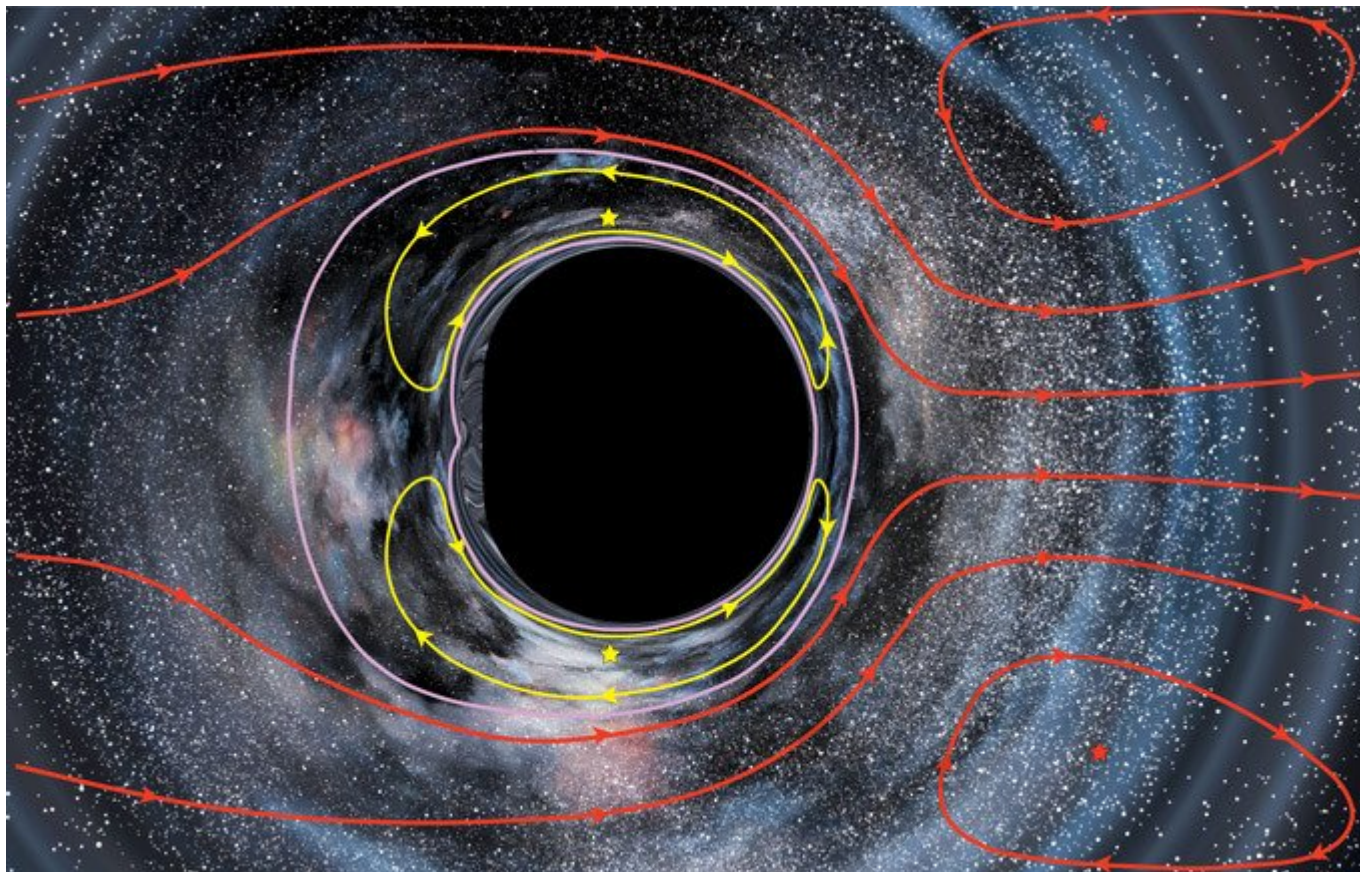


Рис. 8.5. Эффект перетекания звезд рядом с быстровращающейся черной дырой, подобной Гаргантюа, «вид через камеру». В этой модели студии Double Negative дыра вращается со скоростью в 99,9 процента от предельной, а камера движется по круговой экваториальной орбите, окружность которой в шесть раз превышает окружность горизонта. См. видеоролик на странице [Interstellar.withgoogle.com](http://Interstellar.withgoogle.com)

Вторичное изображение каждой звезды появляется в области между кольцами Эйнштейна, и циркулирует вдоль замкнутой кривой (пример — две желтые кривые), двигаясь при этом в направлении, противоположном красным потокам снаружи внешнего кольца.

Здесь есть две особенные звезды, для которых гравитационное линзирование не действует. Одна из них расположена прямо над северным полюсом Гаргантюа, другая — прямо под южным. Это аналоги Полярной звезды, которая расположена прямо над Северным полюсом Земли. Я нарисовал пятиконечные звездочки рядом с первичными (красная звездочка) и вторичными (желтая) изображениями полярных звезд Гаргантюа. С Земли кажется, будто все звезды циркулируют вокруг Полярной звезды — поскольку мы вращаемся вместе с Землей. Аналогично по мере движения камеры по орбите вокруг дыры все первичные изображения звезд рядом с Гаргантюа циркулируют вокруг первичных изображений полярных звезд, но пути их движения (например, две замкнутые красные кривые) сильно искажены пространственным вихрем и гравитационным линзированием. Тем же образом вторичные изображения звезд циркулируют вокруг вторичных изображений полярных звезд (например, вдоль двух желтых кривых).

Почему в случае невращающейся черной дыры (рис. 8.4) кажется, что вторичные изображения звезд возникают из-за тени черной дыры, огибают ее и возвращаются обратно к тени, а не циркулируют вдоль замкнутых кривых, как в случае Гаргантюа (рис. 8.5)? На самом деле они все же циркулируют вдоль замкнутых кривых, но внутренний край этих кривых находится так близко к краю тени, что его невозможно увидеть. Вращение Гаргантюа завихряет

пространство, и этот вихрь сдвигает внутреннее кольцо Эйнштейна наружу, проявляя его и показывая полный путь движения вторичных изображений (желтые кривые на рис. 8.5).

В пределах внутреннего кольца Эйнштейна движения узора звезд еще более сложны. Звезды в этой области являются изображениями третьего и более высоких порядков для всех звезд во Вселенной — звезд, первичные изображения которых видны снаружи внешнего кольца Эйнштейна, а вторичные — между внутренним и внешним кольцами.

На рис. 8.6 выделено пять участков экваториальной плоскости Гаргантюа, сама Гаргантюа показана черным, орбита камеры — фиолетовым пунктиром, а луч света — красным. Этот луч формирует для камеры изображение звезды, на которую указывает синяя стрелка. Камера движется вокруг Гаргантюа против часовой стрелки.

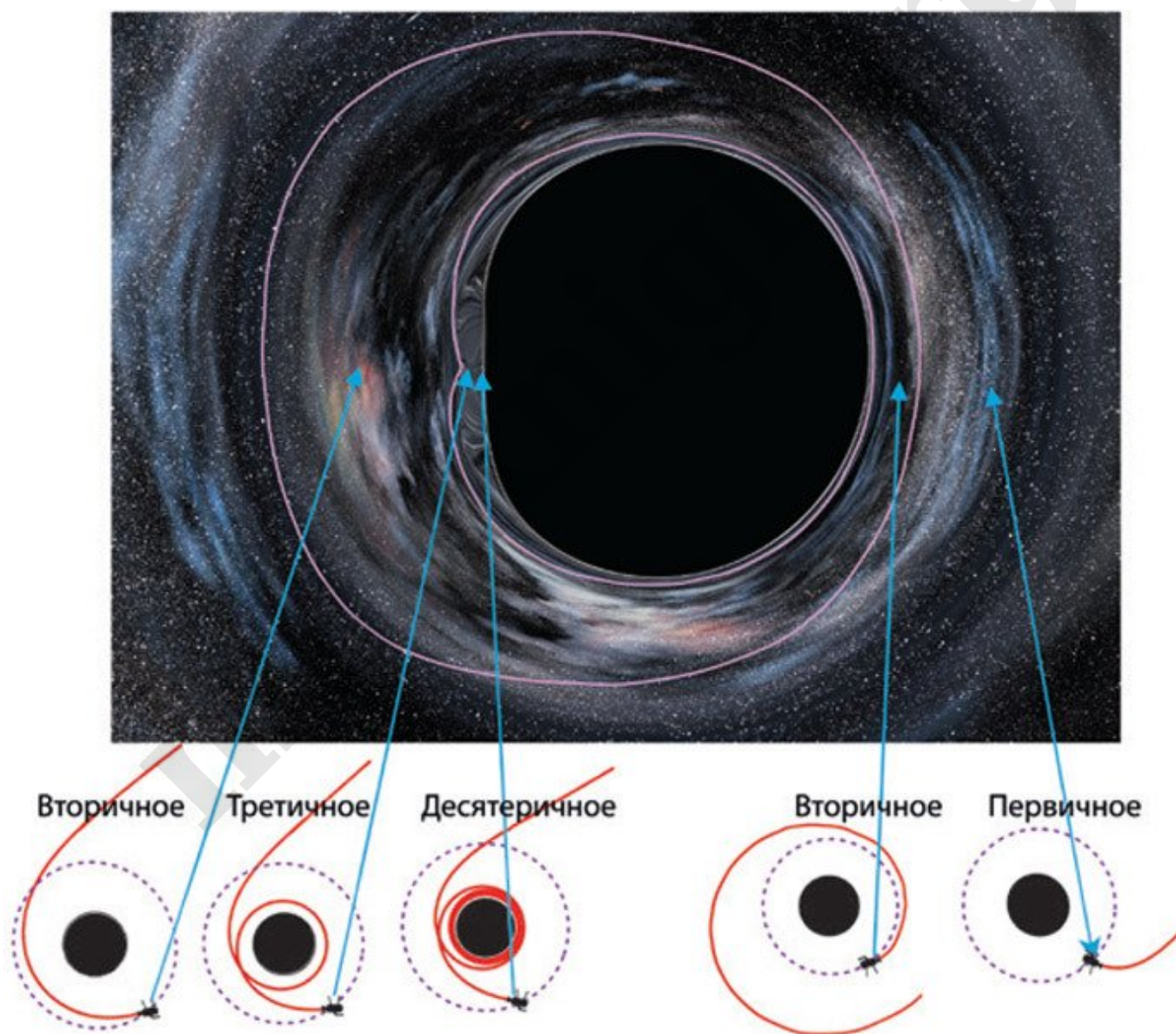


Рис. 8.6. Лучи света, формирующие изображения звезд, на которые указывают синие стрелки (Модель Double Negative, та же, что на рис. 8.1 и 8.5.)

Последовательно изучая эти рисунки, можно многое понять о гравитационном линзировании. Имейте в виду: действительное направление к звезде — вверх и вправо (внешние концы красных лучей). Стрелка, идущая от значка камеры, указывает на изображение звезды.

Десятеричное изображение находится очень близко к левому краю тени, а правое вторичное изображение — рядом с правым краем; сравнивая направления камеры для этих изображений, можно увидеть, что тень покрывает примерно 150 градусов направления вверх, несмотря на то что действительное направление от камеры к центру Гаргантюа — влево и вверх. Эффект гравитационного линзирования сдвинул тень относительно действительного направления к Гаргантюа.

Визуальные эффекты: черная дыра и червоточина

Крис хотел, чтобы Гаргантюа выглядела так же, как выглядит вблизи настоящая черная дыра, поэтому он попросил Пола проконсультироваться со мной. Пол свел меня с командой по созданию визуальных эффектов из студии Double Negative (Лондон).

Я стал тесно сотрудничать с Оливером Джеймсом, главным программистом. Мы с Оливером общались по телефону и по «Скайпу», обменивались электронными письмами и файлами, а также встречались лично в Лос-Анджелесе и его лондонском офисе. У Оливера высшее образование в области оптики, ядерной физики и теории относительности, так что мы с ним общались на одном языке.

Некоторые из моих коллег-физиков уже делали компьютерные модели, показывающие, что будет видно при полете вокруг черной дыры и даже при падении в нее. Мастерами в этом слынут Ален Риасуэло из Парижского астрофизического института и Эндрю Гамильтон из Колорадского университета в Боулдере. Эндрю — автор фильмов о черных дырах, которые показывают в планетариях по всему миру, а Ален занимался моделированием черных дыр, которые вращаются очень-очень быстро, как Гаргантюа.

Сначала я планировал вывести Оливера на Алена и Эндрю, чтобы они помогли ему с нужными данными. Несколько дней я мучился сомнениями и в конце концов передумал.

В течение полувековой карьеры в физике я вложил много усилий в собственные исследования, а также в исследования студентов, которых я курировал. Почему бы мне для разнообразия не сделать что-то просто ради интереса, хоть другие и делали это до меня? Вот я и занялся моделированием сам, о чем ничуть не пожалел. Заодно, к моему удивлению, это привело к новым (пусть и не самым значительным) открытиям.

С помощью эйнштейновской теории относительности, а также опираясь на работы других ученых (в особенности Брендона Картера из Лаборатории Вселенной и теорий о ней (Парижская обсерватория) и Жанны Левин из Колумбийского университета), я вывел необходимые Оливеру уравнения. Эти уравнения описывали траектории лучей света, исходящих из некоего источника, например далекой звезды, проникающих через искривленные время и пространство Гаргантюа и достигающих камеры. Затем на основе этих траекторий мои уравнения рассчитывали изображение для камеры, учитывая не только источники света и искривленные пространство и время Гаргантюа, но также и движение камеры вокруг черной дыры.

Сформулировав уравнения, я закодировал их с помощью удобной компьютерной системы Mathematica. Я сравнил изображения, созданные моим программным кодом, с изображениями Алена Риасуэло и с радостью убедился, что в целом они совпадают. Затем я отослал плоды моих трудов Оливеру в Лондон.

Мой код был очень медленным и производил расчеты с низкой точностью. В задачу Оливера входило создать на основе моих уравнений программу, которая генерировала бы IMAX-

изображения сверхвысокого качества, подходящие для фильма.

Мы с Оливером занимались этим поэтапно. Начали с невращающейся черной дыры и неподвижной камеры. Затем добавили вращение дыры. Затем — движение камеры: сначала по круговой орбите, потом с падением в черную дыру. И наконец мы занялись камерой вблизи червоточины.

Тут Оливер меня оговорил: чтобы смоделировать некоторые тонкие эффекты, кроме уравнений, описывающих траектории лучей света, ему также нужны уравнения, описывающие, как меняется размер и форма поперечного сечения луча света во время его путешествия вблизи черной дыры.

Я примерно представлял, как это сделать, но уравнения были ужасающе сложны, и было боязно ошибиться. Тогда я, изучив техническую литературу, обнаружил, что в 1977 году Серж Пинелт и Роб Рёдер из Торонтского университета вывели нужные уравнения почти в той форме, что требовалась мне. После трехнедельного сражения с собственной тупостью я окончательно довел их уравнения до нужного вида, закодировал их в Mathematica и отослал Оливеру. И наконец-то его программа смогла генерировать высококачественные изображения для фильма.

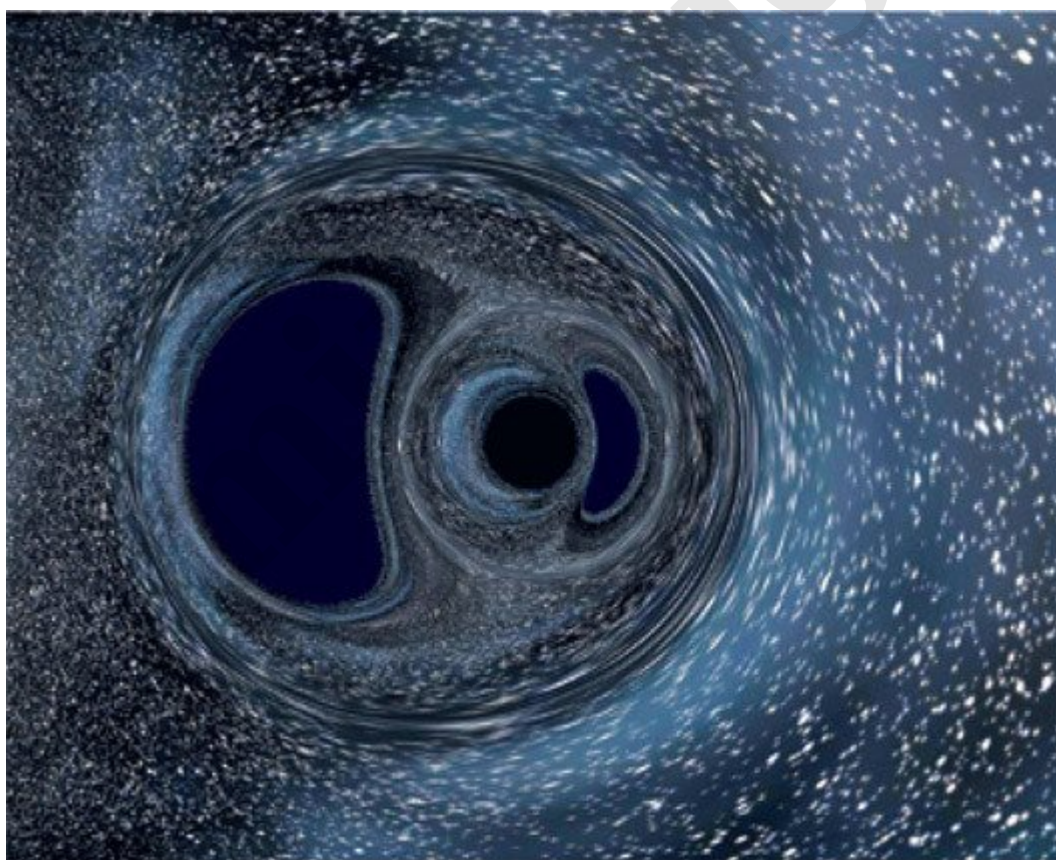
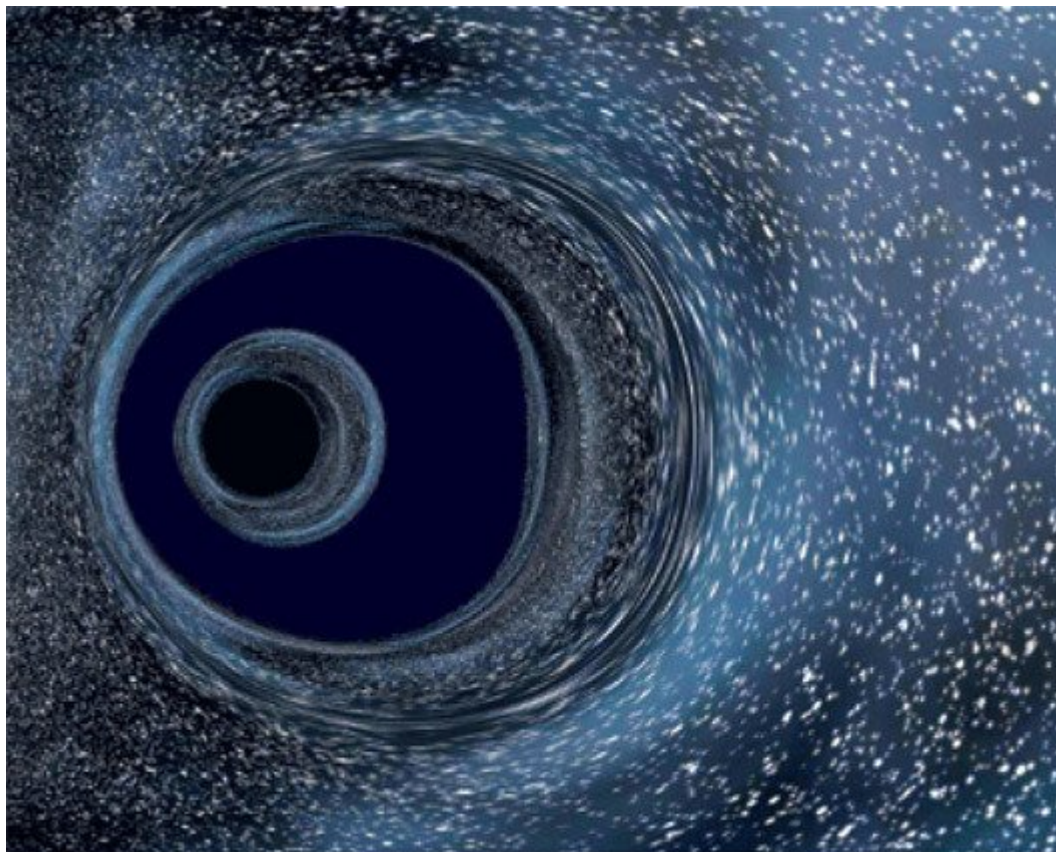
Для студии Double Negative программа Оливера была лишь отправной точкой. Оливер передал ее команде художников под руководством Эжени фон Танзелманн. Для начала они добавили аккреционный диск (см. главу 9) и фоновые изображения галактики с ее звездами и туманностями, которые Гаргантюа должна была искажать. Затем — «Эндюранс», «Рейнджеры», посадочные модули и «ручки настройки» камеры (скорость и направление ее движения, направление объектива, широта обзора и т. д.). И наконец из всего этого создали те потрясающие кадры, которые можно теперь увидеть в фильме. Подробнее об этом см. в главе 9.

Тем временем я корпел над присланными мне Оливером и Эжени видеороликами высокого разрешения, пытаюсь разобраться, почему эти изображения выглядят так, а не иначе и почему звезды движутся именно таким образом. Для меня эти ролики были вроде экспериментальных данных: я увидел вещи, до которых сам, без компьютерного моделирования, никогда бы не додумался, например явления, о которых я рассказывал в предыдущем параграфе (рис. 8.5 и 8.6). Есть планы опубликовать одну или несколько научных статей по поводу этих находок.

Вид с корабля, совершающего гравитационную пращу

Хоть Крис и решил не показывать гравитационные пращи в «Интерстеллар», мне было интересно, как бы их увидел Купер, пилотируя «Рейнджер» к планете Миллер. Поэтому я, используя мои уравнения и систему Mathematica, получил изображения для камеры, которая вела бы запись с «Рейнджера». (Мои возможности скромнее, чем у Оливера и Эжени, поэтому и изображения получились гораздо менее детализированными.)

На рис. 8.7 показана последовательность кадров, которые сняла бы камера «Рейнджера», совершающего маневр вокруг черной дыры средней массы перед посадкой на планету Миллер. Этот маневр — по сути, гравитационная праща с рис. 7.2.



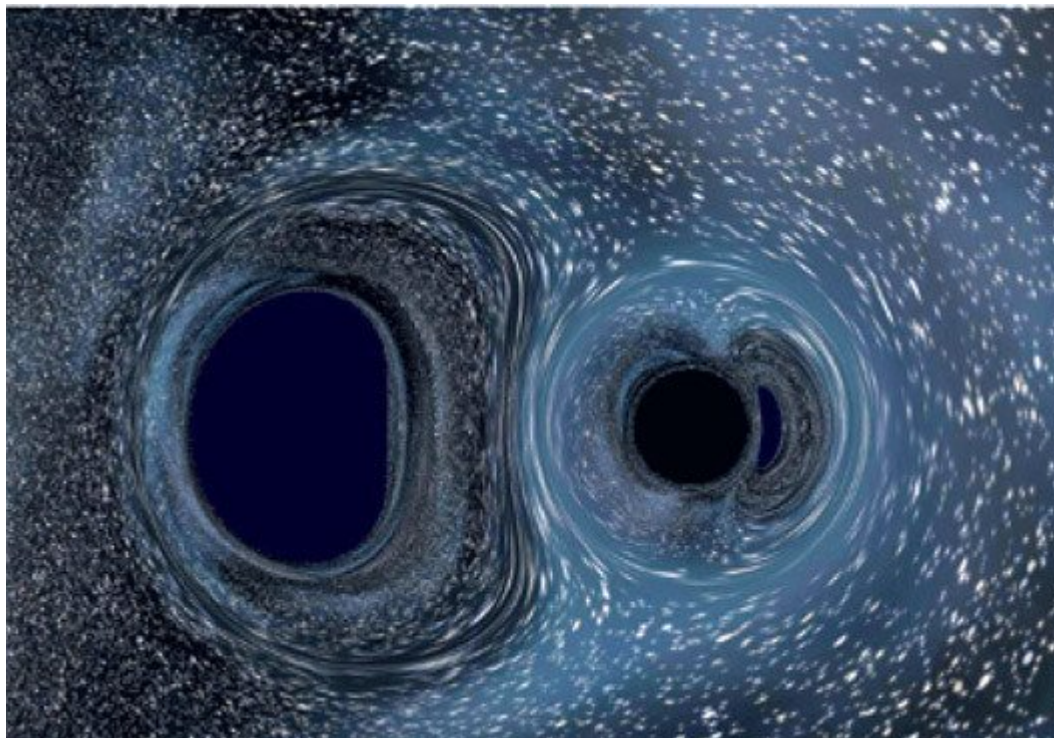


Рис. 8.7. Гравитационная праща вокруг дыры средней массы, на фоне Гаргантюа, вид с «Рейнджера» (Моя модель.)

На верхнем изображении Гаргантюа находится на заднем плане относительно проходящей перед ней черной дыры средней массы, которая захватывает лучи света, идущие от далеких звезд в направлении Гаргантюа, разворачивает их вокруг себя и выбрасывает в сторону камеры. Отсюда кольцо звездного света, которое окружает тень дыры средней массы. Хоть эта дыра и в тысячу раз меньше Гаргантюа, она находится гораздо ближе к «Рейнджеру» и потому не выглядит маленькой.

По мере того как дыра средней массы движется направо (с точки зрения камеры «Рейнджера», выполняющего гравитационный маневр), она загоразживает первичное изображение тени Гаргантюа и проецирует перед собой вторичное изображение этой тени. Эти два изображения полностью аналогичны первичным и вторичным изображениям звезд при гравитационном линзировании, но теперь это тень Гаргантюа, которую линзирует дыра средней массы. На нижнем кадре вторичная тень уменьшается в размере, поскольку дыра средней массы движется дальше. На этот момент гравитационная праща практически завершена, и находящаяся на борту «Рейнджера» камера направлена к планете Миллер.

Жаль, но увидеть такое можно, лишь находясь поблизости от обеих черных дыр, а не с огромного удаления, на котором находится Земля. Для земных астрономов самые впечатляющие проявления черных дыр — это вырывающиеся из них джеты, а также свет от дисков горячего газа, движущегося по орбитам вокруг дыр. Об этом мы сейчас и поговорим.



Диски и джеты



## Квазары

Большая часть объектов, наблюдаемых с помощью радиотелескопа, — это огромные — гораздо больше любой звезды — газовые облака. Однако в начале шестидесятых астрономы обнаружили при радиообзоре несколько крохотных объектов. Их назвали квазарами (от quasi-stellar radio sources — «похожие на звезды источники радиоизлучения»).

В 1962 году Мартен Шмидт, астроном из Калтеха, пользуясь самым большим в мире оптическим телескопом на горе Паломар, зафиксировал свет, исходящий от квазара под названием 3C273. Это напоминало яркую звезду, из которой бьет едва заметная струя — джет (рис. 9.1). Нечто из ряда вон!

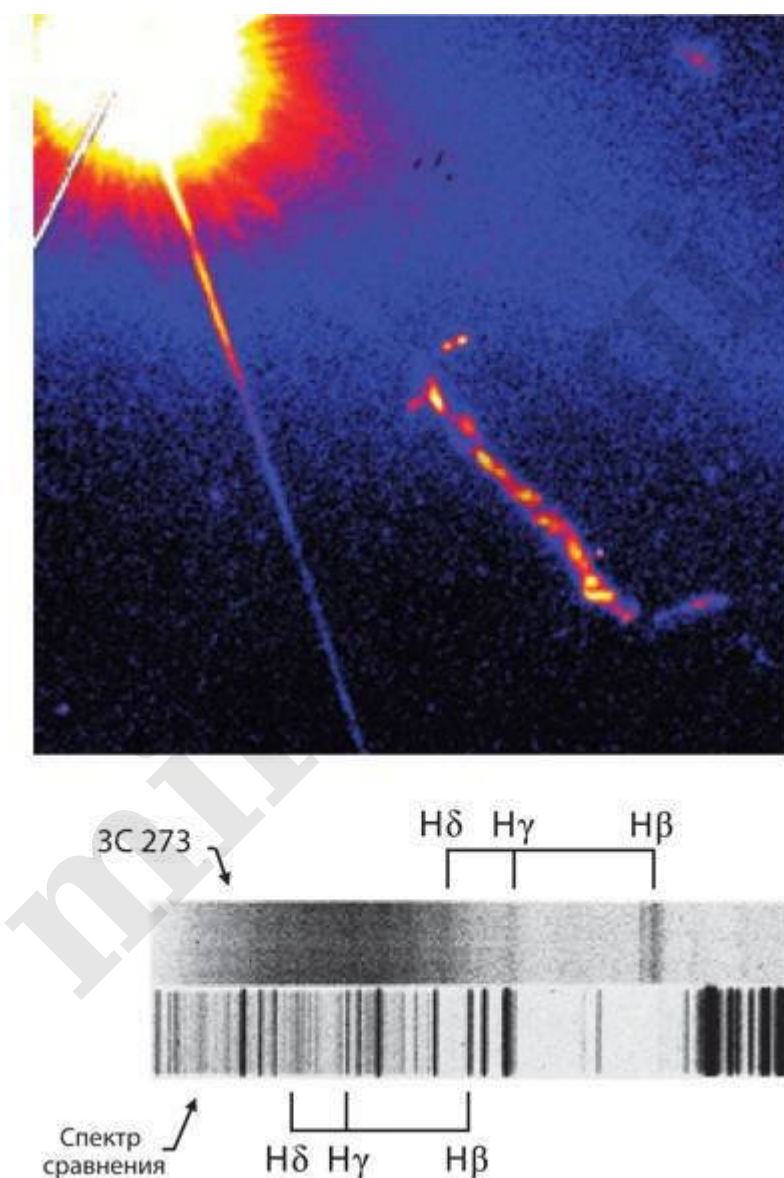


Рис. 9.1. Сверху: фотография 3C273, сделанная космическим телескопом «Хаббл» NASA. Звезда (в левом верхнем углу) выглядит такой большой из-за переэкспонирования, сделанного, чтобы был виден джет (в нижнем правом углу). В действительности же она столь мала, что определить ее размер невозможно. Снизу: спектральные линии излучения от 3C273 (верхняя полоса) в сравнении со спектральными линиями водорода, полученными в земной лаборатории. Три спектральные линии квазара соответствуют трем линиям водорода (H $\delta$ , H $\gamma$  и H $\beta$ ), но с длиной волн, увеличенной на 16 процентов (Это негатив: черные спектральные линии

на самом деле белые.)

Когда Шмидт разложил излучение 3C273 на цветовые составляющие (примерно так, как это происходит, если пропустить луч света через призму), он увидел набор спектральных линий (снизу на рис. 9.1). На первый взгляд они были совершенно не похожи на какие-либо спектральные линии, виденные им прежде. Однако в феврале 1963 года, спустя несколько месяцев исследований, Шмидт понял, что эти линии казались ему необычными лишь потому, что длина их волн на 16 процентов превышала норму. Это называется эффектом Доплера, а возник он из-за движения квазара в направлении от Земли со скоростью, составляющей 16 процентов от скорости света — приблизительно  $c/6$ . Но чем вызвано такое сверхбыстрое перемещение? Самым вменяемым объяснением, пришедшим Шмидту на ум, было расширение Вселенной.

По мере расширения Вселенной далекие от Земли объекты движутся прочь от нас с большими скоростями, а объекты, которые находятся ближе, движутся медленнее. Огромная скорость 3C273 (одна шестая от скорости света) означает, что 3C273 удален от Земли на два миллиарда световых лет; это самый далекий из зафиксированных на тот момент объектов. На основе этого расстояния и яркости квазара Шмидт сделал вывод, что 3C273 отдает энергии в четыре триллиона раз больше, чем Солнце, и в сто раз больше, чем самые яркие галактики!

Период колебаний этой удивительной энергии был совсем невелик — около одного месяца, а значит, большая часть света должна была исходить от объекта столь маленького, что луч света мог бы пройти от одного его конца до другого за один месяц, а это гораздо меньше, чем расстояние от Земли до ближайшей к нам звезды — проксимы Центавра. Причем периоды колебаний некоторых других почти столь же мощных квазаров составляли лишь несколько часов, и, стало быть, размером они были немногим больше Солнечной системы. Энергия в сотню раз выше энергии излучения яркой галактики, исходящая из области размером с Солнечную систему, — это было что-то исключительное!

## Черные дыры и аккреционные диски

Но как из столь маленькой области может исходить так много энергии? Если взять фундаментальные силы природы, то вариантов три: химическая энергия, ядерная энергия или гравитационная энергия.

Химическая энергия — это энергия, которая высвобождается, когда молекулы соединяются, образуя молекулы другого вида. Пример — горение бензина, в процессе которого молекулы бензина соединяются с молекулами атмосферного кислорода, результатом чего является вода, диоксид углерода и много тепла. Однако энергии, которая при этом выделяется, для нашего случая очень-очень мало.

Ядерная энергия высвобождается, когда ядра атомов соединяются, образуя новые ядра. Примеры — атомная бомба, водородная бомба, а также горение ядерного топлива внутри звезды. Хотя энергии при этом может выделяться гораздо больше, чем при химических реакциях (представьте себе разницу между канистрой бензина и ядерной бомбой), астрофизики не видят возможностей, позволяющих квазарам подпитываться ядерной энергией, и этот вариант тоже отпадает. Остается только гравитационная энергия, та самая, которая помогала «Эндюранс» совершать маневры вблизи Гаргантюа. В случае «Эндюранс» эта энергия использовалась во время гравитационной пращи вокруг черной дыры средней массы (см. главу 7). Ключевой момент здесь — сильная гравитация черной дыры. Соответственно, мощность квазара тоже должна обеспечиваться черной дырой.

В течение нескольких лет астрофизики пытались разобраться, как это возможно. Ответ был найден в 1969 году Дональдом Линден-Беллом из Гринвичской королевской обсерватории в Англии. Квазар, как предположил Линден-Белл, — это гигантская черная дыра, окруженная диском раскаленного газа (аккреционным диском), который пронизан магнитным полем (рис. 9.2).

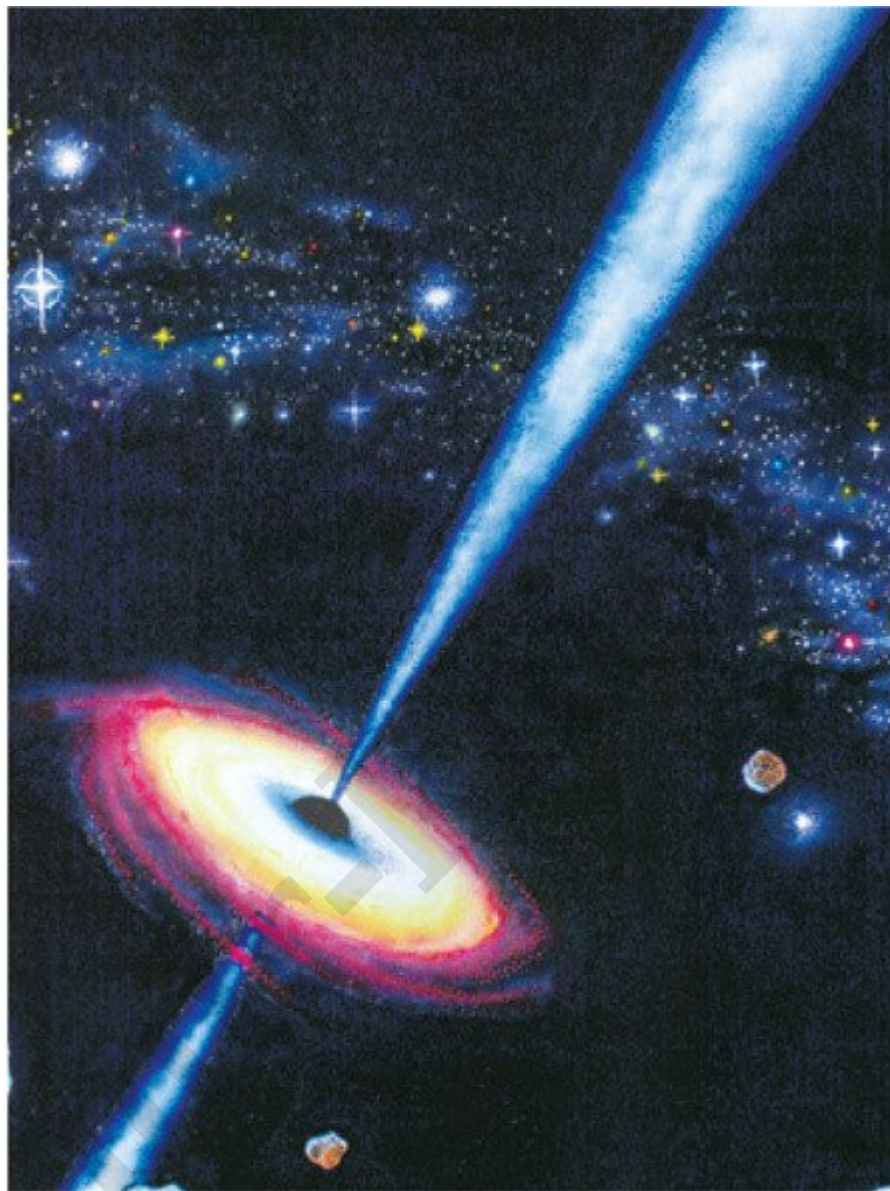


Рис. 9.2. Художественное изображение аккреционного диска черной дыры, а также джетов, образующихся около ее полюсов (Работа Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

Горячий газ во Вселенной практически всегда пронизан магнитными полями (см. главу 2). Эти поля «привязаны» к газу: газ и магнитные поля перемещаются вместе, одновременно.

Когда в аккреционном диске действует магнитное поле, оно выступает катализатором преобразования гравитационной энергии в тепло и затем в свет. Поле порождает сверхвысокое трение<sup>42</sup>, которое замедляет круговое движение газа, что уменьшает центробежную силу, противостоящую гравитационному притяжению, — вследствие чего газ перемещается внутрь, к черной дыре. По мере этого перемещения гравитация дыры ускоряет орбитальное движение газа в большей степени, чем его замедляет трение. Иначе говоря, гравитационная энергия

переходит в кинетическую энергию (энергию движения). Затем магнитное трение преобразует половину этой новой энергии в тепло и свет, и все идет по новой.

Итак, энергия (посредством магнитного трения и газа аккреционного диска) порождается гравитацией черной дыры.

Собственно, как заключил Линден-Белл, от раскаленного газа аккреционного диска и исходит наблюдаемое астрономами яркое свечение квазаров. Более того, магнитное поле ускоряет часть электронов в газе до высокой энергии, и эти электроны движутся по спиральным траекториям вокруг линий магнитного поля, излучая наблюдаемые радиоволны квазара.

Линден-Белл выяснил и обосновал детали этих процессов, комбинируя ньютоновские, релятивистские и квантовые законы физики. Он объяснил все наблюдаемые астрономами свойства квазаров, за исключением джетов. Его научная статья, излагающая эти умозаключения и расчеты [Lynden-Bell 1969], — один из величайших трудов в истории астрофизики.

**Джеты: извлечение энергии из завихрения пространства**

В течение нескольких следующих лет наблюдавшие за квазарами астрономы обнаружили еще больше джетов и тщательно их изучили. Вскоре стало ясно, что это потоки горячего намагниченного газа, которые исходят из самого квазара (от черной дыры и ее аккреционного диска), см. рис. 9.2. Причем сила выброса джетов чрезвычайно велика: газ в них движется с околосветовой скоростью. На выходе из квазара, а также когда он сталкивается вдали от квазара с веществом, газ испускает энергию в виде света, радиоволн, рентгеновских лучей и даже гамма-лучей. Порой джеты так же ярки, как сам квазар, — в сотню раз ярче самых ярких галактик.

Почти десятилетие астрофизики бились над вопросом, что питает джеты, делая их такими быстрыми, тонкими и прямыми. Были предложены разные версии; наиболее интересную из них выдвинули в 1977 году Роджер Блэндфорд из Кембриджского университета в Англии и его студент Роман Знаек, которые отталкивались от исследований оксфордского физика Роджера Пенроуза<sup>43</sup>, см. рис 9.3.

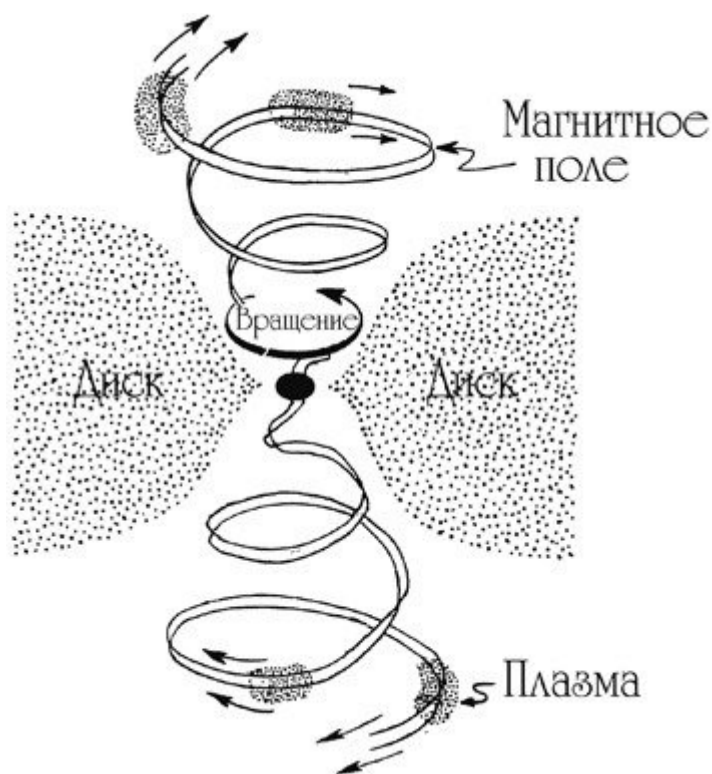


Рис. 9.3. Механизм образования джетов Блэндфорда — Знаека (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

Их версия такова. Газ из аккреционного диска постепенно по спирали опускается в черную дыру. В момент пересечения горизонта событий каждая частица газа оставляет свою часть магнитного поля у горизонта, и окружающий диск удерживает ее там. Черная дыра, вращаясь, вовлекает пространство в вихревое движение (рис. 5.4 и 5.5), что, в свою очередь, вызывает завихрение магнитного поля (рис. 9.3). Магнитное поле, завихряясь, создает мощное электрическое поле (похожим образом оно генерируется в динамо-машине на гидроэлектростанции). Электрическое поле вместе с завихряющимся магнитным полем выбрасывают плазму (горячий ионизированный газ) вверх и вниз со скоростью, близкой к световой, — так и возникают два джета. Направления выброса джетов стабилизируются (если рассматривать усредненные показатели по годам) вращением черной дыры, которое стабильно благодаря гироскопическому эффекту.

У квазара 3C273 только один джет обладает достаточной яркостью, чтобы быть видимым, но у многих других квазаров видны оба джета.

Блэндфорд и Знаек детально описали все процессы, отталкиваясь от теории относительности Эйнштейна. Они смогли объяснить почти все наблюдаемые свойства джетов.

Согласно другой версии (рис. 9.4), завихряющееся магнитное поле привязано к аккреционному диску, а не к горизонту дыры и движется по кругу, втягиваемое орбитальным движением диска. В остальном же все повторяется: эффект динамо-машины и выброс плазмы. Эта версия работает даже для невращающейся черной дыры. Однако у нас есть основания считать, что большинство черных дыр вращается, и весьма быстро, поэтому мне кажется, что механизм Блэндфорда — Знаека (рис. 9.3) лучше всего подходит для квазаров. Но, быть может, я предвзят: в восьмидесятых я потратил немало времени, изучая различные аспекты идей Блэндфорда — Знаека и даже выступил соавтором монографии на эту тему.

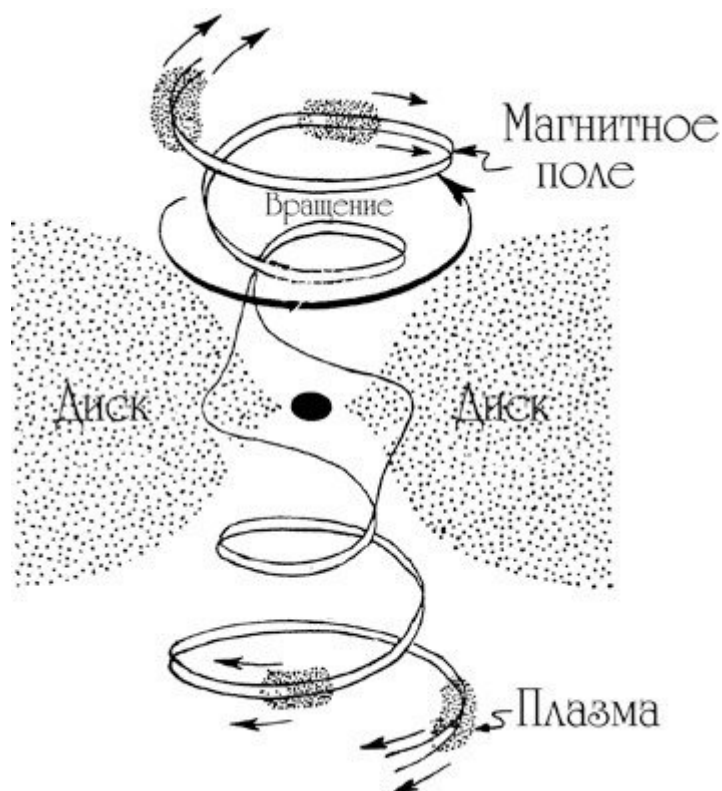


Рис. 9.4. То же, что на рис. 9.3, но магнитное поле привязано к аккреционному диску (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

### Откуда берется диск

В 1969 году Линден-Белл предположил, что квазары расположены в центрах галактик. Мы не видим галактику вокруг квазара, сказал он, потому что ее свет намного слабее, чем свет самого квазара, квазар затмевает для нас галактику. Спустя десятилетия астрономы благодаря новым технологиям обнаружили свечение галактик вокруг множества квазаров, что подтвердило предположение Линден-Белла.

Также в течение последних десятилетий мы узнали, откуда берется большая часть газа, из которого состоит диск. Порой какая-нибудь звезда подходит так близко к черной дыре в центре квазара, что приливные силы этой дыры (см. главу 4) разрывают звезду на части. Немалая доля газа из расколовшейся звезды попадает в плен к черной дыре, образуя аккреционный диск.

Благодаря развитию компьютерных технологий в последние годы астрофизикам удалось смоделировать этот процесс. Рис. 9.5 получен в результате такого моделирования, выполненного Джеймсом Гиллоконом, Энрико Рамирез-Руисом, Дэниелом Кэсеном (из Калифорнийского университета в Санта-Крузе) и Стефаном Россвогом (из Бременского университета)<sup>44</sup>. В начальный момент (который на рисунке не показан) звезда двигалась практически прямо к черной дыре, приливная гравитация которой начинала растягивать звезду в направлении дыры и сжимать с боков, как на рис. 6.1. Двенадцать часов спустя звезда уже сильно деформирована и находится в положении, показанном на рис. 9.5 сверху. В течение еще нескольких часов она огибает дыру по синей орбите гравитационной пращи и, как видно на рисунке, деформируется еще больше. Через 24 часа звезда распадается на части, поскольку ее собственная гравитация уже неспособна этому противостоять.



Рис. 9.5. Приливное разрушение звезды (красного гиганта) черной дырой Гаргантюа

Дальнейшая судьба звезды показана на рис. 9.6, результате другого моделирования, выполненного Джеймсом Гиллоконом и Сави Джебзари из Университета Джона Хопкинса (Балтимор). См. видеоролик по адресу [hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2012/18/video/-a/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2012/18/video/-a/).

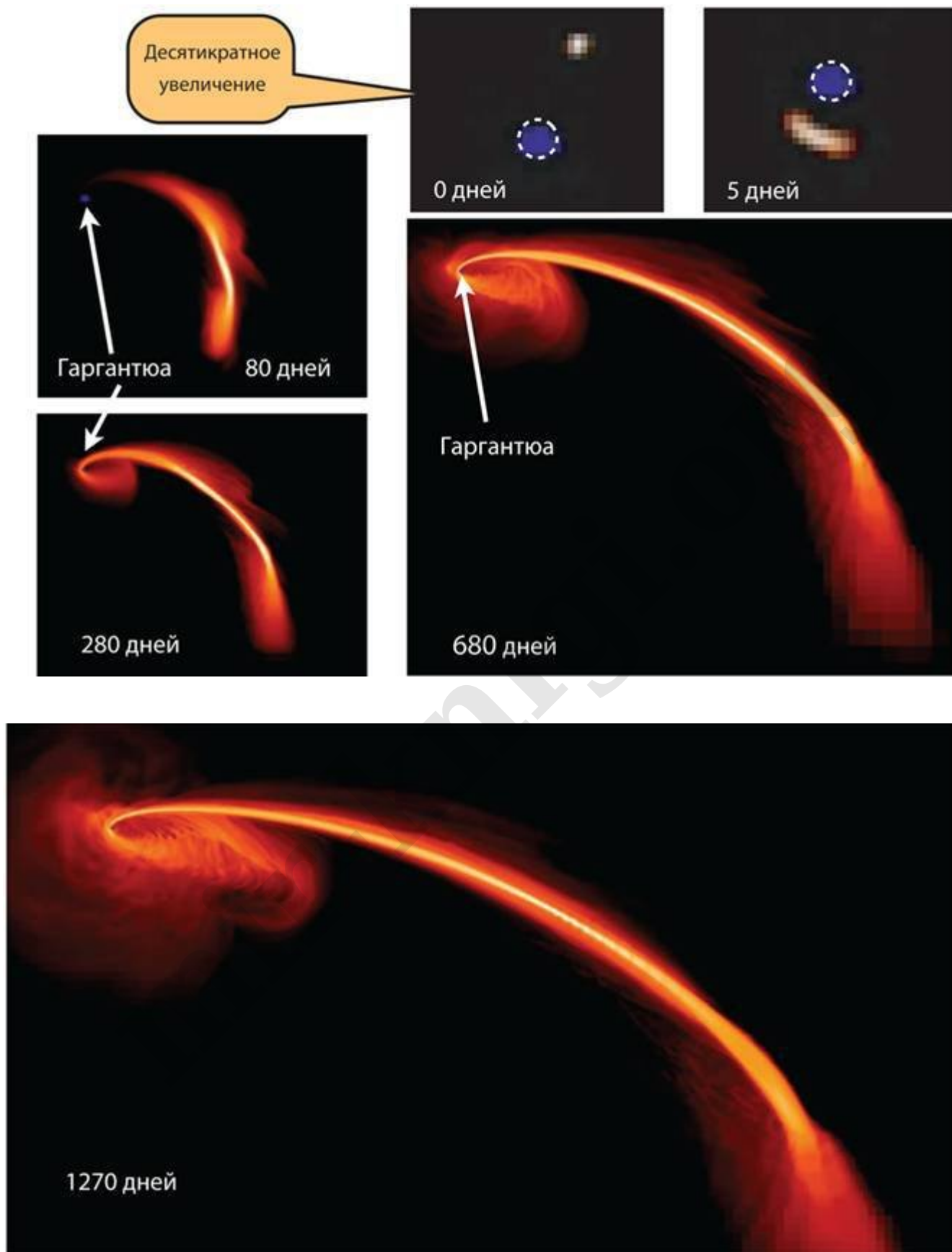


Рис. 9.6. Приливное разрушение звезды (красного гиганта) черной дырой Гаргантюа

Два верхних изображения соответствуют моментам незадолго до и незадолго после событий на рис. 9.5. Я увеличил эти изображения в 10 раз, чтобы можно было различить дыру и разрушающуюся звезду.

Как видно из раскадровки, в течение нескольких лет большая часть вещества звезды оказывается заключена на орбите вокруг черной дыры, где из него формируется аккреционный диск. Оставшееся же вещество избегает притяжения дыры, покидая ее вдоль струеобразной траектории (джет).

### Аккреционный диск Гаргантюа и отсутствие джета

Типичный аккреционный диск и его джет испускают рентгеновское излучение, гамма-лучи, радиоволны и свет; и мощность этого излучения такова, что оно уничтожило бы всех людей, находящихся неподалеку. Чтобы избежать этого, Кристофер Нолан и Пол Франклин снабдили Гаргантюа чрезвычайно слабым диском.

Ну как слабым... Слабым по стандартам типичных квазаров. Вместо температуры в сотни миллионов градусов, как у диска типичного квазара, температура диска Гаргантюа — «всего» несколько тысяч градусов (как на поверхности Солнца). Поэтому диск Гаргантюа испускает много света, но почти не испускает рентгеновских и гамма-лучей. Когда газ настолько «прохладный», тепловое движение атомов слишком медленное, чтобы диск был толстым. В итоге он «тонко размазан» по экваториальной плоскости Гаргантюа.

Такой диск может быть у «проголодавшейся» черной дыры, то есть дыры, которая за последние миллионы или более лет не растерзала ни одной звезды. В этом случае магнитное поле, изначально привязанное к плазме диска, истощится, а джет, который оно подпитывало, — исчезнуть. Таков диск Гаргантюа: тонкий, без джета и относительно безопасный для людей. Относительно.

Диск Гаргантюа заметно отличается от изображений тонких дисков из трудов астрофизиков, поскольку в их иллюстрациях отсутствует одна важная особенность — гравитационное линзирование диска черной дырой. В «Интерстеллар» линзирование есть, поскольку Крис настаивал на зрительной достоверности.

Перед Эжени фон Танзелманн стояла задача прогнать аккреционный диск через компьютерную программу гравитационного линзирования, о которой я писал в главе 8. Первым делом, чтобы оценить результат линзирования, Эжени использовала бесконечно тонкий диск, лежащий точно в экваториальной плоскости Гаргантюа. Для этой книги она предоставила более наглядный вариант такого диска, состоящий из равномерно распределенных цветных участков.

Если бы не гравитационное линзирование, диск выглядел бы так же, как на врезке. Линзирование же кардинально изменило его вид (основная часть рис. 9.7). Вы могли решить, что задняя часть диска окажется скрытой за Гаргантюа. Однако вместо этого гравитационное линзирование породило два изображения диска, одно над дырой и одно под ней, см. рис. 9.8. Лучи света, которые исходят с верхней стороны той области диска, что находится позади Гаргантюа, огибают дыру сверху и, попадая в камеру, формируют изображение диска над тенью Гаргантюа на рис. 9.7. То же самое происходит и для нижней стороны диска, изображение которой огибает тень Гаргантюа снизу.

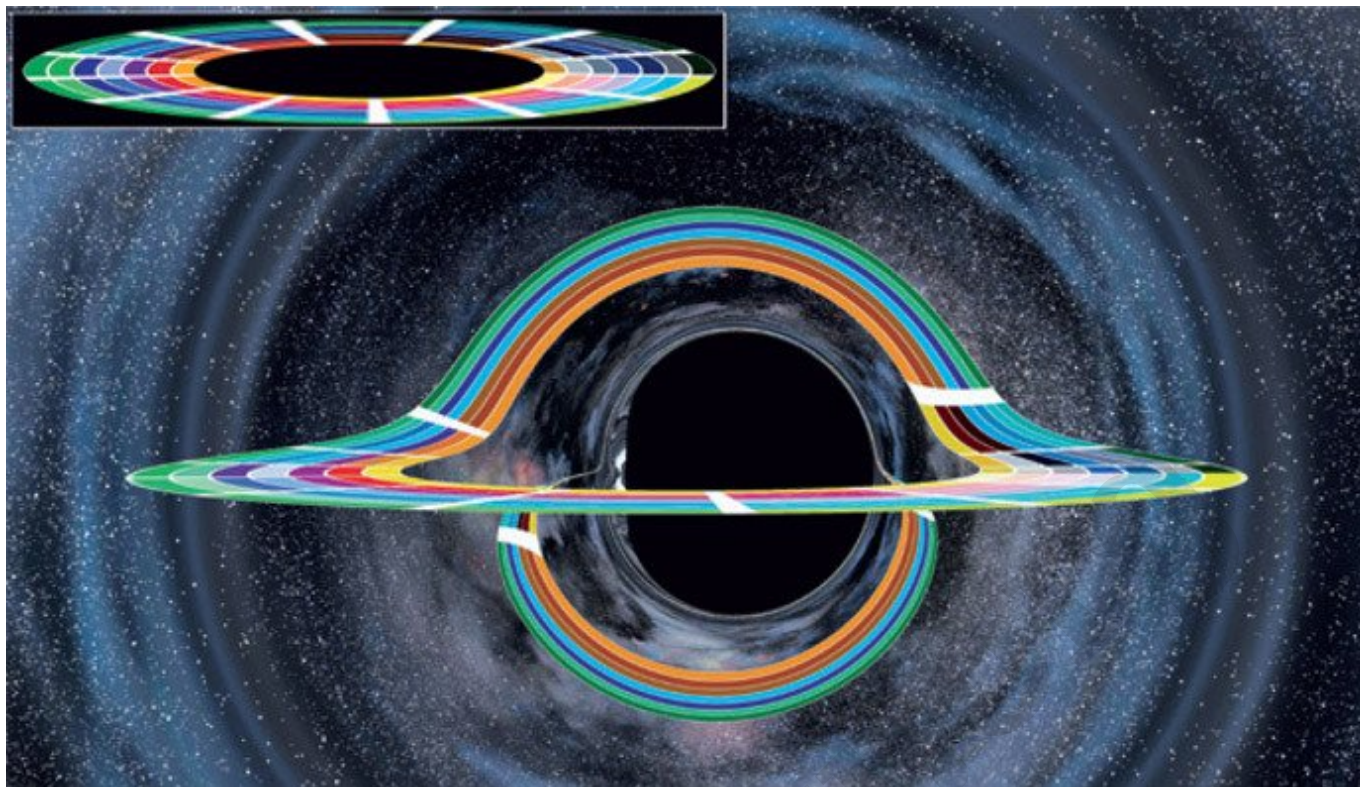


Рис. 9.7. Бесконечно тонкий диск в экваториальной плоскости Гаргантюа, гравитационно линзированный искривленным пространством и временем дыры. Гаргантюа здесь вращается очень быстро. Врезка: тот же диск без черной дыры (Изображение от команды Эжени фон Танзелманн из студии Double Negative.)

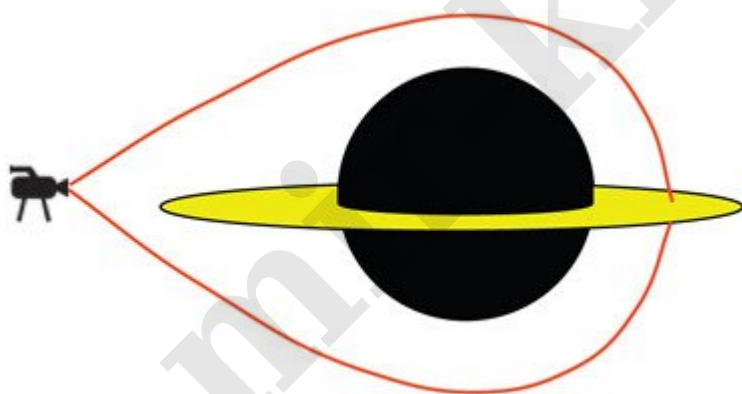


Рис. 9.8. Лучи света (красные линии), формирующие для камеры изображения области аккреционного диска, которая находится позади Гаргантюа: одно изображение — над тенью дыры, другое — под ней

Кроме первичных изображений можно разглядеть тонкие вторичные изображения диска, огибающие тень сверху и снизу у самого ее края. А если бы картинка была гораздо больше, вы бы увидели также изображения третичные и более высоких порядков, располагающиеся все ближе и ближе к тени.

Можете сообразить, почему линзированный диск выглядит именно так? Почему огибающее тень снизу первичное изображение смыкается с тонким вторичным изображением, которое огибает тень сверху? Почему цветные участки сверху и снизу от тени растянуты, а слева и справа — сжаты?

Пространственный вихрь Гаргантюа (с левой стороны рисунка пространство движется по направлению к нам, а справа — от нас) искажает изображения диска. Он отдаляет диск от тени с левой стороны и приближает с правой, из-за чего диск выглядит слегка перекошенным. (Можете объяснить почему?)

На следующем этапе Эжени фон Танзелманн и ее команда заменили диск с цветными областями (рис. 9.7) более реалистичным тонким аккреционным диском, см. рис. 9.9. Этот диск выглядел куда привлекательнее, однако возникли проблемы: Крис не хотел смущать массового зрителя несимметричностью диска и тени черной дыры, а также плоским левым краем тени и замысловатым узором звездного поля возле этого края (об этом шла речь в главе 8). Поэтому Крис и Пол решили замедлить Гаргантюа до скорости в 0,6 от предельной, что сделало все эти странности менее заметными. (От эффекта Доплера, вызванного движением диска по направлению к нам слева и от нас справа, Эжени уже отказалась. Иначе диск стал бы еще более асимметричным: ярко-синим слева и тускло-красным справа, что окончательно запутало бы зрителей!)

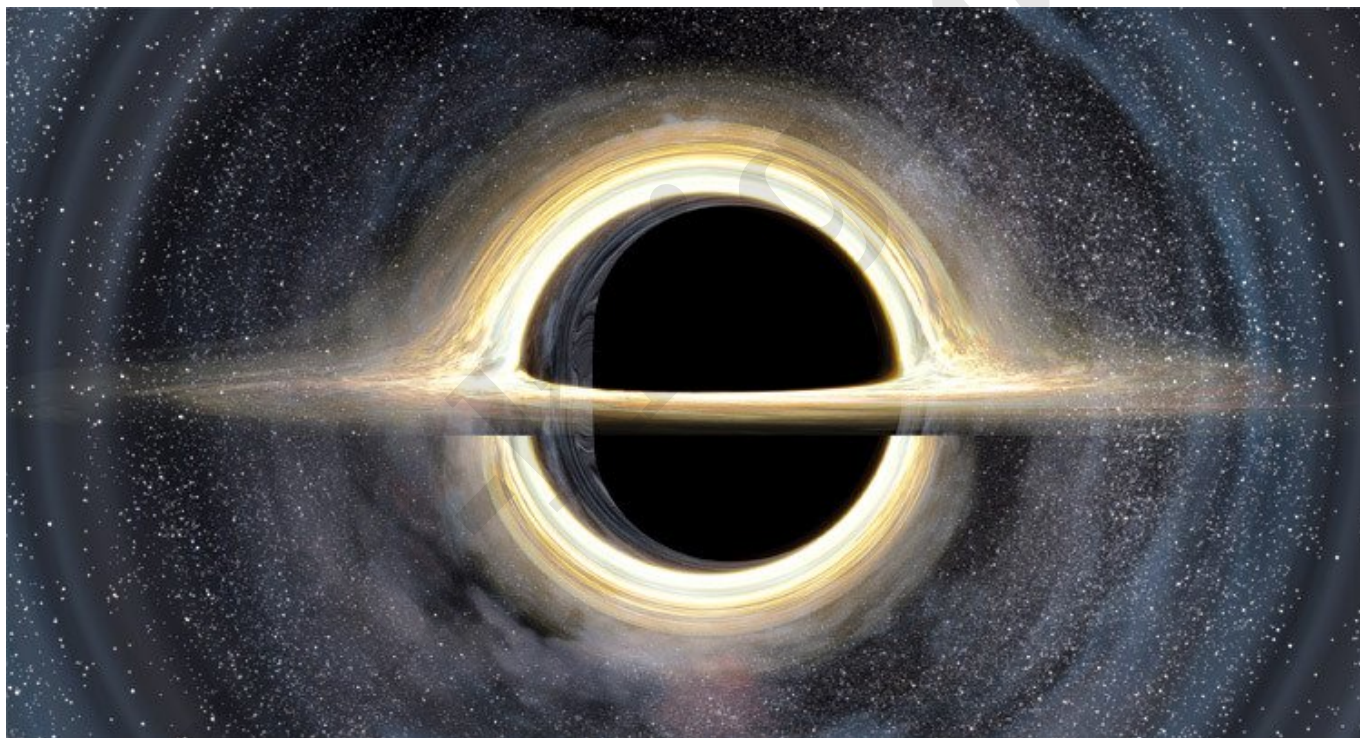


Рис. 9.9. Гаргантюа с более реалистичным бесконечно тонким аккреционным диском вместо цветного диска с рис. 9.7 (Изображение от команды Эжени фон Танзелманн из студии Double Negative.)

Затем художники студии Double Negative снабдили диск текстурой и рельефом, которые были бы присущи настоящему слабому аккреционному диску, сделав его слегка и неравномерно утолщенным. Они сделали диск более горячим (более ярким) вблизи Гаргантюа и более холодным (тусклым) вдали от нее. Кроме того, вдали диск утолстили, поскольку к экваториальной плоскости его стягивают силы приливной гравитации, которые тем слабее, чем больше расстояние до черной дыры. И наконец, добавили фон, состоящий из множества слоев (пыль, туманности, звезды), и наложили дымку и блики, имитирующие поведение света в линзах камеры. В результате получились чудесные, просто волшебные кадры для фильма (рис. 9.10 и 9.11).

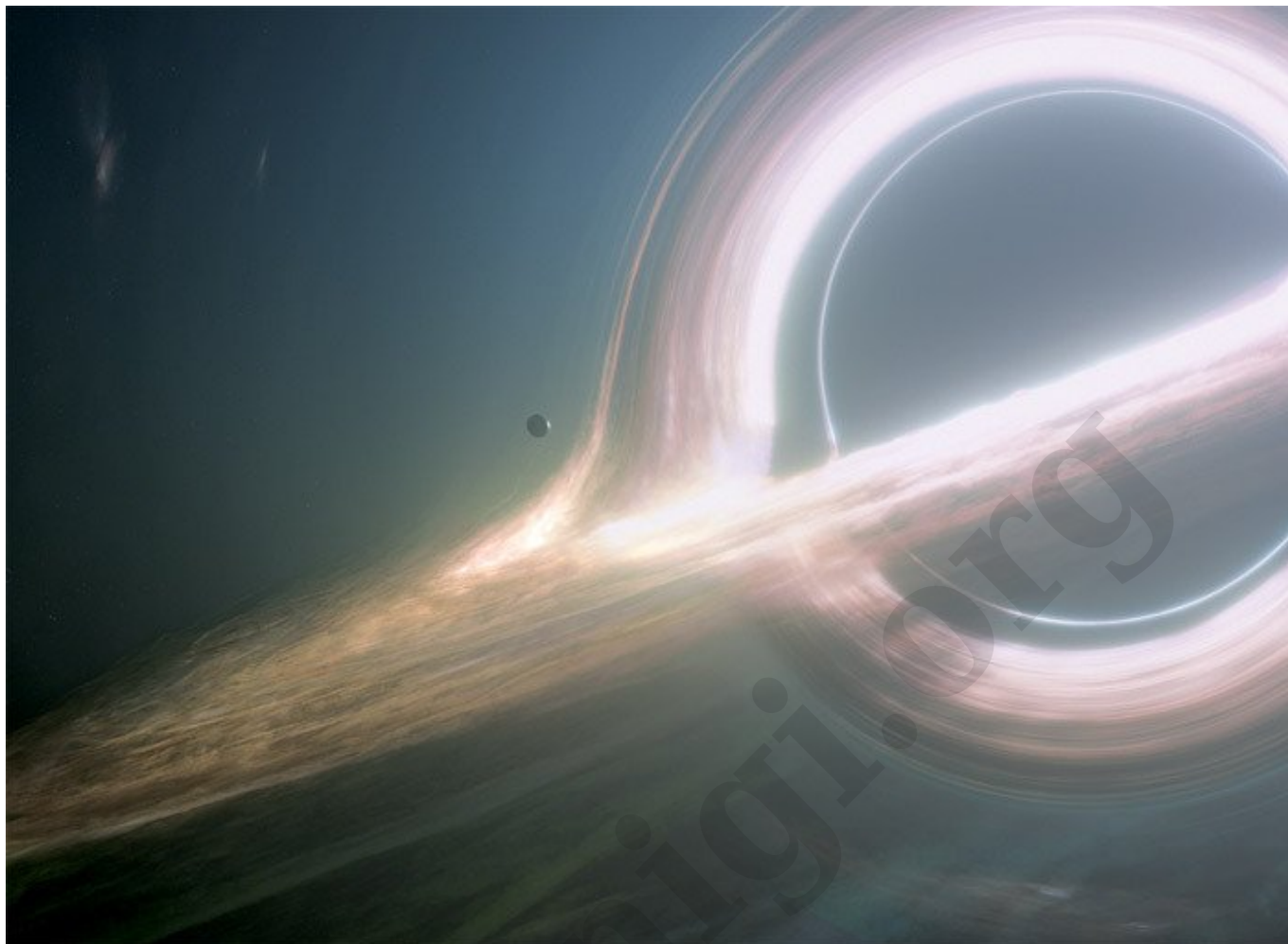


Рис. 9.10. Гаргантюа и ее аккреционный диск с планетой Миллер над левым краем диска. Из-за большой яркости диска звёзды и туманности позади дыры едва заметны (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)



Рис. 9.11. Часть диска Гаргантюа вблизи и пролетающий над ним космолет «Эндюранс». Темная область с разрозненными отсветами на переднем плане — это окаймленная диском тень Гаргантюа (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

И, разумеется, Эжени и ее команда заставили газ, из которого состоит диск, вращаться по орбите вокруг Гаргантюа (иначе он устремился бы в дыру). В комбинации с гравитационным линзированием орбитальное движение газа дало выразительные эффекты перетекания, заметные на рис. 9.11.

Какое счастье было увидеть эти кадры! Впервые в истории черная дыра и ее диск показаны в голливудском фильме такими, какими мы увидим их на самом деле, когда освоим межзвездные перелеты. И впервые я, физик со стажем, видел реалистичный, гравитационно линзированный диск, огибающий дыру сверху и снизу, а не прячущийся за ее тенью.

Если диск Гаргантюа, несмотря на свое великолепие, столь слаб да еще и лишен джета, действительно ли окрестности Гаргантюа безопасны? Амелия Брэнд считает, что да...

## 10

Случай — краеугольный камень эволюции



Когда в фильме выяснилось, что планета Миллер непригодна для жизни, Амелия Брэнд выступила за то, чтобы отправиться к очень далекой от Гаргантюа планете Эдмундс, а не к более близкой планете Манн: «Случай — это краеугольный камень эволюции, — говорит она Куперу. — Но когда ты на орбите черной дыры, мало что может случиться: дыра засасывает и астероиды, и кометы — и все, что иначе могло бы произойти с тобой. Нужно двигаться дальше».

Этот момент — один из немногих в «Интерстеллар», где персонажи понимают науку превратно. Кристофер Нолан знал, что аргумент Амелии ошибочен, и все же решил оставить эту реплику из первоначального сценария Джоны. Ученые тоже могут ошибаться.

Хоть Гаргантюа и рада засосать в себя астероид, комету, планету, звезду или даже черную дыру поменьше, удастся ей это нечасто. Почему?

Любой объект, находящийся вдали от Гаргантюа, обладает большим угловым моментом<sup>45</sup>, если только он не летит прямо к Гаргантюа.

Большой угловой момент порождает центробежные силы, которые легко берут верх над гравитационным притяжением Гаргантюа, даже если объект, следуя орбите, подходит близко к черной дыре.

На рис. 10.1 изображен пример типичной орбиты. Объект под воздействием мощной гравитации Гаргантюа движется к дыре. Но, прежде чем он достигает горизонта, центробежные силы возрастают настолько, что отбрасывают объект назад. Так происходит снова и снова, практически бесконечно.

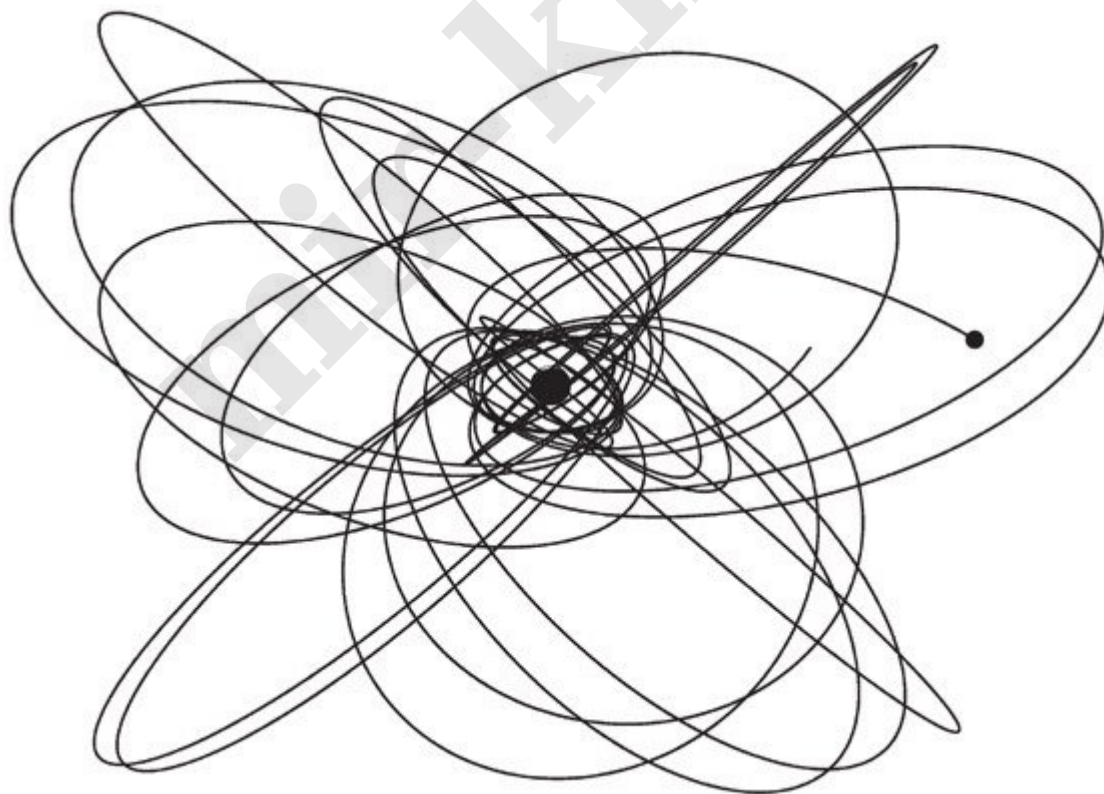


Рис. 10.1. Типичная орбита объекта, движущегося вокруг быстровращающейся черной дыры вроде Гаргантюа (Модель Стива Драско.)

Единственное, что может этому помешать, — случайная встреча с каким-нибудь другим массивным телом (небольшой черной дырой, звездой или планетой). Объект огибает это другое тело по траектории гравитационной пращи (см. главу 7), и его перебрасывает на новую орбиту вокруг Гаргантюа, с изменением углового момента. У новой орбиты, как и у прежней, угловой момент почти всегда велик, и центробежные силы опять спасают объект от падения в Гаргантюа. Но крайне редко происходит так, что новая орбита влечет объект прямо или почти прямо к Гаргантюа с малым угловым моментом. В этом случае центробежные силы оказываются слишком слабы, и тогда объект проходит сквозь горизонт Гаргантюа.

Астрофизики смоделировали одновременное орбитальное движение миллионов звезд вокруг гигантской черной дыры, подобной Гаргантюа. Гравитационные пращи постепенно меняют все орбиты, изменяя таким образом распределение звездной плотности (количество звезд на заданный объем). При этом звездная плотность вблизи Гаргантюа не уменьшается — она растет. Плотность астероидов и комет также будет расти. Случайные бомбардировки астероидами и кометами учащаются. Окрестности Гаргантюа станут более опасными для обособленных форм жизни, включая людей, что при условии выживания достаточного количества особей ускорит эволюцию.

Познакомившись с Гаргантюа и ее опасными окрестностями, уделите теперь немного внимания Земле и Солнечной системе, а именно — свалившемуся на землян бедствию и сложнейшей задаче спасения человечества с помощью межзвездного перелета.

### III

#### ЗЕМЛЯ В БЕДЕ



##### Болезнь растений



Когда в 2007 году Джонатан (Джона) Нолан приступил к работе над сценарием, он выбрал временем действия эпоху, когда человеческая цивилизация представляет собой бледную тень нынешнего величия и самому существованию человечества угрожает эпифития — распространение среди растений губительной для них болезни. Кристофер Нолан, брат Джоны, заступив на вахту режиссера, принял и развил эту идею.

Однако мы с Линдой Обст и Джоной немного беспокоились о научном правдоподобии мира Купера, каким его нарисовал Джона: как могло человечество прийти в упадок и все же во многих отношениях оставаться привычным для нас? И какова, с точки зрения науки, вероятность того, что эпифития поставит под угрозу существование всех съедобных растений?

Я мало что знаю о заболеваниях растений, поэтому мы обратились за советом к специалистам. 8 июля 2008 года я организовал в «Афинеуме», университетском клубе Калтеха, обед. Хорошая еда, отличное вино. Джона, Линда, я и четыре биолога из Калтеха, каждый из которых силен в своей области: Эллиот Мееровиц, эксперт по растениям; Джаред Лидбеттер, эксперт по микробам, вызывающим болезни растений; Мэл Саймон, эксперт по клеточному строению

растений и воздействию микробов на клеточном уровне; Дэвид Балтимор, нобелевский лауреат с широчайшими познаниями в общей биологии. (Калтех — первостатейное учебное заведение. В течение трех последних лет лондонская «Таймс» называла Калтех лучшим университетом в мире; притом он достаточно компактен (здесь числится всего 300 профессоров, 1000 учащихся и 1200 выпускников), чтобы я был знаком с калтеховскими экспертами в самых разных областях науки. Найти и пригласить нужных нам специалистов было несложно.)

Когда обед начался, я поставил в центре круглого стола микрофон и записал нашу непринужденную беседу, длившуюся два с половиной часа. Эта глава большей частью состоит из фрагментов аудиозаписи, я лишь подправил несколько фраз, а их авторы завизировали мою редакцию.

В итоге мы все пришли к выводу, что мир Купера научно возможен, хоть вероятность такого развития событий и невелика. Крайне маловероятен, но возможен, поэтому я и пометил эту главу значком



— домысел.

## Мир Купера

Под вино и закуски Джона рассказал нам о том, каким видит мир Купера (рис. 11.1). Из-за различных катаклизмов население Северной Америки уменьшилось в десять или более раз; то же самое произошло и на других континентах. Человечество стало вести в основном аграрный образ жизни, с трудом обеспечивая себе пропитание и кров. И все же это не антиутопия — в целом жизнь терпима, а местами даже приятна: нам остались кое-какие маленькие радости вроде игры в бейсбол. Однако мы уже не мыслим глобально, не стремимся к великим свершениям. Нам нужно лишь немного сверх минимума, необходимого для жизни.



Рис. 11.1. Жизнь в мире Купера. Сверху: игра в бейсбол, на горизонте песчаная буря. Снизу: дом Купера и его грузовичок после бури (Кадры из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Многие решили, что катаклизмы закончились, что люди обустроиваются в новом мире и дела их могут пойти на лад. Однако болезнь растений столь губительна и так быстро перекидывается с культуры на культуру, что человечеству суждено исчезнуть еще при внуках Купера.

Что за катаклизмы?

Какие именно катаклизмы могли привести к такой ситуации? Наши эксперты-биологи предложили ряд возможных, хотя и маловероятных вариантов. Вот некоторые из них:

**Лидбеттер:** Сейчас [2008 год. — К. Т.] мало кто ведет натуральное хозяйство. Мы зависим от глобальной системы по выращиванию и распределению пищи и от водоснабжения. Представьте, что будет, если работа этой системы будет нарушена из-за какой-нибудь биологической или геофизической катастрофы. Вот пример в малом масштабе: если в горах Сьерра-Невада несколько лет подряд не будет выпадать снег, в Лос-Анджелесе возникнет дефицит питьевой воды. Десяти миллионам людей придется мигрировать, сельское хозяйство в Калифорнии придет в упадок. Несложно представить и катастрофы гораздо больших масштабов. В мире Купера, с сильным сокращением населения и возвратом к аграрному обществу, проблемы производства и распределения уже не столь остры.

**Саймон:** Еще один вариант катастрофы. Всю свою историю человечество борется с патогенами [с микробами, которые вызывают болезни у человека, у других животных или у растений. — К. Т.]. Для борьбы с патогенами, которые поражают непосредственно организм, у нас развилась сложная иммунная система. Но патогены продолжают эволюционировать, и мы всегда на шаг позади их. В какой-то момент патогены могут ускориться в развитии так, что наша иммунная система уже не будет за ними поспевать.

**Балтимор:** К примеру, вирус СПИД может стремительно эволюционировать в более опасную форму, которая будет передаваться не половым, а воздушно-капельным путем.

**Саймон:** Полярные шапки Земли, тающие из-за глобального потепления, могут высвободить некий дремлющий со времен последнего ледникового периода патоген.

**Лидбеттер:** Еще один сценарий: люди могут запаниковать из-за глобального потепления, основная причина которого — увеличение концентрации двуокиси углерода в атмосфере. Желая спастись, люди примутся удобрять океаны, чтобы стимулировать рост водорослей, перерабатывающих атмосферную двуокись углерода в ходе фотосинтеза. Для этого они насытят океаны железом. И тут могут возникнуть непредвиденные, фатальные, побочные эффекты. Например, появятся новые виды водорослей, которые будут вырабатывать токсины, отравляющие океаны. Это приведет к массовой гибели рыб и водных растений. Человечество сильно зависит от океанов, для него это обернется катастрофой. Скажете, такое развитие событий невозможно? Отнюдь. Проводились эксперименты, когда в отдельные участки океана забрасывали железо, чтобы вырастить водоросли, — и они разрастались так, что зеленые пятна были видны из космоса (рис. 11.2). Некоторые разновидности этих водорослей оказались прежде неизвестными науке! Нам повезло: они не были ядовиты, но могли бы...

### Концентрация хлорофилла, мг/м<sup>3</sup>, август 2012

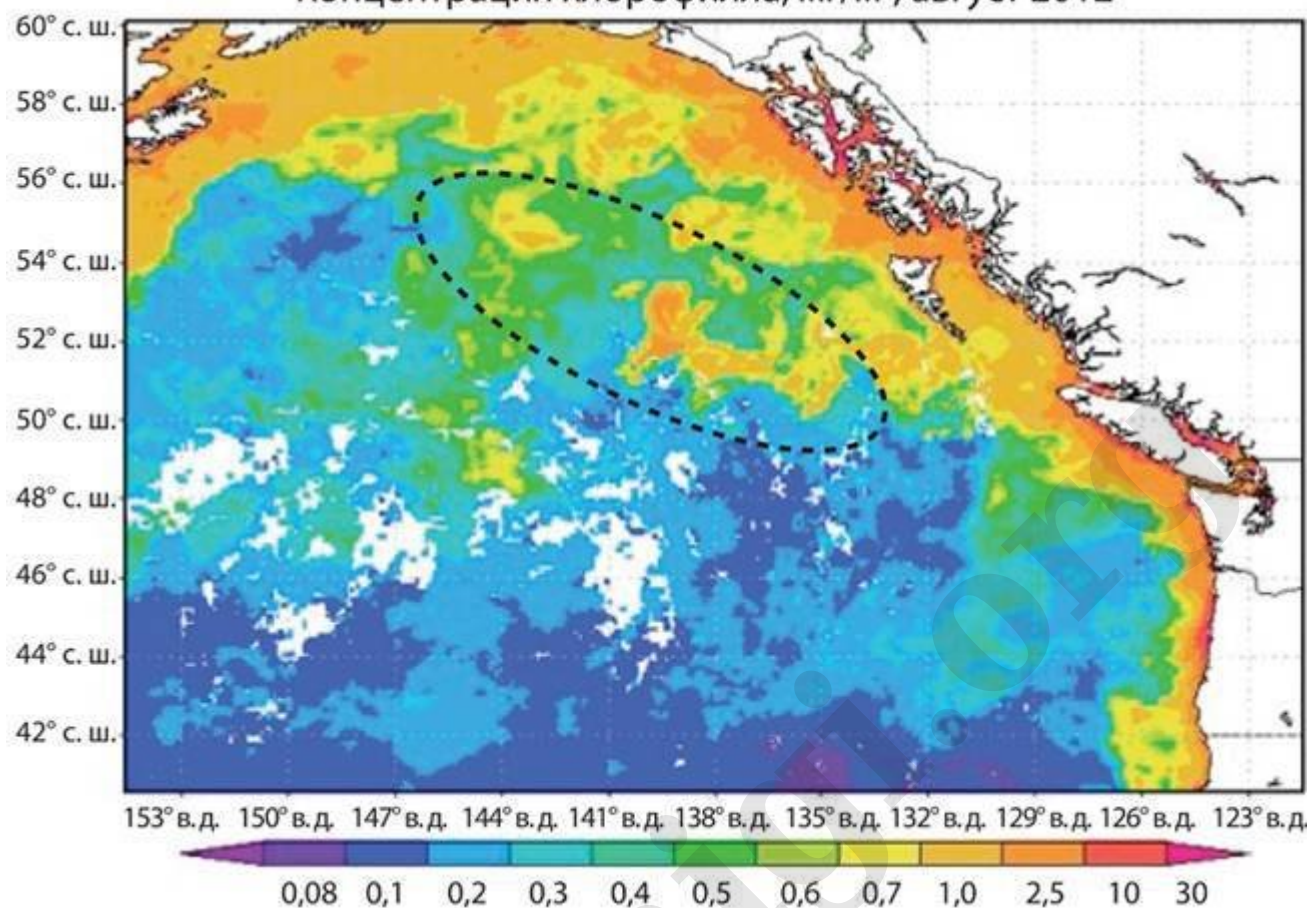


Рис. 11.2. Карта концентрации хлорофилла (водорослей) после выгрузки 100 тонн сульфата железа в океан у берегов Британской Колумбии. Железо стимулировало рост водорослей, что привело к большой их концентрации внутри области, обведенной овальным пунктиром (Из данных проекта NASA «Джованни».)

**Мееровиц:** Ультрафиолетовое излучение, проходящее через озоновую дыру, может вызвать мутацию этих громадных колоний водорослей и привести к возникновению новых патогенов. Эти патогены могли бы уничтожить все растения в океане, а затем перекинуться на сушу и начать уничтожать посевы.

**Балтимор:** При столкновении с подобными катастрофами наша единственная надежда — наука и технологии. Если мы не будем о них заботиться на государственном уровне или сделаем господствующей какую-либо антиинтеллектуальную идеологию, которая отрицает эволюцию [именно эволюция делает возможными описанные катастрофы. — К. Т.], то в критический момент окажемся безоружными.

И вот появляется болезнь растений — итог одного из множества сценариев.

#### Болезнь растений

Под болезнью растений мы подразумеваем практически любое поражение растений, вызванное патогенными микробами.

**Балтимор:** Если нужно уничтожить человечество, заболевание растений, возможно, наилучший способ. Без съедобных растений нам никуда. Конечно, мы можем питаться мясом животных, но и тут необходимым звеном пищевой цепочки будут растения.

**Мееровиц:** Вероятно, болезни достаточно уничтожить лишь травянистые растения, ведь они составляют основу нашего сельского хозяйства, — это рис, кукуруза, ячмень, сорго, пшеница. Большинство животных, которыми мы питаемся, тоже едят траву.

**Мееровиц:** Мы и так живем в условиях, когда патогены уничтожают 50 процентов выращенной пищи, и это гораздо больше, чем в Африке. Грибки, бактерии, вирусы... они все могут быть патогенными. Раньше Восточное побережье США было покрыто каштанами — их больше нет, их уничтожила болезнь. Сорт бананов, который был наиболее популярен в XVIII веке, вымер, а тому сорту, который его заменил, — бананам Кавендиш — сейчас угрожает то же.

**Кип:** Я думал, заболевания поражают конкретные растения и не перекидываются на другие виды.

**Лидбеттер:** Существуют и болезни широкого спектра. Похоже, есть своего рода баланс между такими заболеваниями и специфическими. Специфическое заболевание может привести к очень высокому проценту летальности, уничтожив, скажем, 99 процентов какой-то отдельной группы растений. Болезням широкого спектра могут быть подвержены разные виды растений, но процент летальности для отдельно взятого вида обычно невысок. Это типичная картина, которую мы встречаем в природе снова и снова.

**Линда:** Может ли болезнь широкого спектра существенно повысить летальность?

**Мееровиц:** Нечто подобное уже происходило. На заре истории Земли, когда цианобактерии начали вырабатывать кислород, тем самым радикально меняя состав атмосферы, они уничтожили почти все остальные живущие на Земле организмы.

**Лидбеттер:** Однако кислород был побочным продуктом, ядом, который вырабатывала цианобактерия, а не патогенным микроорганизмом широкого спектра поражения.

**Балтимор:** Пожалуй, нам такие случаи не встречались, но я могу представить, как смертоносный патоген, поражающий специфическую группу растений, становится патогеном широкого спектра. Он мог бы распространяться от вида к виду с помощью насекомых. В рацион японского хрушика, например, входит до двух сотен видов растений. Если бы жук стал переносчиком патогена, патоген мог бы адаптироваться к этим видам, поражая их с высоким процентом летальности.

**Мееровиц:** Я могу себе представить абсолютно смертельный патоген широкого спектра поражения — патоген, атакующий хлоропласты. Хлоропласты есть у самых разных растений. Они играют ключевую роль в фотосинтезе [процесс, в ходе которого растение поглощает солнечный свет, атмосферную двуокись углерода, а также влагу из почвы и производит

необходимые для своего роста углеводы. — К. Т.]. Без хлоропластов растение погибнет. А теперь представьте, что где-то, например в океане, развивается новый патоген, атакующий хлоропласты. Он может уничтожить все океанские растения и перекинуться на сушу. Земля превратится в пустыню. Такое возможно, хотя и маловероятно. Так или иначе, этот вариант подходит для мира Купера.

Все эти «фантазии на тему» дают понять, что за кошмары могут мешать биологу спать по ночам. Главная проблема человечества в «Интерстеллар» — заболевание растений широкого спектра поражения, которое неистовствует по всей планете. Но у профессора Брэнда есть еще одна причина для беспокойства: на Земле заканчивается кислород, и людям скоро нечем будет дышать.



## Задыхаясь без кислорода



В начале фильма профессор Брэнд говорит Куперу: «Земная атмосфера на 80 процентов состоит из азота. Мы не можем дышать азотом, а патоген может. И пока он распространяется, кислорода в нашем воздухе будет все меньше и меньше. Последние люди, пережившие голод, будут первыми умершими от удушья. Поколение твоей дочери станет последним на Земле».

Есть ли научные обоснования для заявления профессора? Поставленный вопрос находится на пересечении двух научных дисциплин — биологии и геофизики. Поэтому я обсудил его с биологами, особенно с Эллиотом Мееровицем, во время нашего обеда, а также с двумя геофизиками, профессорами Калтеха Джеральдом Вассербургом (эксперт в области происхождения Земли, Луны и Солнечной системы) и Яком Янгом (специалист по физике и химии земной атмосферы, а также атмосфер других планет). И вот что я узнал от них, а также из научных трудов, к которым они меня отослали.

## Образование и исчезновение пригодного для дыхания кислорода

Кислород, которым мы дышим, — это  $O_2$ : молекула из двух атомов кислорода, связанных парой электронов. На Земле немало кислорода и в других формах: в составе диоксида углерода, воды, минералов земной коры и т. д. и т. п. Однако такой кислород непригоден для наших тел, если только какой-нибудь организм не высвободит его и не преобразует в  $O_2$ .

$O_2$  исчезает из атмосферы в результате дыхания, горения и гниения. Когда мы вдыхаем  $O_2$ , наши органы соединяют его с углеродом, образуя двуокись углерода  $CO_2$ <sup>46</sup>. При этом высвобождается много энергии, которую наши тела используют. При горении древесины огонь быстро соединяет атмосферный  $O_2$  с древесным углеродом, образуя  $CO_2$ , и эта реакция порождает тепло, которое поддерживает горение. Когда в лесной подстилке разлагаются мертвые растения, их углерод медленно соединяется с атмосферным  $O_2$ , также выделяя  $CO_2$  и тепло.

Атмосферный  $O_2$  возникает главным образом благодаря фотосинтезу: хлоропласты в растениях<sup>47</sup> (см. главу 11) используют энергию солнечного света для расщепления  $CO_2$  на С и

O<sub>2</sub>. Затем O<sub>2</sub> высвобождается в атмосферу, а углерод растение соединяет с водородом и кислородом из воды, получая углеводы, необходимые ему для роста.

Нехватка O

2

, избыток CO

2

Предположим, эволюция породила патоген, уничтожающий хлоропласты, как в фантазии Эллиота Мееровица из конца предыдущей главы. Фотосинтез постепенно, по мере вымирания растений, прекращается. O<sub>2</sub> больше не образуется, но продолжает разрушаться из-за дыхания, горения и гниения — в основном гниения. Однако, к счастью для выживших людей, на Земле не хватит гниющих растений, чтобы поглотить весь O<sub>2</sub>.

Основная часть того, что может сгнить, сгниет в течение тридцати лет, и на это уйдет всего лишь около одного процента O<sub>2</sub>; оставшегося с лихвой хватило бы и детям, и внукам Купера (лишь бы им было что есть).

Однако этот один процент атмосферного O<sub>2</sub> будет преобразован в двуокись углерода, и в результате CO<sub>2</sub> составит 0,2 процента атмосферы. Учитывая, что львиная доля атмосферы приходится на азот, этого количества CO<sub>2</sub> достаточно, для того чтобы особо чувствительным к составу воздуха людям стало трудно дышать и, возможно, для того чтобы температура Земли повысилась (из-за парникового эффекта) примерно на 10 градусов Цельсия. Мягко говоря, неприятная перспектива!

Чтобы затруднить дыхание и вызвать сонливость у всех людей, в CO<sub>2</sub> должно преобразоваться в десять раз больше атмосферного O<sub>2</sub>, а чтобы отравить диоксидом углерода практически все человечество — еще в пять раз больше, то есть всего в 50. Ума не приложу, как бы такое могло случиться.

Так что же, профессор Брэнд неправ? (Даже физики-теоретики делают ошибки... О да, в особенности физики-теоретики! Уж я-то знаю, о чем говорю.) Ошибка возможна, но все же профессор может быть прав, и чтобы объяснить почему, нужно упомянуть о серьезных проблемах океанского дна, ведомых геофизикам.

Так же как и на суше, на дне океана есть неперегнившая органическая материя. Геофизики оценивают ее количество в одну двадцатую часть от земной органики. Если они обсчитались и этой неперегнившей органики в океанах в 50 раз больше, чем на суше, и если найти способ быстро вытащить ее на поверхность, то из-за ее гниения с образованием CO<sub>2</sub> все люди на планете начнут задыхаться от нехватки кислорода и умирать от отравления CO<sub>2</sub>.

Раз за много тысяч лет нестабильные океанские воды перемешиваются — вода с поверхности опускается на дно, а вода со дна поднимается вверх. Не исключено, что во времена Купера произойдет настолько бурное перемешивание, что поднимающиеся водные пласты вынесут вверх большую часть донной органики. При контакте с атмосферой эта органика начнет гнить, преобразуя атмосферный O<sub>2</sub> в смертельное количество CO<sub>2</sub>.

Да, это возможно. Но крайне маловероятно по двум причинам: во-первых, очень сомнительно, что количество неперегнившей органики на океанском дне настолько превышает прогнозы

геофизиков, а во-вторых, крайне мала вероятность настолько бурного перемешивания океана<sup>48</sup>.

Как бы то ни было, Земля в «Интерстеллар» умирает, и человечеству нужен новый дом. Солнечная система, за исключением Земли, непригодна для жизни, так что искать приходится за ее пределами.

## 13

### Межзвездный перелет

При первой встрече профессор Брэнд рассказывает Куперу об экспедициях программы «Лазарь», призванных найти человечеству новый дом. Купер отвечает: «В Солнечной системе нет пригодных для жизни планет, а до ближайшей звезды тысяча лет пути. Это, мягко говоря, бессмысленно. Так куда же вы их отправили, профессор?»

Почему это бессмысленно (если под рукой нет червоточины), ясно, если задуматься, сколь велики расстояния до ближайших звезд (рис. 13.1).

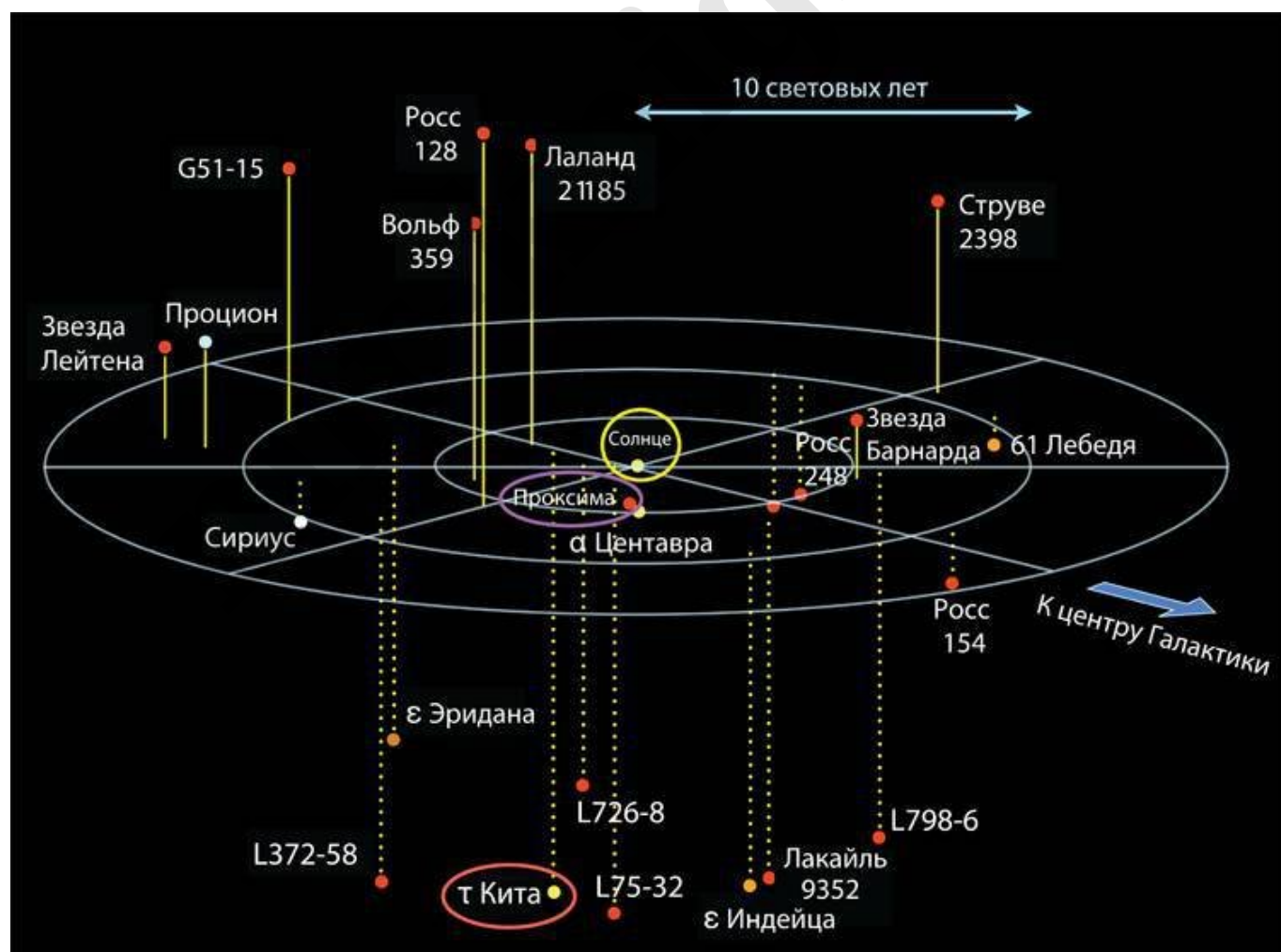


Рис. 13.1. Все звезды в пределах 12 световых лет от Земли. Солнце, проксима Центавра и тау Кита обведены кружками — желтым, фиолетовым и красным соответственно (Слегка

измененная мною карта, взятая у Ричарда Пауэлла, [atlasoftheuniverse.com](http://atlasoftheuniverse.com).)

## Расстояния до ближайших звезд



Ближайшая (не считая Солнца) звезда, в системе которой может найтись планета, пригодная для жизни, — это тау Кита. Она находится в 11,9 светового года от Земли; то есть, путешествуя со скоростью света, до нее можно будет добраться за 11,9 года. Теоретически могут быть пригодные для жизни планеты, которые к нам ближе, но ненамного.

Чтобы оценить, насколько далека от нас тау Кита, прибегнем к аналогии в гораздо меньших масштабах. Представьте, что это расстояние от Нью-Йорка до города Перт в Австралии — примерно половина земной окружности.

Самая близкая к нам звезда (опять же не считая Солнца) — проксима Центавра, 4,24 светового года от Земли, однако нет никаких подтверждений, что рядом с ней могут быть пригодные для жизни планеты. Если расстояние до тау Кита — это расстояние Нью-Йорк — Перт, то расстояние до проксимы Центавра — это Нью-Йорк — Берлин. Немногим ближе, чем тау Кита!

Из всех беспилотных космолетов, запущенных людьми в межзвездное пространство, дальше всего добрался «Вояджер-1», который сейчас находится в 18 световых часах от Земли. Его путешествие длилось 37 лет. Если расстояние до тау Кита — это расстояние Нью-Йорк — Перт, то от Земли до «Вояджера-1» всего три километра: как от Эмпайр-стейт-билдинг до южного края Гринвич-Виллидж. Это гораздо меньше, чем от Нью-Йорка до Перта.

От Земли до Сатурна еще ближе — 200 метров, два квартала от Эмпайр-стейт-билдинг до Парк-авеню. От Земли до Марса — 20 метров, а от Земли до Луны (наибольшее расстояние, на которое до сих пор путешествовали люди) — всего семь сантиметров!

Сравните семь сантиметров с половиной кругосветного путешествия! Теперь понимаете, какой скачок должен произойти в технологиях, чтобы человечество могло покорять планеты за пределами Солнечной системы?

## Скорость полета в XXI веке



«Вояджер-1» (разогнавшись с помощью гравитационных прашей вокруг Юпитера и Сатурна) отдаляется от Солнечной системы со скоростью 17 километров в секунду. В «Интерстеллар» космолет «Эндюранс» путешествует от Земли до Сатурна в течение двух лет, со средней скоростью около 20 километров в секунду. Наибольшая скорость, достижимая в XXI веке при использовании ракетных двигателей в сочетании с гравитационными прашами, составит, на мой взгляд, около 300 километров в секунду.

Если мы отправимся к проксиме Центавра со скоростью 300 километров в секунду, перелет займет 5000 лет, а перелет до тау Кита — 13 000 лет. Что-то долговато.

Чтобы с технологиями XXI века добраться в такую даль побыстрее, нужно что-то наподобие червоточины (см. главу 14).



Хитроумные ученые и инженеры приложили немало стараний, разрабатывая принципы технологий будущего, которые сделали бы полеты с околосветовыми скоростями реальностью. Вы найдете достаточно информации о таких проектах в интернете. Но, боюсь, пройдет не одна сотня лет, прежде чем людям удастся их воплотить в жизнь. Однако они, на мой взгляд, убеждают, что для сверхразвитых цивилизаций путешествия со скоростями от одной десятой скорости света и выше вполне возможны.

Вот три варианта передвижения с околосветовой скоростью, которые мне кажутся особенно интересными<sup>49</sup>.

### Термоядерный синтез



Термоядерный синтез — наиболее популярный из этих трех вариантов. Научно-исследовательские работы по созданию электростанций на основе управляемого термоядерного синтеза были начаты в 1950 году, и полным успехом эти проекты увенчаются не раньше 2050 года. Целый век научно-исследовательских работ! Это кое-что говорит о масштабе сложностей.

Пусть к 2050 году на Земле появятся термоядерные электростанции, но что можно сказать о космических полетах на термоядерной тяге? Двигатели наиболее удачных конструкций смогут обеспечить скорости около 100 километров в секунду, а к концу этого столетия предположительно и до 300 километров в секунду. Однако для околосветовых скоростей понадобится совершенно новый принцип использования термоядерных реакций.

Возможности термоядерного синтеза можно оценить с помощью простых расчетов. Когда два атома дейтерия (тяжелого водорода) сливаются, образуя атом гелия, примерно 0,0064 их массы (при грубом округлении один процент) переходит в энергию. Если преобразовать ее в кинетическую энергию (энергию движения) атома гелия, то атом приобретет скорость в одну десятую от скорости света<sup>50</sup>. Стало быть, если мы сможем преобразовать всю энергию, полученную от синтеза ядерного топлива (дейтерия), в направленное движение космолета, то достигнем скорости около  $c/10$ , а если проявить смекалку — и несколько большей.

В 1968 году Фриман Дайсон, замечательный физик, описал и исследовал примитивную конструкцию космолета на термоядерной тяге, способную — в руках достаточно развитой цивилизации — обеспечить скорости такого порядка.

Термоядерные бомбы («водородные» бомбы) взрываются сразу за полусферическим амортизатором, диаметр которого — 20 километров (рис. 13.2). Взрывы толкают корабль вперед, разгоняя его, по самым смелым оценкам Дайсона, до одной тридцатой скорости света. Более совершенная конструкция может быть способна на большее. В 1968 году Дайсон пришел к выводу, что использовать двигатель такого типа будет возможно не раньше чем в конце XXII столетия, через 150 лет от настоящего момента. Я считаю, что это оценка чересчур оптимистична.

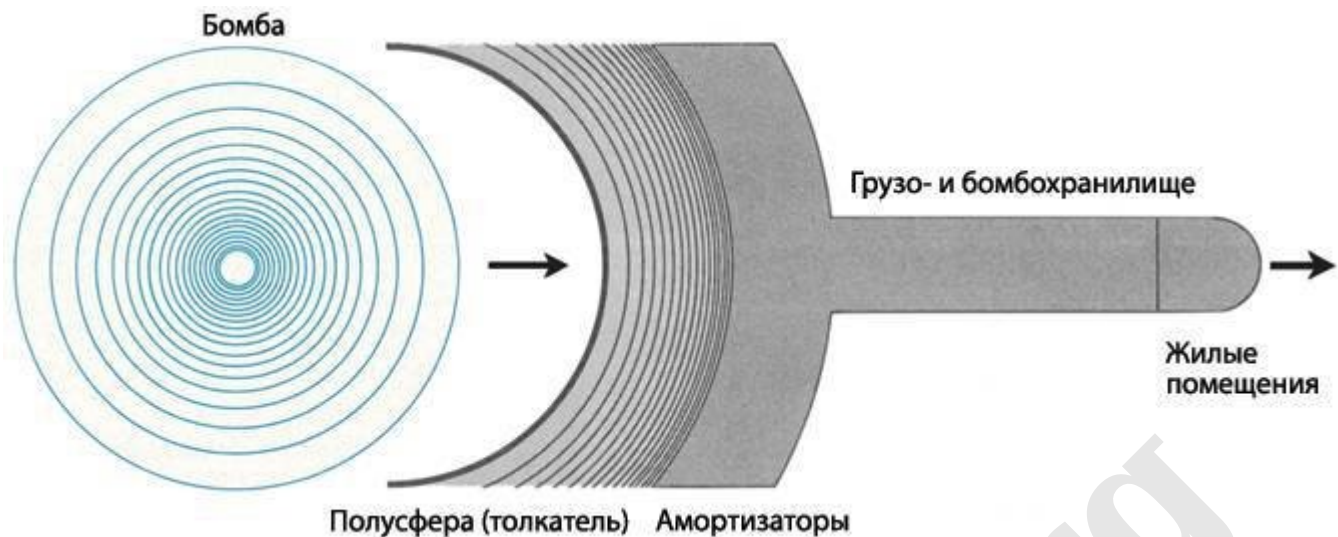


Рис. 13.2. Движимый бомбами космический корабль Фримана Дайсона [Dyson 1968]

### Лазерный луч и световой парус



В 1962 году Роберт Форвард, еще один весьма уважаемый мною физик, написал для научно-популярного журнала статью о космолете с парусом, который приводится в движение выпущенным издалека сфокусированным лазерным лучом [Forward 1962]. В академической статье 1984 года он развил и уточнил эту концепцию (рис. 13.3).

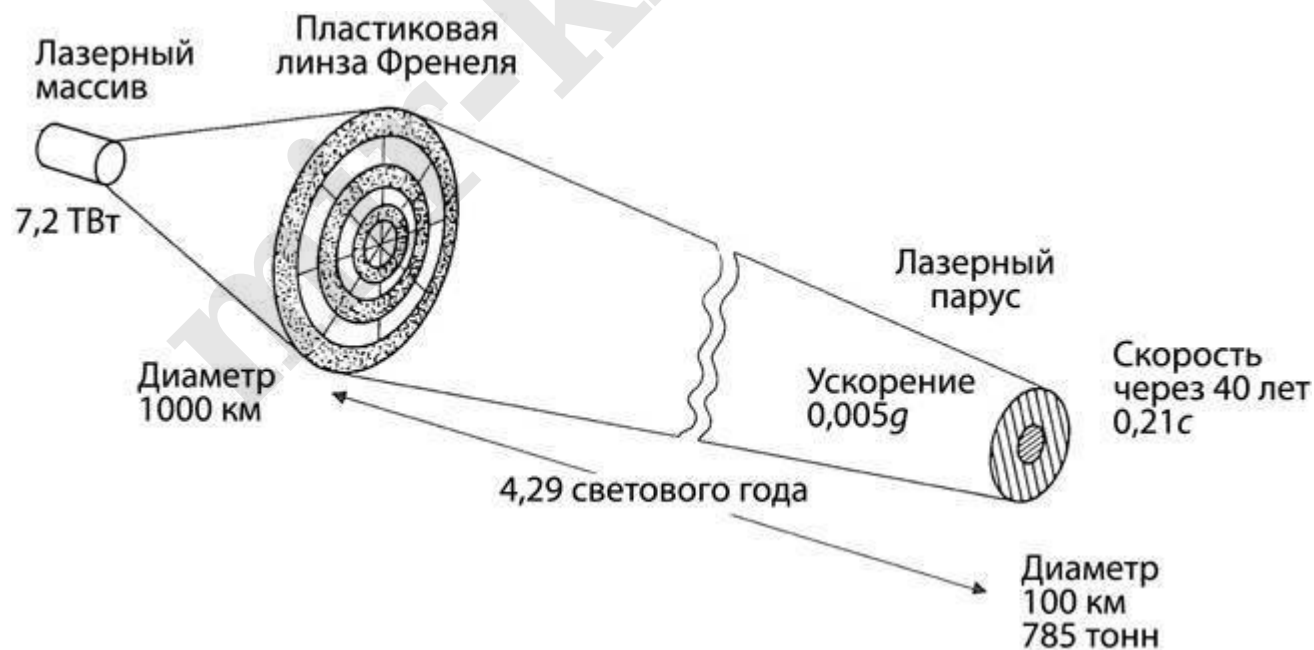


Рис. 13.3. Механизм передвижения с помощью лазерного луча и светового паруса Роберта Форварда [Forward 1984]

Лазерный массив, работающий на солнечной энергии и расположенный в космосе или на Луне, генерирует лазерный луч мощностью в 7,2 тераватта (за год потребляющий примерно вдвое больше, чем общее потребление электричества в США за 2014 год!). С помощью линзы

Френеля диаметром в 1000 километров этот луч фокусируется на парусе диаметром в 100 километров и весом в 1000 тонн, который закреплен на более легком космолете. (Необходимая точность направления луча — до миллионных долей секунды дуги.) Световое давление луча толкает парус и космолет, к половине 40-летнего путешествия до проксимы Центавра разгоняя его примерно до одной четверти от скорости света. Затем, в течение второй половины пути, космолет использует модификацию того же механизма, чтобы замедлиться, и в итоге его скорость оказывается достаточно мала, чтобы совершить посадку на планету (можете придумать, как должно происходить торможение?51).

Форвард, как и Дайсон, считал, что реализовать предложенный им способ передвижения можно будет в XXII веке. Я, глядя на связанные с этим технические сложности, думаю, что времени понадобится больше.

Гравитационные пращи у двойной черной дыры



Третий способ — это моя собственная сумасбродная — крайне сумасбродная! — вариация одной из идей Дайсона [Dyson 1963].

Представьте, что вы решили за несколько лет облететь изрядную часть Вселенной, совершив не просто межзвездное, а межгалактическое путешествие с околосветовой скоростью. Вы можете это сделать с помощью пары черных дыр, вращающихся одна вокруг другой (так называемая двойная черная дыра). У этих дыр должны быть сильно вытянутые эллиптические орбиты, причем достаточно большие, чтобы приливные силы не уничтожили ваш звездолет. Используя химическое или ядерное топливо, вы выводите корабль на орбиту вблизи одной из черных дыр — орбиту раскручивания (рис. 13.4). Корабль приближается к дыре, делает вокруг нее несколько оборотов, а затем в момент, когда дыра движется практически прямо в направлении дыры-спутника, корабль перелетает ко второй дыре и начинает кружиться вокруг нее. Если черные дыры все еще движутся навстречу друг другу (а это продолжается недолго), вы перелетаете обратно к первой дыре. Если же нет, кружение продолжается; нужно оставаться на орбите вокруг второй дыры до тех пор, пока дыры не начнут снова двигаться навстречу друг другу, и лишь тогда отправиться к первой дыре. Таким образом, перелетая от дыры к дыре только в моменты их встречного движения, корабль набирает все большую и большую скорость, которая приближается к скорости света настолько, насколько это вам угодно (при условии достаточно вытянутых орбит двойной дыры).



Рис. 13.4. Звездолет разгоняется до околосветовой скорости

Чтобы контролировать время кружения около каждой из дыр, вам, что примечательно, понадобится лишь небольшое количество ракетного топлива. Главное — выйти на критическую орбиту вокруг дыры и затем начать кружение. О критической орбите я расскажу в главе 27, а пока достаточно отметить, что эта орбита крайне нестабильна. Это напоминает кружение на мотоцикле по гладкой кромке вулканического кратера. Если вы чутко держите равновесие, на кромке можно оставаться сколь угодно долго, но если вы решите съехать с накатанной, достаточно малейшего отклонения руля, чтобы мотоцикл понесся прочь от кратера. Точно так же, если вы решите покинуть критическую орбиту, малейшее усиление ракетной тяги позволит центробежным силам взять верх и отбросить корабль прочь, к другой черной дыре.

Когда скорость звездолета достаточно приблизится к световой, вы можете сойти с критической орбиты и устремиться к далекой галактике, которую выбрали пунктом назначения.



Рис. 13.5. Старт с критической орбиты к далекой-далекой галактике

Путешествие может быть далеким, до 10 миллиардов световых лет. Но когда вы движетесь с околосветовой скоростью, время для вас течет гораздо медленнее, чем на Земле. Если скорость достаточно близка к световой, вы сможете добраться до своей цели за несколько лет, а то и меньше (по вашему персональному времени), а приближаясь к цели, притормозить с помощью другой двойной черной дыры, если вы ее там найдете!



Рис. 13.6. Торможение с помощью гравитационной пращи у двойной черной дыры, находящейся в галактике назначения

Вернуться домой можно тем же способом, правда, возвращение может оказаться не слишком радостным: в вашей галактике пройдут миллиарды лет, хотя вы-то постареете лишь на

несколько лет. Представляете, что вы там обнаружите?

Использование подобных гравитационных пращей дает цивилизации возможность широко распространиться по межгалактическому пространству. Главная (и, возможно, непреодолимая) сложность при этом — поиск или создание подходящих двойных черных дыр. Найти двойную дыру для стартового разгона, быть может, получится без проблем (если цивилизация достаточно высокоразвитая), но двойная дыра для финишного торможения — совсем другое дело.

Что с вами будет, если не найдется подходящей двойной черной дыры для торможения или если вы пролетите мимо нее из-за недостаточно точной наводки? Дополнительные сложности обусловлены здесь расширением Вселенной<sup>52</sup>. Подумайте об этом.

Какими бы привлекательными ни казались все эти технологии будущего, слово «будущее» здесь ключевое. С технологиями XXI века мы неспособны достичь других звездных систем быстрее, чем за тысячи лет пути. Наша единственная, призрачная надежда на межзвездный перелет — это червоточина, как в «Интерстеллар», или еще какая-нибудь предельная форма искривления пространства — времени.

## IV

### ЧЕРВОТОЧИНА



#### Червоточины

Откуда взялось название «червоточина»



Название астрофизическим червоточинам придумал мой научный руководитель Джон Уилер. Он использовал сравнение с червоточинами в яблоках (рис. 14.1). Для муравья, который ползает по яблоку, поверхность яблока — это целая вселенная. Если плод насквозь проеден червем, муравей может попасть с верхней части яблока на нижнюю двумя способами: проползти снаружи (через свою вселенную) или спустившись по червоточине. Путь через червоточину короче, это способ срезать дорогу, быстрее попав с одной стороны муравьиной вселенной на другую.



Рис. 14.1. Муравей исследует яблоко с червоточиной

Аппетитная мякоть яблока, через которую проходит червоточина, не относится к муравьиной вселенной. Это трехмерный балк, или гиперпространство (см. главу 4). С одной стороны, стенки червотчины можно считать частью муравьиной вселенной — их поверхности имеют одну и ту же мерность (два измерения) и смыкаются со вселенной (с поверхностью яблока) на входе в червотчину. Но с другой — стенки червотчины не принадлежат муравьиной вселенной, это просто короткий путь через балк, по которому муравей может попасть из одной точки своей вселенной в другую.

#### Червоточина Фламма



В 1916 году, всего через год после того, как Эйнштейн сформулировал законы общей теории относительности, Людвиг Фламм из Вены нашел решение уравнений Эйнштейна, которое описывает червотчину (хоть Фламм ее так и не называл). Сейчас мы знаем, что уравнения Эйнштейна допускают существование червотчин разной формы и разных свойств, но червоточина Фламма — единственная из них в точности сферическая и не содержащая гравитирующей материи<sup>53</sup>. Если мы сделаем экваториальный срез червотчины Фламма, так чтобы и она, и наша Вселенная (наша брана) имели два измерения вместо трех, а затем посмотрим на нашу Вселенную и на червотчину из балка, то они будут выглядеть как показано на левой части рис. 14.2.

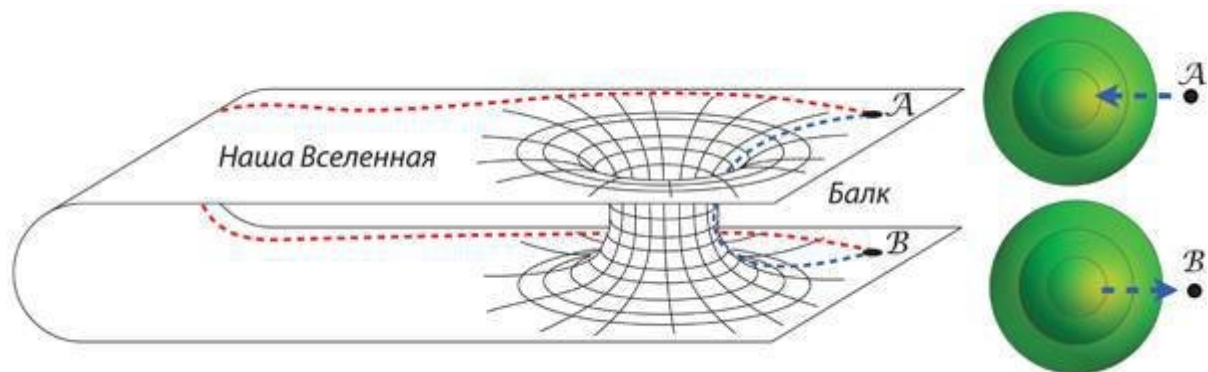


Рис. 14.2. Червоточина Фламма

Поскольку одно из измерений нашей Вселенной на этом рисунке отсутствует, вам следует думать о себе как о двумерном существе, перемещения которого ограничены поверхностью изогнутого «листа» или двумерных стенок червоточины. Есть два способа попасть из пункта А нашей Вселенной в пункт В: короткий путь (синий пунктир) по стенке червоточины и длинный путь (красный пунктир) по поверхности «листа» нашей Вселенной.

Разумеется, пространство нашей Вселенной трехмерно, а не двумерно. И концентрические окружности на левой части рис. 14.2 — это на самом деле вложенные одна в другую зеленые сферы, показанные на правой части рисунка. Войдя в червоточину и двигаясь по идущему от точки А синему пунктиру, вы будете проходить через сферы всё меньшего и меньшего размера. Затем сферы, хоть они и вложены одна в другую, перестанут менять размер. А потом, по мере того как вы будете выбираться из червоточины, приближаясь к точке В, величина сфер начнет расти.

В течение девятнадцати лет физики почти не обращали внимания на экстравагантный вывод из уравнений Эйнштейна, предложенный Фламмом, — на его червоточину. Затем в 1935 году сам Эйнштейн и его коллега, физик Натан Розен, не зная о работах Фламма, самостоятельно пришли к тому же выводу, в подробностях исследовали его и принялись размышлять о его значимости для реального мира. Другие физики, также не зная о решении Фламма, стали называть его червоточину мостом Эйнштейна — Розена.

#### Схлопывание червоточины



Зачастую из уравнений эйнштейновской теории сложно понять, что, собственно, из них следует. Червоточина Фламма — хороший тому пример. С 1916 до 1962 года, почти полвека, физики считали, что червоточины статичны, никогда не меняются. Затем Джон Уилер и его студент Роберт Фуллер выяснили, что это не так. Пристально изучив уравнения, они обнаружили, что червоточины рождаются, расширяются и умирают, как показано на рис. 14.3.

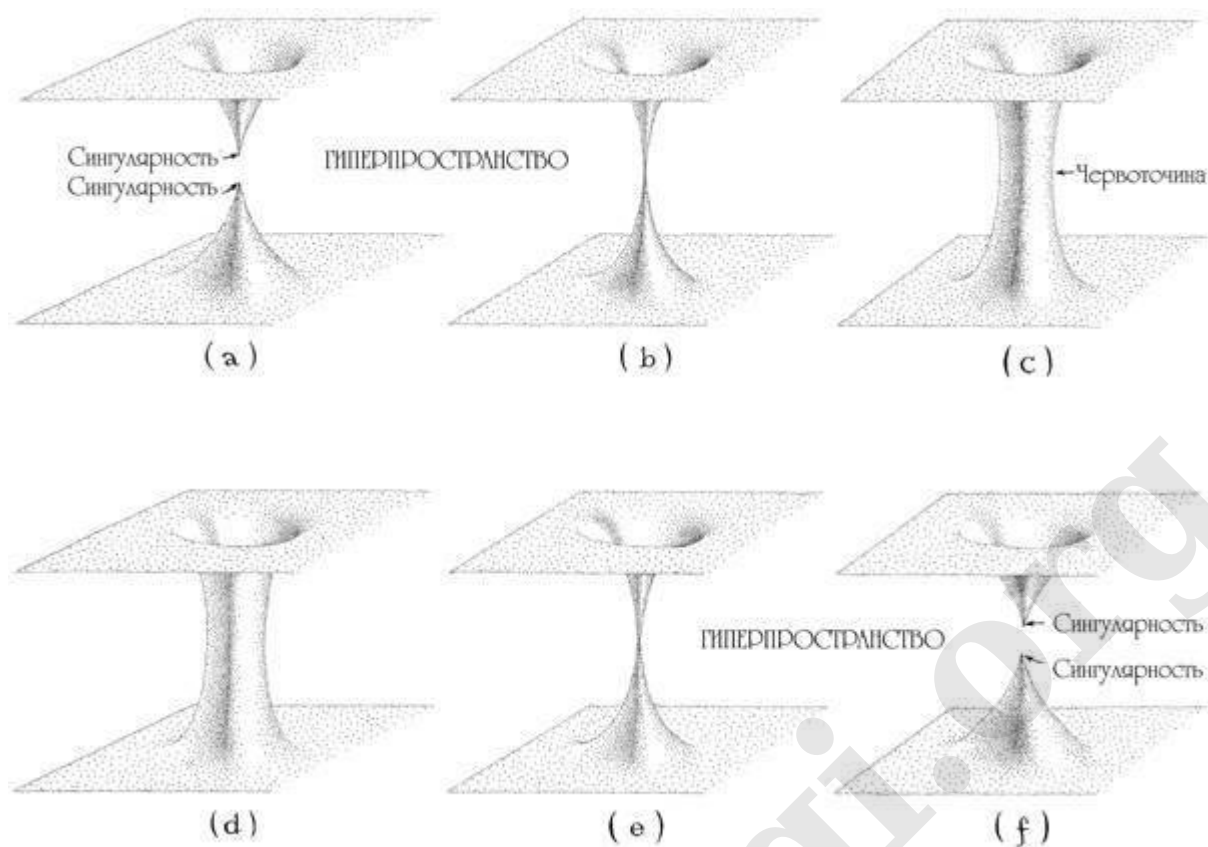


Рис. 14.3. Динамика червотчины Фламма (моста Эйнштейна — Розена) (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из книги [Торн 2009].)

Сначала (a) в нашей Вселенной есть две сингулярности. Со временем сингулярности сближаются через балк и, встретившись, образуют червотчину (b). Червотчина расширяется (c, d), а потом сжимается (e) до тех пор, пока не схлопнется, разделившись на две сингулярности (f). Рождение, расширение, сжатие и схлопывание происходят очень быстро, и ничто — даже свет — не успевает проникнуть по червотчине с одной стороны на другую.

Такой ход событий неизбежен. Если бы во Вселенной когда-либо, каким-либо образом возникла сферическая червотчина, не содержащая гравитирующей материи, она, согласно законам теории относительности, вела бы себя именно так.

Уилер не испугался этих выводов. Напротив, он был доволен, поскольку считал сингулярности (места, где пространство — время искажается бесконечно) «кризисом законов физики». А кризисы многому учат: внимательно их исследуя, можно узнать много ценного.

«Контакт»

И

Перенесемся на четверть века вперед. В мае 1985 года мне позвонил Карл Саган и попросил дать отзыв о его готовящемся к выходу в печать романе «Контакт»<sup>54</sup> в плане соблюдения законов теории относительности. Я с радостью согласился (мы с Карлом близкие друзья, само задание казалось интересным, и к тому же я чувствовал себя обязанным за то, что он познакомил меня с Линдой Обст).

Карл прислал мне рукопись, я прочитал ее, и мне очень понравилось. Но обнаружилась одна

проблема: он отправил свою героиню, доктора Элинор Эрроуэй, из Солнечной системы к звезде Вега через черную дыру. Я знал, что недра черной дыры не могут стать дорогой к Веге, как и к любому другому пункту в нашей Вселенной. Проникнув за горизонт черной дыры, доктор Эрроуэй погибла бы — ее бы убила сингулярность. Чтобы быстро добраться до Веги, требовалась червоточина, а не черная дыра. Но это должна была быть червоточина, которая не схлопывается; проходима червоточина.

Поэтому я спросил себя: что я должен сделать с червоточиной Фламма, чтобы она не схлопывалась, а оставалась открытой и через нее можно было пройти? Ответ подсказал мне несложный мысленный эксперимент. Положим, у нас есть червоточина — сферическая, как червоточина Фламма, но при этом не схлопывающаяся. Пошлем туда, в радиальном направлении, пучок света. Поскольку все лучи света в пучке направлены радиально, форма этого пучка будет такой, как на рис. 14.4. Он сжимается (сужается в поперечнике) при входе в червоточину и расходится (расширяется в поперечнике) при выходе из нее. На выходе червоточина рассеивает лучи, словно линза.

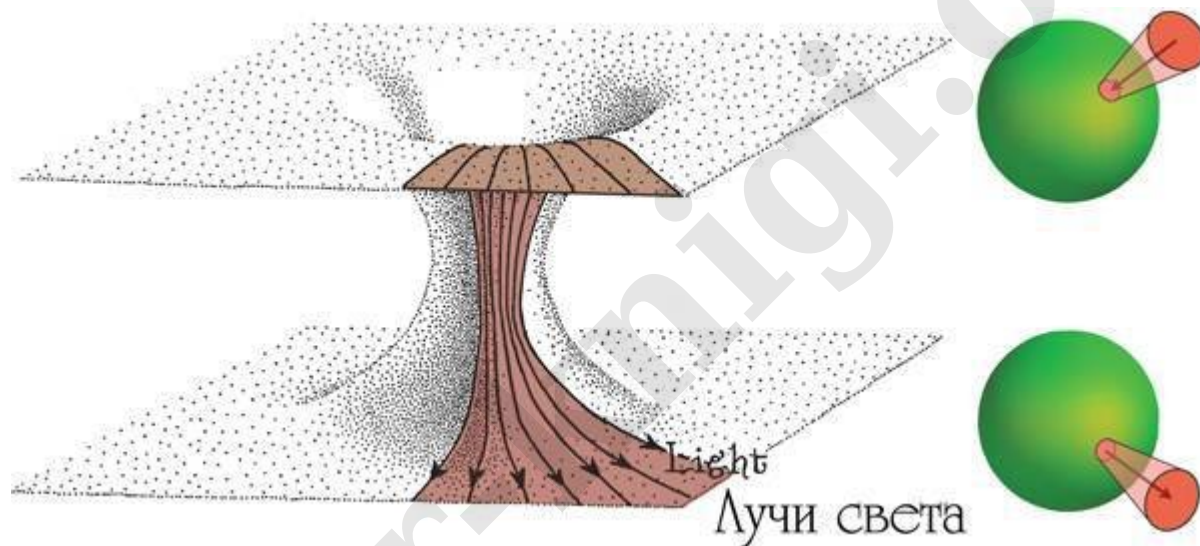


Рис. 14.4. Путь радиального пучка света через проходимую сферическую червоточину. Слева: вид из балка, одно пространственное измерение опущено. Справа: вид из нашей Вселенной (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

Гравитирующие тела, вроде Солнца или черной дыры, сводят лучи (рис. 14.5). Они не могут разводить лучи, поскольку для этого тело должно обладать отрицательной массой (или отрицательной энергией; вспомните, что, по Эйнштейну, масса и энергия эквивалентны). Исходя из этого я сделал вывод, что любая проходима сферическая червоточина должна быть пронизана неким веществом, которое обладает отрицательной энергией. Как минимум энергия этого вещества должна быть отрицательной относительно пучка света или чего угодно еще, что путешествует сквозь червоточину с околосветовой скоростью<sup>55</sup>. Я называю такое вещество «экзотической материей». (Позже я выяснил, что, согласно законам теории относительности, экзотической материей должна быть пронизана любая червоточина, сферическая или нет. Это следует из теоремы, которую в 1975 году доказал Дэннис Гэннон из Калифорнийского университета в Дэвисе и о которой я, увы, не знал.)

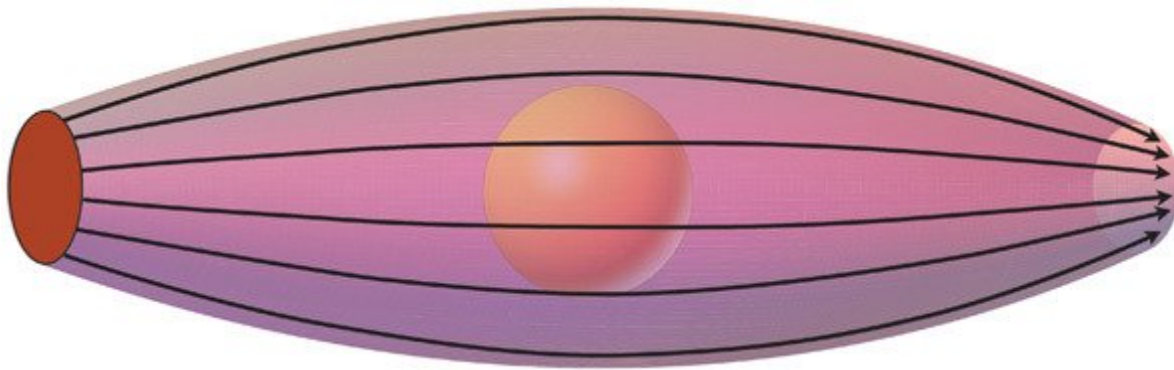


Рис. 14.5. Солнце (или черная дыра) сводит лучи света

Поразительно, что экзотическая материя — благодаря странностям законов квантовой физики — может существовать в действительности. Небольшие ее количества даже можно получить в лабораторных условиях, между двух близко расположенных электропроводящих пластин. Это называется эффектом Казимира. Однако в 1985 году мне было совершенно непонятно, может ли червоточина содержать достаточно экзотической материи, чтобы оставаться открытой. Поэтому я сделал две вещи.

Во-первых, я написал Карлу письмо, где предложил отправить Элиноэр Эрроуэй на Вегу с помощью червоточины, а не черной дыры. К письму я приложил копию вычислений, показывающих, что эта червоточина должна быть пронизана экзотической материей. Карл принял мое предложение (и упомянул о моих расчетах в «Благодарностях» к роману). Так червоточины и проникли в современную научную фантастику — в книги, фильмы и на телевидение.

Во-вторых, я в соавторстве со своими студентами, Марком Моррисом и Улви Яртсевером, опубликовал пару научных статей о проходимых червоточинах. В этих статьях мы предложили нашим коллегам выяснить, допускают ли квантовые и релятивистские законы возможность (для высокоразвитой цивилизации) поместить в червоточину достаточно экзотической материи, чтобы червоточина оставалась открытой. Это дало толчок для всевозможных исследований многих физиков, однако и сегодня, почти тридцать лет спустя, ответ все еще не найден. Многие указывают на то, что ответ отрицательный и проходимых червоточин не может быть. Но мы все еще далеки от окончательного решения. Подробнее об этом рассказано в книге Аллена Эверетта и Томаса Романа «Путешествия во времени и варп-двигатели» [Everett, Roman 2012].

Как выглядит проходимая червоточина



Как выглядит проходимая червоточина для нас с вами, для людей этой Вселенной? Я не могу ответить наверняка. Если червоточину возможно удерживать открытой, точный способ это сделать остается загадкой, поэтому про форму червоточины ничего определенного не скажешь. Другое дело черная дыра. Ее свойства описал Рой Керр, поэтому я и могу сказать о ее виде что-то конкретное (см. главу 8).

Что же касается червоточин, я могу лишь строить обоснованные предположения. Поэтому в заголовке этого параграфа стоит значок

Представьте, что здесь, у нас, на Земле, есть червоточина, которая тянется через балк от Графтон-стрит в Дублине, Ирландия, до пустыни в Южной Калифорнии. Длина пути через червоточину может составить несколько метров.

Вход в червоточину называется устьем. И вот вы сидите в придорожном кафе неподалеку от дублинского устья, а я стою напротив устья в калифорнийской пустыне. Оба устья напоминают хрустальные шары: глядя в калифорнийское устье, я вижу искаженное изображение Графтон-стрит (рис. 14.6). Это изображение сформировано лучами света, прошедшими через червоточину из Дублина в Калифорнию, подобно тому как свет передается по оптоволокну. А вы, посмотрев в дублинское устье, увидите искаженное изображение зарослей гигантской юкки в калифорнийской пустыне.



Устье в пустыне Калифорнии



некуда!

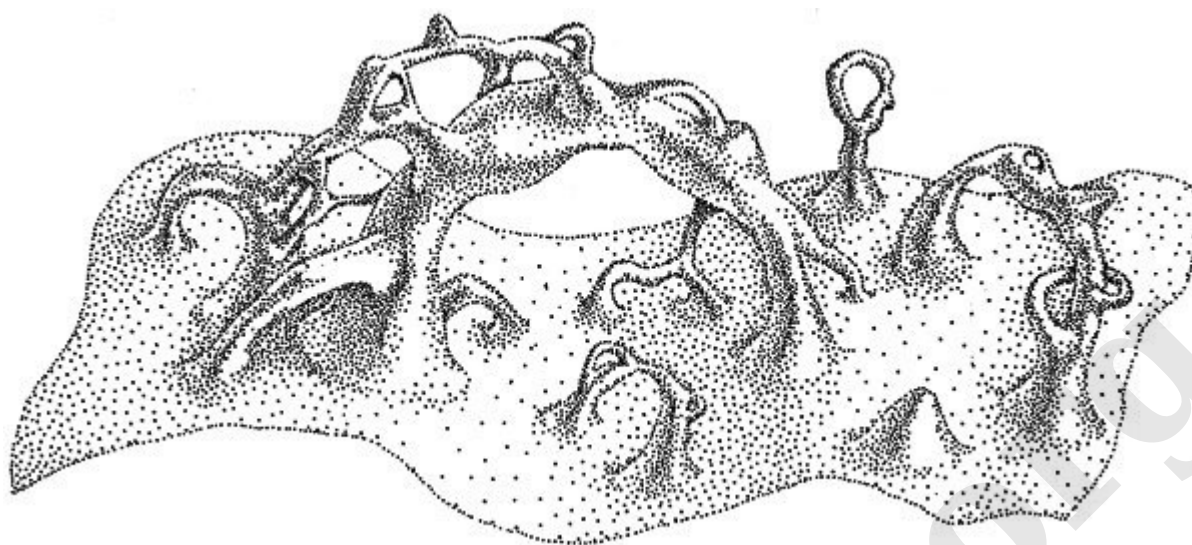


Рис. 14.7. Квантовая пена (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

Еще в пятидесятых Джон Уилер привел убедительные доводы в пользу существования квантовой пены, однако сейчас появились основания считать, что законы квантовой гравитации могут «гасить» пену и даже препятствовать ее возникновению.

Если квантовая пена существует, то есть шанс, что в результате какого-то естественного процесса некоторые из микроскопических червоточин могут самопроизвольно разрастаться до человеческих или больших масштабов и что это происходило даже во время невероятно быстрого «инфляционного» расширения Вселенной — когда Вселенная была очень-очень юна.

Однако нам, физикам, неизвестны какие-либо доказательства или хотя бы намеки на то, что такое естественное разрастание когда-либо происходило или в принципе может происходить.

Есть еще одна слабая надежда на естественное образование червоточин. Возможно, хоть и очень маловероятно, что проходимые червоточины могли образоваться при Большом взрыве, в котором возникла Вселенная. Возможно это по той простой причине, что мы совершенно не понимаем природы Большого взрыва, а маловероятно — поскольку никакие имеющиеся у нас сведения о Большом взрыве не намекают на образование проходимых червоточин.

Может ли сверхразвитая цивилизация создавать червоточины



Единственное, на что я уповаю касательно создания проходимых червоточин, — это вмешательство сверхразвитой цивилизации. Которой, однако, придется для этого преодолеть воистину грандиозные препятствия, так что я настроен пессимистично.

Один из способов создать червоточину — это извлечь ее из квантовой пены (если эта пена существует), увеличить до человеческих масштабов или больше и ввести в нее экзотическую материю, которая будет удерживать червоточину открытой. Сложновато даже для сверхразвитой цивилизации, хотя, возможно, нам так кажется лишь потому, что мы не знаем законов квантовой гравитации, управляющих пеной, извлечением червоточины и ее

увеличением (см. главу 26). И, конечно, ясного представления об экзотической материи у нас тоже нет. На первый взгляд, создать червоточину несложно (рис. 14.8). Просто берешь и продавливаешь часть нашей браны (Вселенной) вниз в балк и получаешь вмятину, потом загибаешь брану в балке, протыкаешь в ней, точно под вмятиной, дырку, протыкаешь другую дырку на дне вмятины и наконец сшиваешь края дырок. Делов-то!

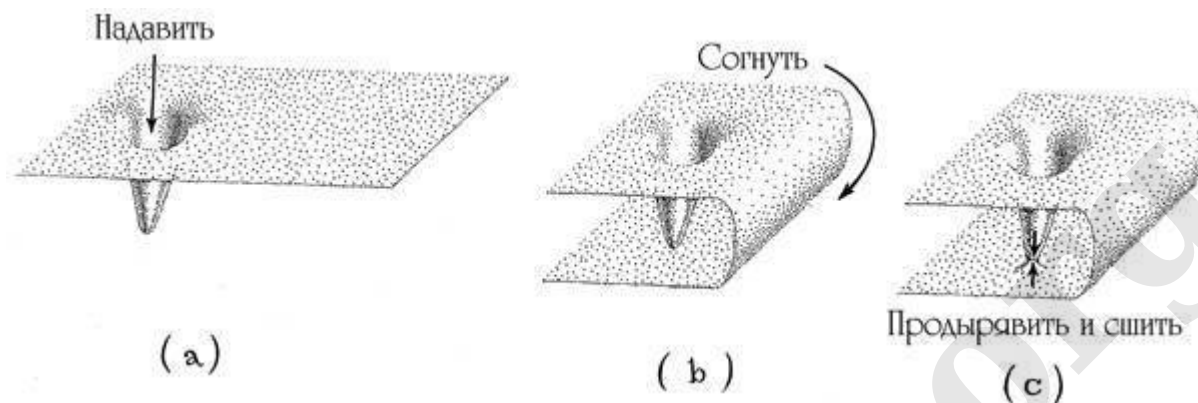


Рис. 14.8. Создание червоточины (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

В «Интерстеллар» Ромилли иллюстрирует этот процесс с помощью листа бумаги и карандаша (рис. 14.9). Какими бы примитивными ни казались эти забавы с карандашом и бумагой, все становится куда серьезней, если лист — это наша брана, а продемонстрированные манипуляции нужно производить из нашей браны усилиями обитающей в ней цивилизации. Говоря начистоту, я понятия не имею, как выполнить все эти операции из нашей браны. За исключением самой первой — создания вмятины (для этого нужно лишь плотное тело значительной массы, например нейтронная звезда). Что касается «дырки», то если проделать ее в нашей бране вообще возможно, это потребует применения законов квантовой гравитации. Теория относительности Эйнштейна не допускает разрывов в бране, так что единственный выход — разорвать брану там, где релятивистские законы не действуют, на почти неизведанной нами территории квантовой гравитации (рис. 3.2).

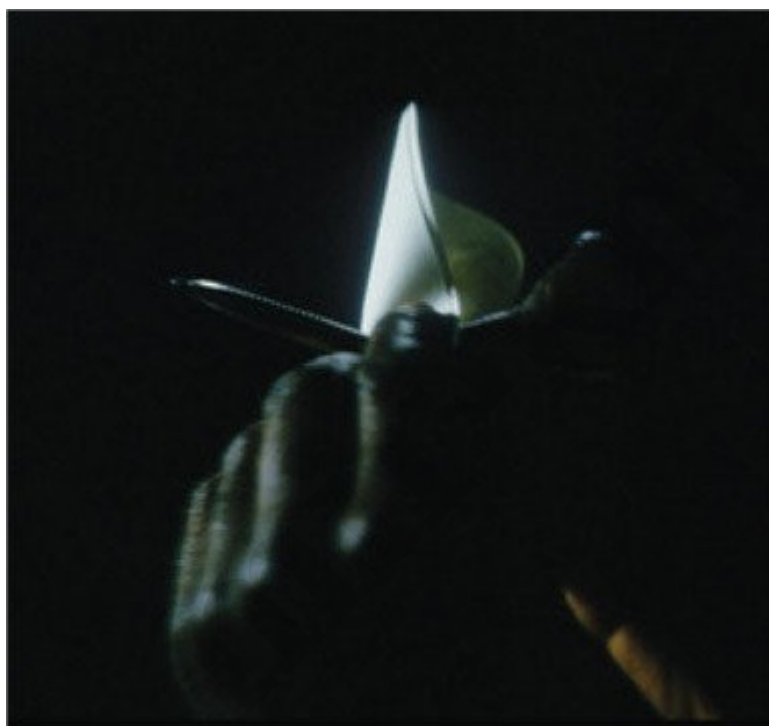


Рис. 14.9. Ромилли рассказывает о червоточинах. Слева: он сгибает лист бумаги. Справа: втыкает карандаш (червоточину) в лист, соединяя две дырки (Кадры из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Подводя итоги



Сомневаюсь, что законы физики допускают существование проходимых червоточин, но, возможно, я чего-то не понимаю. Я могу ошибаться. Если же такие червоточины все-таки

могут существовать, то очень сомневаюсь в возможности их естественного зарождения в астрофизической Вселенной. Единственная надежда — искусственное создание червоточин силами сверхразвитой цивилизации. Но нам совершенно неясно, как такая цивилизация могла бы это сделать. И это выглядит более чем сложным предприятием (по крайней мере из нашей браны) даже для самой что ни на есть развитой цивилизации.

Однако в «Интерстеллар» считается, что червоточину создала, сохранила открытой и разместила возле Сатурна живущая в балке цивилизация, представители которой четырехмерны, как и сам балк.

Это для нас совершеннейшая terra incognita. Тем не менее я расскажу про обитателей балка в главе 22. А пока что давайте поговорим о червоточине в «Интерстеллар».

## 15

Внешний вид червоточины в «Интерстеллар»



В «Интерстеллар» считается, что червоточину создала сверхразвитая цивилизация, скорее всего, обитающая в балке. Поэтому мы с Оливером Джеймсом<sup>56</sup>, создавая инструментарий для компьютерного изображения червоточины, притворялись сверхразвитыми инженерами. Мы полагали, что червоточины допустимы с точки зрения законов физики и что создатели червоточины не испытывали недостатка в экзотической материи. Также мы полагали, что эти создатели могут изгибать пространство и время внутри и вокруг червоточины любым нужным образом. Это крайне смелые допущения, поэтому я отметил эту главу значком



— домысел.

Гравитация червоточины и искривление времени

Кристофер Нолан хотел, чтобы червоточина обладала умеренной гравитацией. Достаточно сильной, чтобы удерживать «Эндюранс» на своей орбите, но достаточно слабой, чтобы «Эндюранс», замедлившись, мог безопасно упасть в червоточину. Это значит, что ее гравитационное притяжение гораздо слабее земного.

Из эйнштейновского закона искривления времени следует, что замедление времени внутри червоточины пропорционально силе ее гравитационного притяжения. Если притяжение слабее земного, то и замедление времени будет меньше, чем на Земле, — всего лишь одна миллиардная, то есть одна секунда на 30 лет. Это настолько мало, что мы с Оливером решили вообще не учитывать замедление времени.

«Ручки настройки»

Последнее слово по поводу того, как будет выглядеть червоточина, оставалось за Кристофером Ноланом и Полом Франклином (главным по спецэффектам). От меня же требовалось дать Оливеру и его коллегам из Double Negative «ручки настройки», то есть параметры, изменяя которые, они могли влиять на вид червоточины. Затем они сгенерировали изображения

червоточины для различных положений «ручек» и показали варианты Крису и Полу, и те выбрали самый привлекательный.

Я снабдил червоточину тремя «ручками» — тремя параметрами, влияющими на ее вид (рис. 15.1).

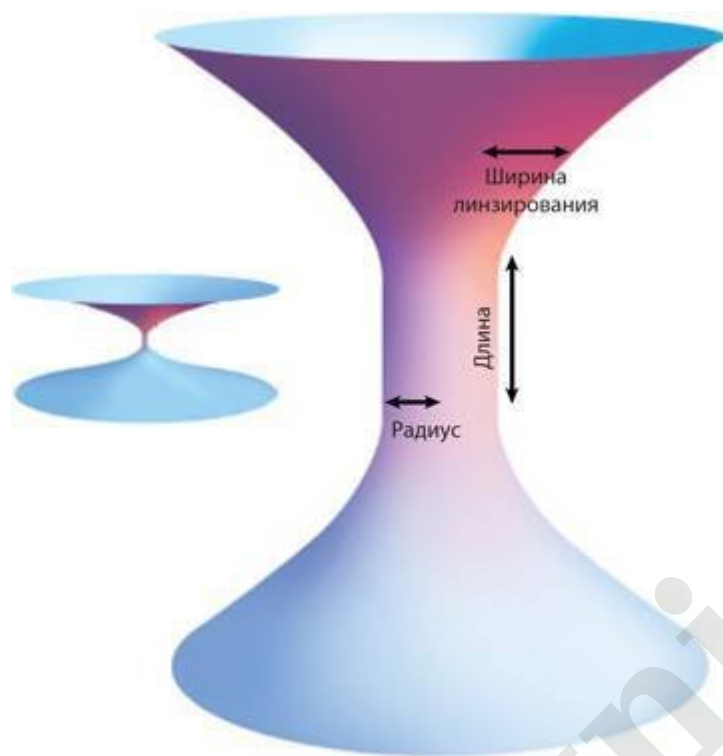


Рис. 15.1. Червоточина при взгляде из балка и три «ручки настройки» (Слева — та же червоточина в балке, но на большем отдалении, благодаря чему видна ее «расширенная версия».)

Первая «ручка» — это радиус червоточины, как мог бы его измерить обитатель балка (аналогично радиусу Гаргантюа). Умножив радиус на  $2\pi = 6,28318...$ , мы получим размер червоточины в окружности, как мог бы его измерить Купер, пилотируя «Эндюранс» вблизи червоточины или пролетая сквозь нее. Радиус был выбран Крисом заранее: он хотел, чтобы гравитационное линзирование звездного неба вблизи червоточины было едва заметно с Земли даже при использовании лучших телескопов, имевшихся на данный момент у NASA. Это определило величину радиуса — примерно километр.

Вторая «ручка» — длина червоточины, которая будет одинаковой и для Купера, и для обитателей балка.

Третья «ручка» определяет, насколько сильно червоточина линзирует свет от объектов позади нее. Особенности линзирования определяются формой пространства вблизи устьев червоточины. Я сделал ее похожей на форму пространства снаружи горизонта невращающейся черной дыры, всего с одним регулируемым параметром — шириной области, в которой происходит сильное линзирование. Я назвал это шириной линзирования<sup>57</sup> (см. рис. 15.11).

Как «ручки настройки» влияют на внешний вид червоточины

Так же как в случае с Гаргантюа (см. главу 8), я воспользовался законами теории

относительности, чтобы вывести уравнения для траекторий световых лучей, проходящих вблизи червотчины и сквозь нее, и разработал процедуру манипулирования моими уравнениями, позволяющую рассчитывать гравитационное линзирование и в итоге получать кадры, которые могла бы снять камера, вращающаяся по орбите вокруг червотчины или летящая сквозь нее. Убедившись, что изображения, полученные с помощью этой процедуры, соответствуют моим ожиданиям, я отослал их Оливеру, и он написал компьютерную программу для генерации высококачественных IMAH-изображений. Эжени фон Танзелманн добавила фоновое звездное поле и астрономические объекты, которые должна была линзировать червотчина. Затем Эжени, Оливер и Пол принялись изучать, как на изображение влияют мои «ручки настройки». Я же проводил собственные исследования, независимо от них.

Эжени любезно предоставила изображения (рис. 15.2 и 15.4), где показано, как выглядит Сатурн, если смотреть на него через червотчину. (Качество изображений Эжени гораздо выше, чем позволяют мои скромные возможности.)



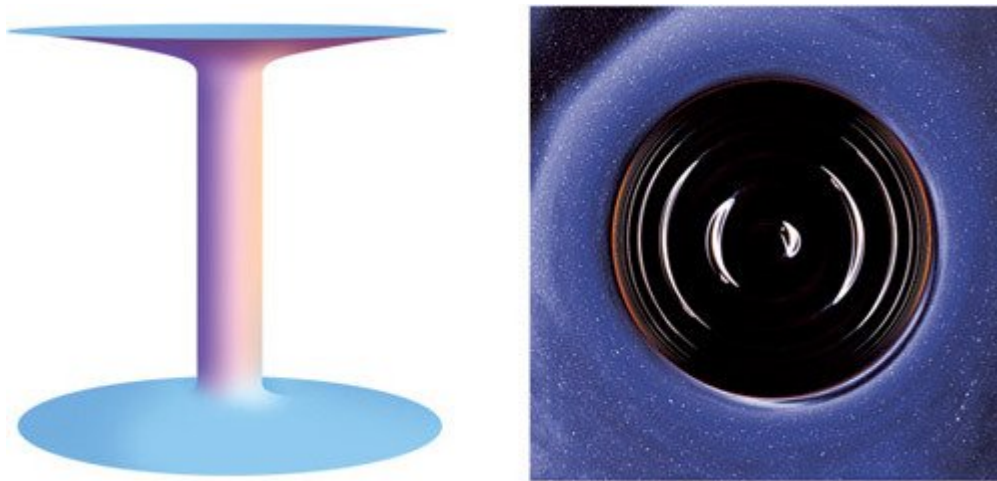


Рис. 15.2. Слева: три варианта червоточины с маленькой шириной линзирования (всего пять процентов от радиуса червоточины), вид из балка. Справа: то, что видит камера. Сверху вниз длина червоточины увеличивается: 0,01, 1 и 10 радиусов червоточины (Модели выполнены командой Эжени фон Танзелманн с помощью программы Оливера Джеймса, основанной на моих уравнениях.)

### Длина червоточины

Сначала мы рассмотрим, как влияет на изображение длина червоточины с небольшим линзированием (маленькой шириной линзирования): см. рис. 15.2.

Если червоточина короткая (верхняя часть рисунка), камера видит в червоточине искаженное изображение Сатурна — первичное изображение, расположенное в правой половине «хрустального шара». Можно разглядеть и очень тонкое, дугообразное вторичное изображение с другого края «хрустального шара». (Дуга справа внизу — не Сатурн, а искаженное изображение окружающей планету Вселенной.)

По мере увеличения длины червоточины (рис. 15.2, посередине) первичное изображение уменьшается и сдвигается к центру, вторичное изображение также сдвигается к центру, а с правой стороны «хрустального шара» появляется очень тонкое дугообразное третичное изображение.

С дальнейшим увеличением длины (рис. 15.2, снизу) первичное изображение сжимается еще больше, все изображения сдвигаются к центру, с левой стороны «хрустального шара» возникает изображение четвертого порядка, с правого — пятого и т. д.

Чтобы понять, почему это происходит, можно нарисовать траектории лучей света возле червоточины (вид из балка): рис. 15.3. Первичное изображение приходит в камеру пучком световых лучей, идущих от Сатурна по кратчайшему из возможных путей; один из лучей этого пучка изображен на рисунке черной линией (1). Вторичное изображение достигает камеры с пучком, в который входит красный луч (2); этот пучок проходит вдоль стенки червоточины в направлении, противоположном направлению черного луча, закручиваясь влево, против часовой стрелки — по кратчайшему из возможных левовращающихся путей от Сатурна до камеры. Третичное изображение приходит с пучком зеленого луча (3), по кратчайшему из возможных правовращающихся путей, делающих больше одного оборота вдоль стенки червоточины. И, наконец, изображение четвертого порядка приходит с пучком коричневого луча (4), по кратчайшему из возможных левовращающихся путей, делающих более одного оборота вдоль стенки червоточины.

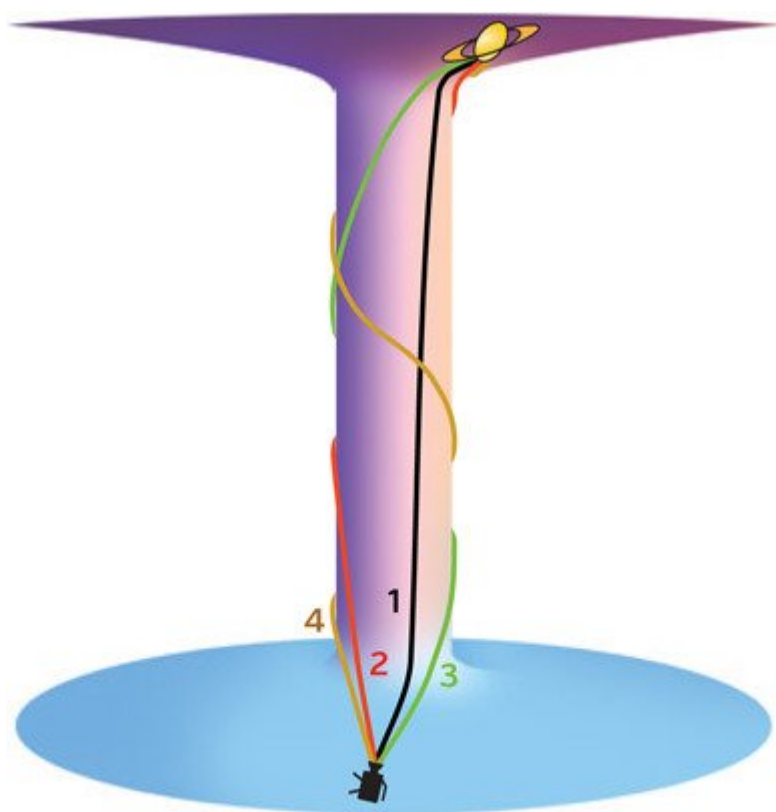
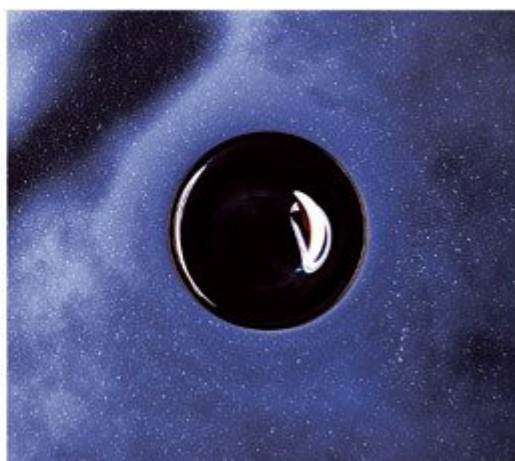


Рис. 15.3. Лучи света, идущие от Сатурна в камеру через червоточину

Можете объяснить, как приходят в камеру изображения пятого и шестого порядка? Почему по мере удлинения червоточины изображения уменьшаются? И почему изображения появляются с края «хрустального шара», а сдвигаются к центру?

#### Ширина линзирования червоточины

Разобравшись, как длина червоточины влияет на кадр, мы оставим длину постоянной и весьма небольшой — равной радиусу червоточины — и займемся варьированием гравитационного линзирования. Мы увеличивали ширину линзирования от почти нулевой до примерно половины радиуса червоточины и следили, какой эффект это оказывает на изображение. На рис. 15.4 показаны два крайних случая.



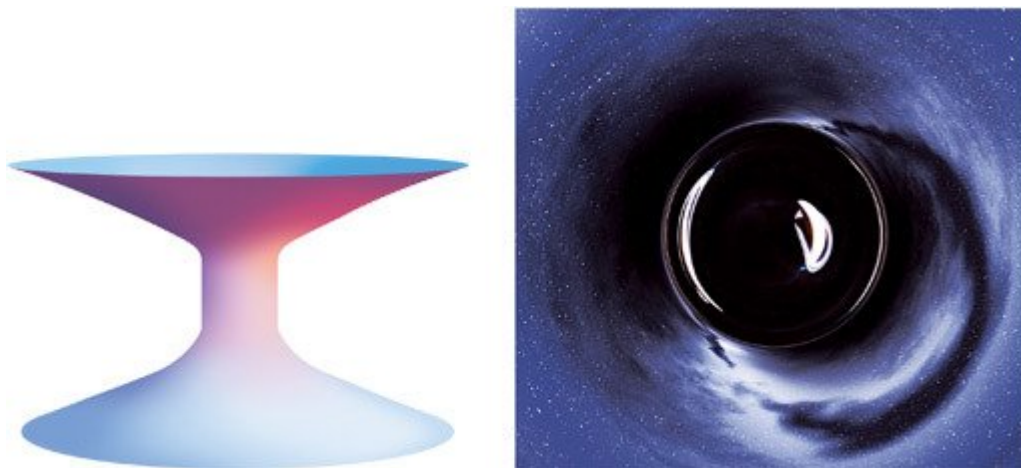


Рис. 15.4. Гравитационное линзирование звездного поля и Сатурна червоточиной для двух значений ширины линзирования: 0,014 (сверху) и 0,43 (снизу) радиуса червоточины (Модели выполнены командой Эжени фон Танзелманн с помощью программы Оливера Джеймса, основанной на моих уравнениях.)

Когда ширина линзирования очень мала, форма червоточины (см. сверху слева) такова, что виден резкий переход от внешней Вселенной (растянутые по горизонтали раструбы) к горловине червоточины (вертикальный цилиндр). Для камеры (см. сверху справа) червоточина искажает звездное поле и темное облако в левом верхнем углу лишь чуть-чуть и только вблизи края червоточины. Не считая этого, червоточина попросту заслоняет звездное поле от наблюдателя, как делает это любое непрозрачное тело со слабой гравитацией, например планета или звездолет. В нижней части рис. 15.4 ширина линзирования равна примерно половине радиуса червоточины, поэтому переход от горловины (вертикальный цилиндр) к внешней Вселенной (растянутые по горизонтали раструбы) стал более плавным.

При такой большой ширине линзирования червоточина сильно искажает звездное поле и темное облако (см. снизу справа) примерно таким же образом, как это делает невращающаяся черная дыра (рис. 8.3 и рис. 8.4), с образованием множественных изображений. Также линзирование увеличивает вторичное и третичное изображения Сатурна. На втором кадре червоточина выглядит больше, чем на первом, — она занимает больший угол обзора камеры. Это происходит не потому, что камера находится ближе к устью, — данное расстояние одинаково для обоих случаев. Причина видимого увеличения исключительно в гравитационном линзировании.

#### Червоточина в «Интерстеллар»

Когда Крис смог оценить варианты с различной длиной червоточины и шириной линзирования, его выбор был однозначен. Множественные изображения, видимые в червоточине при средней и большой длине, могли сбить с толку массового зрителя, поэтому Крис сделал червоточину в «Интерстеллар» очень короткой, длиной лишь в один процент от ее радиуса. И он выбрал умеренную ширину линзирования, около пяти процентов от радиуса, чтобы линзирование окружающего звездного поля было заметным и затейливым, но значительно меньшим, чем линзирование Гаргантюа.

Выбранная для фильма червоточина — верхняя из показанных на рис. 15.2. И после того как команда Double Negative создала для нее фон (туманности, пылевые облака, звезды), вид получился просто потрясающий (рис. 15.5). На мой взгляд, это одна из самых впечатляющих сцен в фильме.

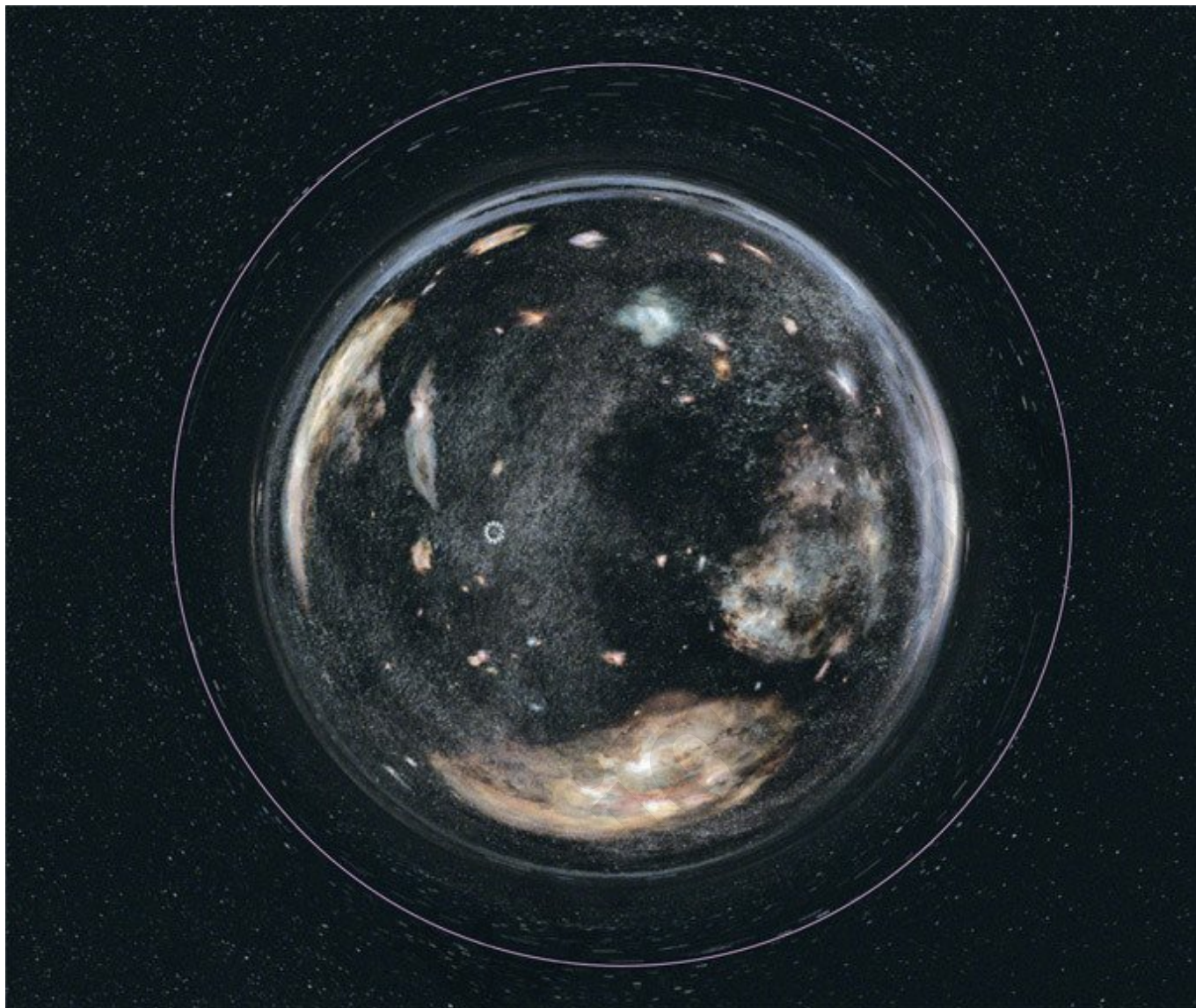


Рис. 15.5. Червоточина, как она показана в трейлере фильма. Перед червоточиной, ближе к центру, виден «Эндюранс». Фиолетовая окружность, которой я обвел червоточину, обозначает кольцо Эйнштейна, подобное кольцу на рис. 8.4 для невращающейся черной дыры. Первичные и вторичные изображения линзированных звезд здесь движутся таким же образом, как на рис. 8.4. Можете, посмотрев трейлер, проследить эти движения? (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

### Путешествие через червоточину

10 апреля 2014 года, когда уже шла послесъемочная обработка фильма, мне позвонил Крис. У него возникли сложности со сценой полета «Эндюранс» через червоточину, и ему срочно нужен был совет. Я приехал в «Синкопи», и Крис показал мне, в чем проблема.

Используя мои уравнения, Пол и его команда сгенерировали изображения полета через червоточину для различных значений ее длины и ширины линзирования. Для короткой червоточки с умеренным линзированием, фигурирующей в фильме, полет оказался слишком быстрым и неинтересным. В случае длинной червоточки полет напоминал путешествие по вытянутому тоннелю с проносящимися мимо стенами — а подобное уже не раз показывали в других фильмах. Крис показал мне много вариантов, с различными эффектами и добавками, и мне пришлось признать, что все они лишены притягательной оригинальности, к которой он

стремился. Я вернулся домой и, размышляя, лег в постель, но и наутро решение не пришло мне в голову.

На следующий день Крис отправился в Лондон и продолжил искать решение вместе с Полом. В конце концов им пришлось отказаться от моих уравнений и, как выразился Пол, «выбрать гораздо более абстрактную интерпретацию внутренностей червоточины» — интерпретацию, которая хоть и отталкивалась от моделей, полученных на основе моих уравнений, но существенно отличалась от них.

Когда я увидел полет через червоточину на раннем просмотре фильма, мне понравилось. Хоть и без особой научной точности, но в целом сцена соответствовала духу настоящего полета через червоточину, а главное — выглядела самобытно и так, что дух захватывает. А какие впечатления остались у вас?

16

Обнаружение червоточины: гравитационные волны

И

Как люди в «Интерстеллар» могли обнаружить червоточину? У меня как физика есть любимая версия, о которой я сейчас поведаю, выйдя за рамки непосредственных событий «Интерстеллар». Разумеется, эта лишь мои догадки, Кристофер Нолан тут ни при чем.

ЛИГО засекает всплеск гравитационных волн

В Кип-версии (позволю себе пофантазировать) за несколько десятилетий до начала событий фильма двадцатилетний Брэнд работал заместителем у директора проекта под названием ЛИГО (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — Лазерно-интерферометрическая гравитационноволновая обсерватория); см. рис. 16.1. Задачей ЛИГО было отслеживать в структуре пространства «рябь», которая доходит до Земли из отдаленных участков Вселенной. Эта рябь, которую называют гравитационными волнами, возникает, например, при столкновении черных дыр, или когда черная дыра разрывает на части нейтронную звезду, или в момент зарождения Вселенной, а также во многих других случаях.



Рис. 16.1. Сверху: аэрофотоснимок детектора гравитационных волн ЛИГО в Хэнфорде, Вашингтон. Снизу: центр управления ЛИГО, откуда отправляют команды детектору и следят за полученными сигналами

Однажды, в 2019 году, в ЛИГО зарегистрировали самый сильный всплеск гравитационных волн за всю историю проекта (рис. 16.2). Волны колебались с амплитудой, которая несколько раз нарастала и спадала, а затем внезапно затихли. Этот всплеск длился лишь несколько секунд.

Сравнивая форму волн (рис. 16.2) с моделированием на суперкомпьютерах, профессор Брэнд и его команда сделали вывод об источнике этих колебаний.

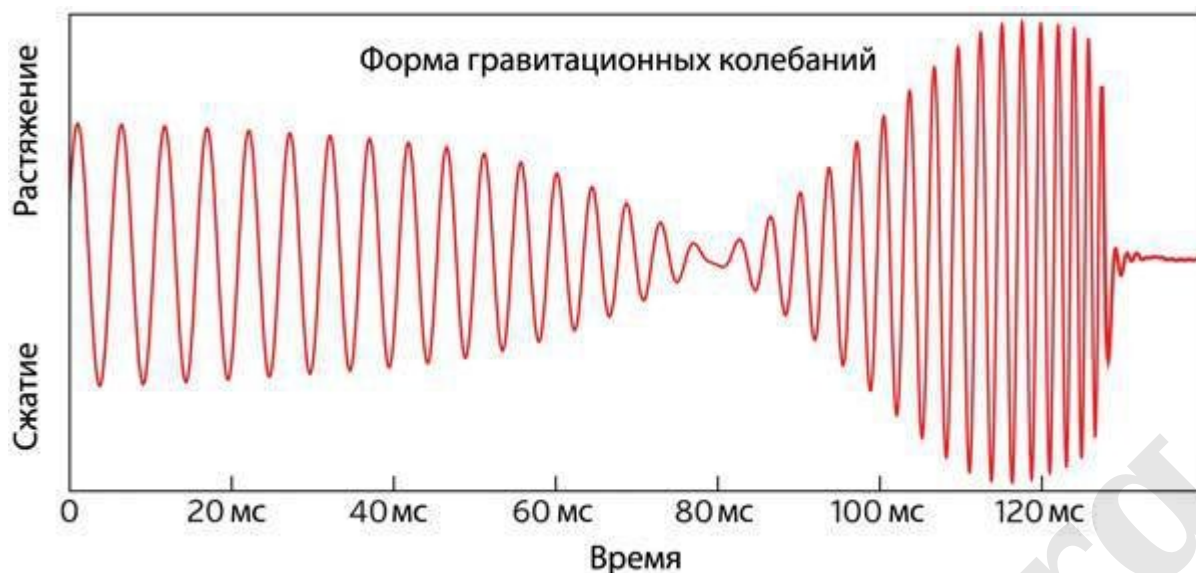


Рис. 16.2. Последние 120 миллисекунд (мс) гравитационных колебаний, зарегистрированных в ЛИГО (График, построенный мной на основе моделирования Янбея Чена, Фукара и других (2011).)

#### Нейтронная звезда на орбите вокруг черной дыры

Волны исходили от нейтронной звезды, вращающейся вокруг черной дыры. Звезда весила в 1,5 раза больше Солнца, а черная дыра — в 4,5 раза больше Солнца, при этом дыра быстро вращалась. Образованный этим вращением пространственный вихрь захватил орбиту звезды, заставляя ее медленно прецессировать<sup>58</sup>. Прецессия стала модулировать волны, что привело к изменениям их амплитуды (рис. 16.2).

Волны расходились по вселенной, унося с собой энергию (рис. 16.3). По мере того как энергия звезды истощалась, звезда медленно, по спирали, приближалась к черной дыре. Когда дистанция между звездой и дырой сократилась до 30 километров, приливная гравитация дыры разорвала звезду на части. 97 процентов останков звезды угодило в черную дыру, а оставшиеся три процента выбросило наружу с образованием струи раскаленного газа. Затем черная дыра притянула этот газ к себе, и он перешел в аккреционный диск.



Рис. 16.3. Гравитационные волны, исходящие от черной дыры и звезды на ее орбите, вид из балка (Рисунок художника из ЛИГО по моему наброску.)

На рис. 16.4 показан результат компьютерного моделирования последних миллисекунд жизни звезды. За 10 миллисекунд до конца черная дыра вращается вокруг оси, обозначенной красной стрелкой, а звезда движется по орбите вокруг вертикальной (относительно рисунка) оси. За четыре миллисекунды до конца тендекс-линии черной дыры разрывают звезду на части. За две миллисекунды до конца пространственный вихрь черной дыры выбрасывает останки звезды наружу в экваториальной плоскости. В конце из останков начинает формироваться аккреционный диск.

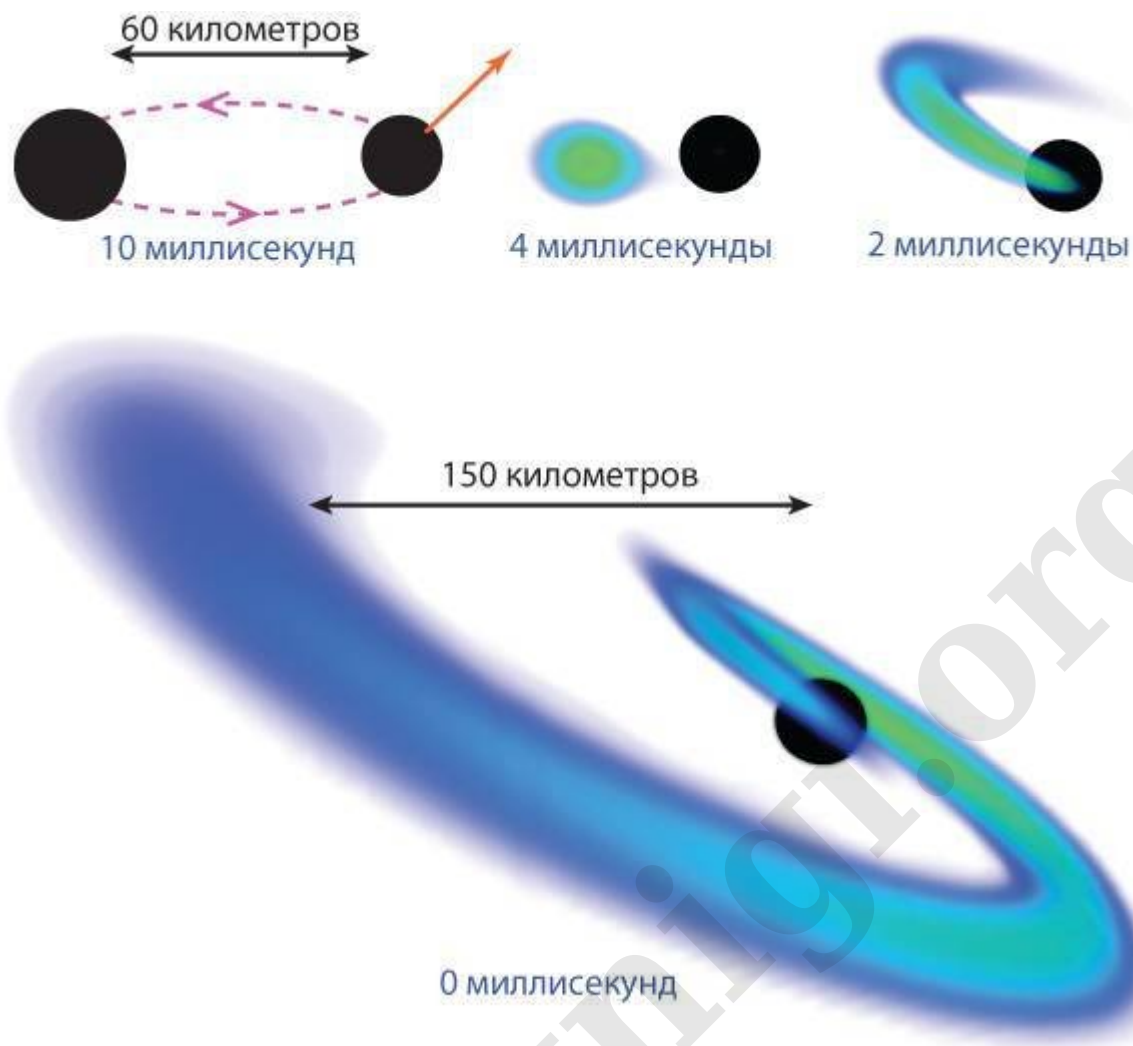


Рис. 16.4. Последние миллисекунды жизни нейтронной звезды (Модель Франсуа Фукара и коллег, см. [black-holes.org](http://black-holes.org).)

### Обнаружение червоточины

Просматривая данные, собранные ЛИГО за два последних года, профессор Брэнд и его команда обнаружили очень слабые волны, исходящие от нейтронной звезды. На звезде была мини-возвышенность высотой всего лишь в сантиметр и шириной в несколько километров (предполагается, что такие возвышенности не редкость). При вращении звезды эта возвышенность тоже вращалась, порождая волны, колеблющиеся слабо, но постоянно, день за днем.

Внимательно исследуя эти волны, профессор Брэнд выяснил, откуда они исходят. Ответ был совершенно невероятным — источник волн находился где-то на орбите вокруг Сатурна! И он всегда оставался вблизи Сатурна, как бы ни перемещались по своим орбитам Сатурн и Земля!

Нейтронная звезда около Сатурна? Невозможно! Черная дыра рядом с нейтронной звездой, и обе вращаются вокруг Сатурна? Более чем невозможно! Сатурн бы давным-давно разрушился от такого соседства. Кроме того, гравитация дыры и нейтронной звезды давно сместила бы орбиты всех планет Солнечной системы, включая Землю. Со смещенной орбитой Земля то приближалась бы к Солнцу, то отдалялась бы от него — а мы бы все поджарились, замерзли и вымерли.

И все же волны определенно исходили из окрестностей Сатурна.

Профессор Брэнд видел этому лишь одно объяснение: волны идут из червоточины, которая вращается вокруг Сатурна. А источники волн — черная дыра и нейтронная звезда — находятся по другую сторону этой червоточины (рис. 16.5). Волны расходятся от звезды и от дыры, небольшая их часть попадает в червоточину, проходит сквозь нее, распространяется по Солнечной системе и частично достигает Земли, где находится детектор гравитационных волн ЛИГО.



Рис. 16.5. Гравитационные волны, идущие от червоточины к Земле

Об этой части киносценария

В краткой форме эта история (или предыстория) присутствовала в нашей с Линдой сценарной заявке к «Интерстеллар», написанной еще в 2006 году. Однако гравитационные волны не играли особой роли ни в сценарной заявке, ни в более позднем сценарии, который написал Джона и переработал Крис. И без гравитационных волн объем сложного для понимания материала в фильме был слишком велик. Поэтому, когда Крис искал способы упростить сценарий, гравитационные волны стояли на вылет первыми. И Крис от них избавился.

Лично я тяжело переживал это решение Криса. Я был одним из основателей проекта ЛИГО в 1983 году (вместе с Райнером Вайсом из Массачусетского технологического института и Рональдом Дривером из Калтеха). Я сформулировал научные позиции ЛИГО и два десятка лет упорно работал, помогая воплотить этот проект в жизнь. Сейчас проект ЛИГО близок к готовности, и уже в этом десятилетии ожидается первая регистрация гравитационных волн.

Но аргументы Криса были столь очевидны, что я и не вздумал протестовать.

Гравитационные волны и детекторы волн

А теперь, прежде чем продолжить разговор об «Интерстеллар», я позволю себе удовольствие рассказать еще немного о гравитационных волнах.

На рис. 16.6 — художественное изображение тендекс-линий двух черных дыр, которые вращаются по орбитам друг вокруг друга, против часовой стрелки, и затем сталкиваются. Напоминаю, что тендекс-линии порождают приливную гравитацию (см. главу 4). Линии, которые исходят из двух наиболее удаленных друг от друга точек на поверхностях пары черных дыр, растягивают все на своем пути, включая попавшую на рисунок подружку художницы. Линии же, исходящие из области столкновения, все сжимают. Когда дыры вращаются одна вокруг другой, они увлекают следом свои тендекс-линии, которые похожи на струи воды из

крутящейся поливалки на газоне.

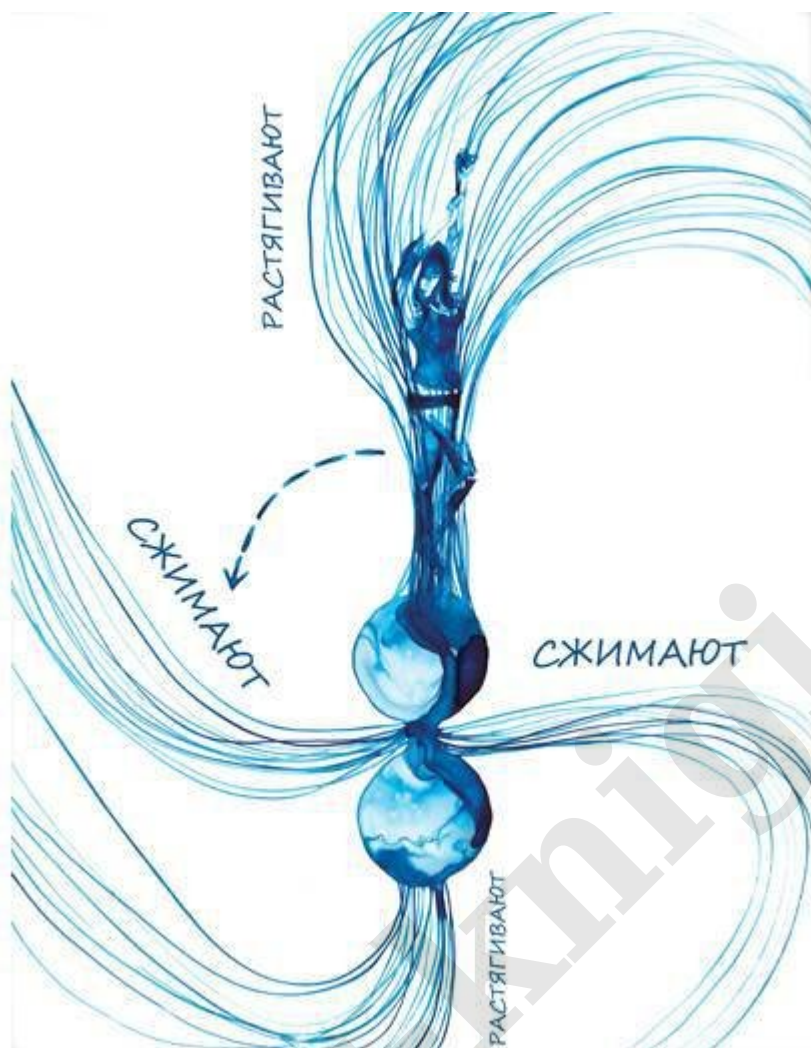


Рис. 16.6. Пара черных дыр, которые сталкиваются, вращаясь одна вокруг другой против часовой стрелки, и их тендекс-линии (Рисунок Лии Хэллоран.)

Черные дыры объединяются в одну большую дыру; она деформирована и вращается против часовой стрелки, увлекая за собой тендекс-линии. Тендекс-линии выходят наружу, будто струи воды из поливалки, образуя сложный узор: см. рис. 16.7. Красные линии — растягивающие, синие — сжимающие.

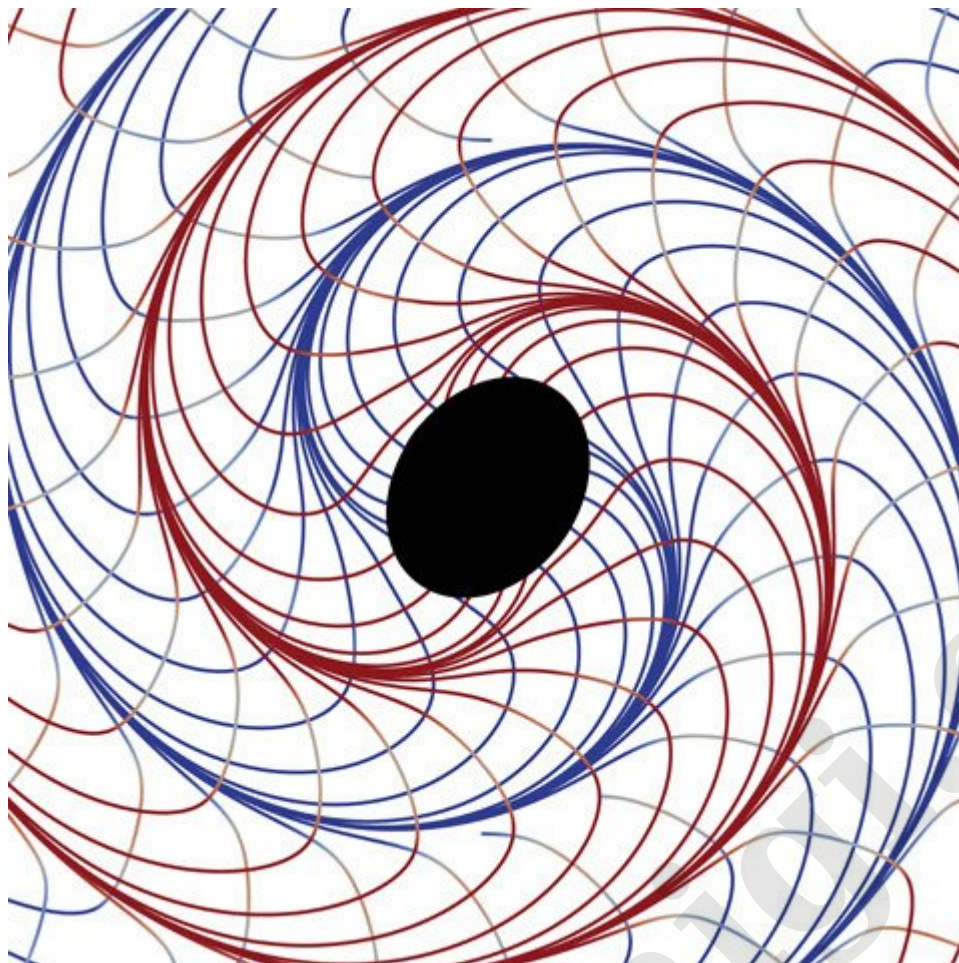


Рис. 16.7. Тендекс-линии вращающейся деформированной черной дыры (Рисунок Роба Оуэна.)

Неподвижный наблюдатель, находящийся вдали от дыры, почувствует колебания, когда через него будут проходить тендекс-линии: растяжение, затем сжатие, затем растяжение — тендекс-линии стали гравитационной волной. Там, где в плоскости рисунка есть синие (сжимающие) линии, есть и красные растягивающие линии, но выходящие из плоскости рисунка. А там, где на рисунке линии красные (растягивающие), есть и синие (сжимающие) линии, направленные от рисунка. По мере распространения волн деформация черной дыры постепенно уменьшается, и волны также ослабевают. Когда эти волны достигают Земли, они имеют вид, показанный в верхней части рис. 16.8. Они растягивают в одном направлении и сжимают в другом. Растяжения и сжатия колеблются (от красного вправо-влево, к синему вправо-влево, к красному вправо-влево и т. д.) по мере того, как волны проходят через детектор в нижней части рис. 16.8.

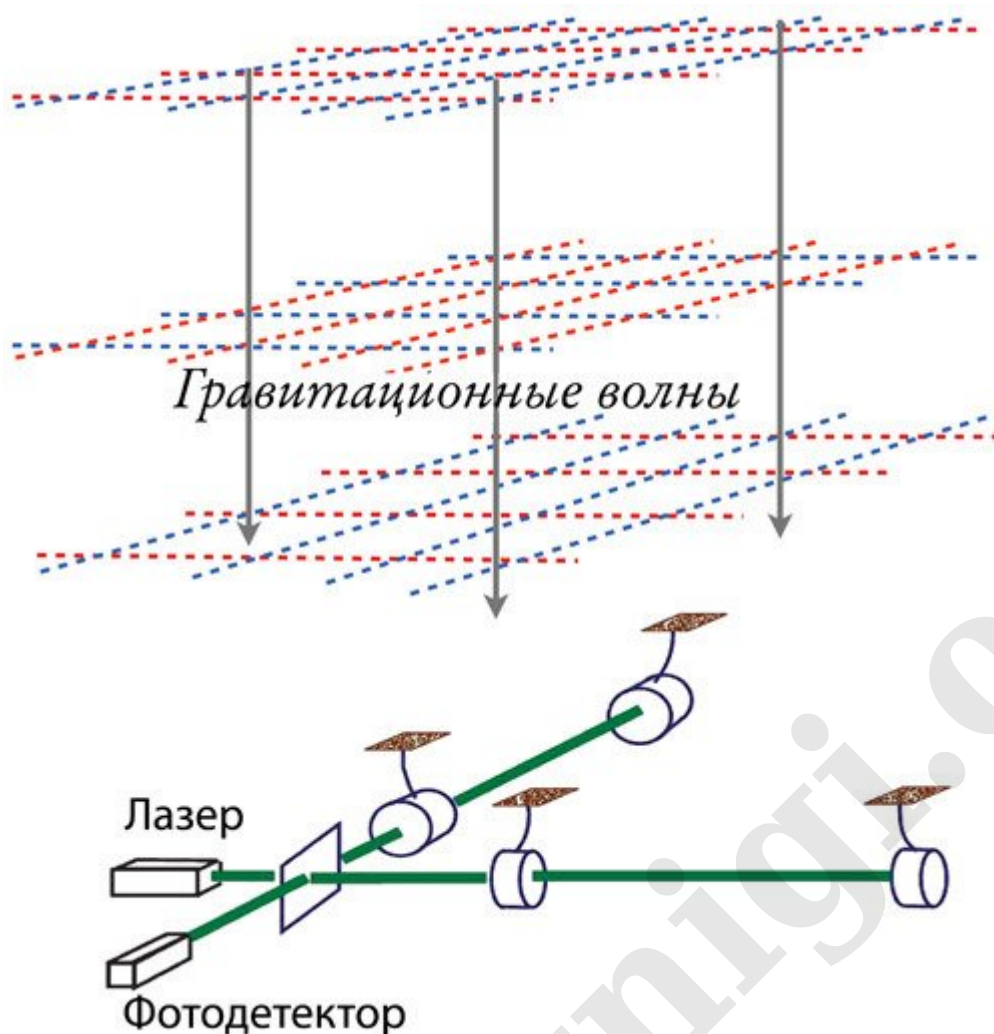


Рис. 16.8. Гравитационные волны, проходящие через детектор ЛИГО

Детектор представляет собой четыре больших зеркала (40 килограммов, 34 сантиметра в диаметре), которые закреплены на концах двух перпендикулярных труб, называемых плечами детектора. Тендекс-линии гравитационных волн растягивают одно плечо, сжимая при этом второе, а затем, наоборот, сжимают первое и растягивают второе, и т. д. снова и снова. При периодическом изменении длины плеч зеркала смещаются друг относительно друга, и эти смещения отслеживаются с помощью лазерных лучей способом, который называется интерферометрией. Отсюда и название ЛИГО: Лазерно-интерферометрическая гравитационноволновая обсерватория.

Сейчас ЛИГО — интернациональный проект, в котором участвует 900 ученых из разных стран, со штабом, расположенным в Калтехе. Проектом сейчас руководят Дэвид Рейтце (директор), Альберт Лазарини (замдиректора) и Габриэла Гонсалес (официальный представитель). Учитывая величину потенциальной выгоды от лучшего понимания Вселенной, ЛИГО финансируется в основном за счет налогоплательщиков США, через национальный научный фонд.

Гравитационные детекторы ЛИГО расположены в Хэнфорде, штат Вашингтон, и Ливингстоне, штат Луизиана; также в планах создание третьего детектора в Индии. Ученые из Италии, Франции и Нидерландов построили интерферометр такого же типа около Пизы, а японские физики строят интерферометр в горном тоннеле. Все эти детекторы будут работать скоординированно, образуя всемирную сеть по исследованию Вселенной с помощью гравитационных волн.

Я был наставником многих ученых, работающих в ЛИГО, но в 2000 году занялся другими областями науки. Однако я активно слежу за тем, как ЛИГО и ее международные партнеры подходят все ближе к получению первых данных о гравитационных волнах.

## Искривленная сторона Вселенной

«Интерстеллар» — это остросюжетная кинокартина, где люди встречаются с черными дырами, червоточинами, сингулярностями, гравитационными аномалиями и измерениями высшего порядка. Все эти объекты и явления напрямую связаны с искривлениями пространства и времени. Поэтому я и называю их «искривленной стороной Вселенной».

У человечества до сих пор очень мало экспериментальных и наблюдательных данных с искривленной стороны Вселенной. Вот почему мы столько внимания отдаем гравитационным волнам: они состоят из искривленного пространства и предоставляют наиболее доступный для нас способ исследовать искривленную сторону.

Представьте, что вам приходилось видеть океан, только когда он спокоен. Вы бы знать не знали о течениях, водоворотах и штормовых волнах.

Это напоминает наши сегодняшние знания об искривлении пространства и времени. Мы почти ничего не знаем о том, как искривленное пространство и искривленное время ведут себя «в шторм» — когда форма пространства бурно колеблется и когда колеблется скорость течения времени. И, по-моему, это необыкновенно манящий рубеж знаний. Джон Уилер, ученый-затейник, с которым мы уже встречались в предыдущих главах, придумал для этих изменений термин «геометродинамика».

В начале шестидесятых, когда я был учеником Уилера, он убедил меня и других студентов заняться изучением геометродинамики в рамках наших исследовательских проектов. Мы попытались, но это начинание с треском провалилось. Мы недостаточно хорошо знали, как решать уравнения Эйнштейна, чтобы строить на их основе прогнозы, и у нас не было возможности наблюдать явления геометродинамики в астрономической Вселенной.

Большую часть жизни в науке я посвятил тому, чтобы изменить такое положение вещей. В частности, стал одним из организаторов ЛИГО, цель которой — наблюдение геометродинамических явлений в далеких областях Вселенной. В 2000 году, отойдя от работы в ЛИГО, я стал соорганизатором исследовательской группы при Калтехе, занимающейся моделированием геометродинамики на суперкомпьютерах методом численного решения уравнений теории относительности. Мы назвали этот проект SXS (Simulating eXtreme Spacetimes — «Моделирование крайностей пространства — времени»). Эта работа ведется совместно с исследовательской группой Саула Теукольского из Корнелльского университета и другими учеными.

Особый интерес в области геометродинамики представляет столкновение двух черных дыр. Когда дыры сталкиваются, они вовлекают пространство и время в бурные циркуляции. Опыт SXS уже позволяет дать предсказания теории относительности на этот счет: см. рис. 16.9. Всего через несколько лет ЛИГО и ее партнеры приступят к наблюдению гравитационных волн от столкнувшихся черных дыр, и вот тогда можно будет проверить наши прогнозы. Сейчас прекрасная пора для изучения геометродинамики!

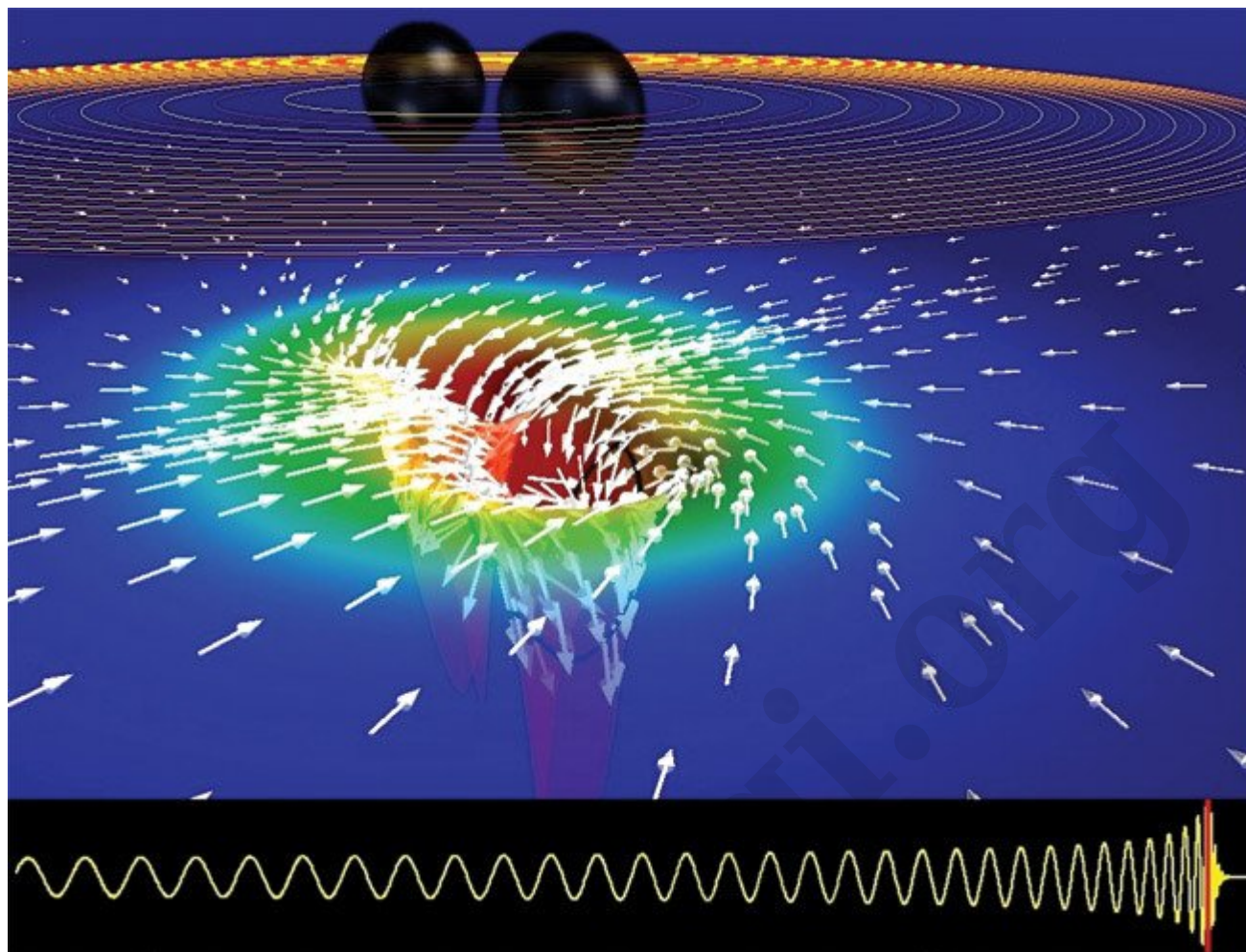


Рис. 16.9. Момент столкновения двух черных дыр. Модель для одинаковых невращающихся черных дыр. Сверху: орбиты и тени дыр, вид из нашей Вселенной. Посередине: искривленное пространство и время, вид из балка; стрелками показано, как пространство вовлекается в движение, а изменяющимися цветами — как искривляется время. Снизу: форма испускаемых гравитационных волн (Из фильма Гаральда Пфайфера о работе команды SXS.)

### Гравитационные волны от Большого взрыва

В 1975 году Леонид Гришук, мой добрый приятель из России, сделал сенсационное заявление. Он сказал, что в момент Большого взрыва возникло множество гравитационных волн, причем механизм их возникновения (прежде неизвестный) был таков: квантовые флуктуации гравитационного поля при Большом взрыве были многократно усилены первоначальным расширением Вселенной и таким образом стали изначальными гравитационными волнами. Эти волны, если их удастся обнаружить, могут рассказать нам, что происходило в момент зарождения нашей Вселенной.

В последующие годы, по мере того как совершенствовались наши представления о Большом взрыве, стало очевидно, что эти изначальные волны должны быть наиболее сильны на длинах волн, соизмеримых с величиной видимой Вселенной, то есть на длинах в миллиарды световых лет. А на длинах волн, которые охватывают детекторы ЛИГО (сотни и тысячи километров), волны, скорее всего, окажутся слишком слабыми, чтобы их распознать.

В начале девяностых некоторые космологи поняли, что эти гравитационные волны длиной в миллиарды световых лет должны были оставить уникальный след в электромагнитных волнах, наполняющих Вселенную, — в так называемом космическом микроволновом фоне, или

реликтовом излучении. Это положило начало поискам святого Грааля. Ведь если обнаружить этот след и вывести из него свойства изначальных гравитационных волн, можно узнать, как зарождалась Вселенная.

В марте 2014 года, когда я писал эту книгу, команда Джеми Бока<sup>59</sup>, космолога из Калтеха, кабинет которого находится рядом с моим, наконец обнаружила этот след в реликтовом излучении<sup>60</sup> (рис. 16.10).

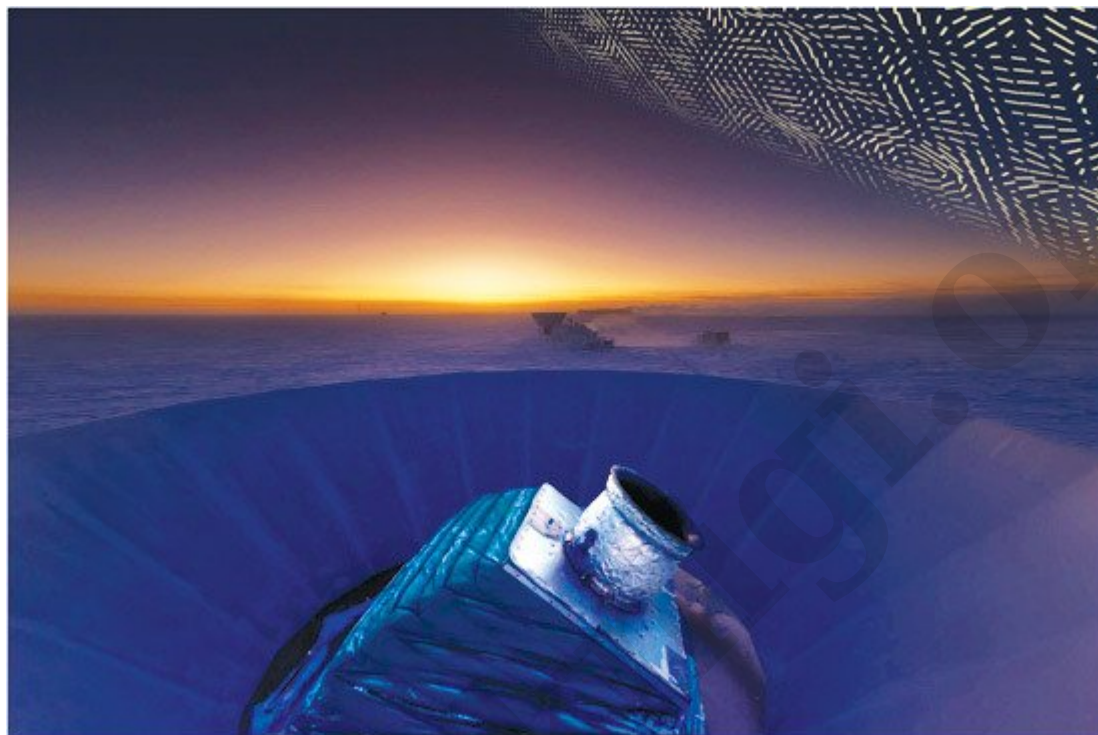


Рис. 16.10. Аппарат ВИСЕР2 (построен командой Джеми Бока), с помощью которого был обнаружен след изначальных гравитационных волн. Аппарат, находящийся на Северном полюсе, показан здесь во время сумерек, которые бывают там лишь дважды в год. Он окружен щитами, экранирующими аппарат от излучения окружающего ледяного покрова. В правом верхнем углу показан обнаруженный в реликтовом излучении след — поляризационный узор. Линии электрического поля направлены вдоль коротких светлых штрихов

Это совершенно потрясающее открытие, но есть один спорный момент: след, найденный командой Джеми, мог быть вызван не гравитационными волнами, а чем-то еще. Во время подготовки этой книги к печати ведется напряженная работа по выяснению этого момента.

Если действительно найден след гравитационных волн, возникших при Большом взрыве, значит, произошло космологическое открытие такого уровня, какие случаются, быть может, раз в полвека. Оно дает шанс прикоснуться к событиям, которые происходили спустя триллионную от триллионной от триллионной доли секунды после рождения Вселенной. Оно подтверждает теории, гласящие, что расширение Вселенной в тот миг было чрезвычайно быстрым, на сленге космологов — инфляционно быстрым. Оно возвещает наступление новой эры в космологии.

**И**так, потешив мою страсть к гравитационным волнам, разобравшись, как с их помощью можно было обнаружить червоточину в фильме, а также изучив свойства червоточин, особенно

червоточины в «Интерстеллар», мы готовы к путешествию на другую сторону этой червоточины. К путешествию, где мы познакомимся с планетой Миллер, планетой Манн и космолетом «Эндюранс».

## V

### ИССЛЕДУЕМ ОКРЕСТНОСТИ ГАРГАНТЮА

17

#### Планета Миллер

и

Первая планета, на которую высаживаются Купер и его команда, — это Миллер. Ее наиболее впечатляющие особенности — сильное замедление времени, гигантские волны и мощнейшая приливная гравитация. Эти три особенности связаны между собой и проистекают из близости планеты к Гаргантюа.

#### Орбита планеты

По Кип-версии, планета Миллер расположена в области, помеченной на рис. 17.1 синим кольцом, очень близко к горизонту Гаргантюа (см. главу 6 и главу 7).

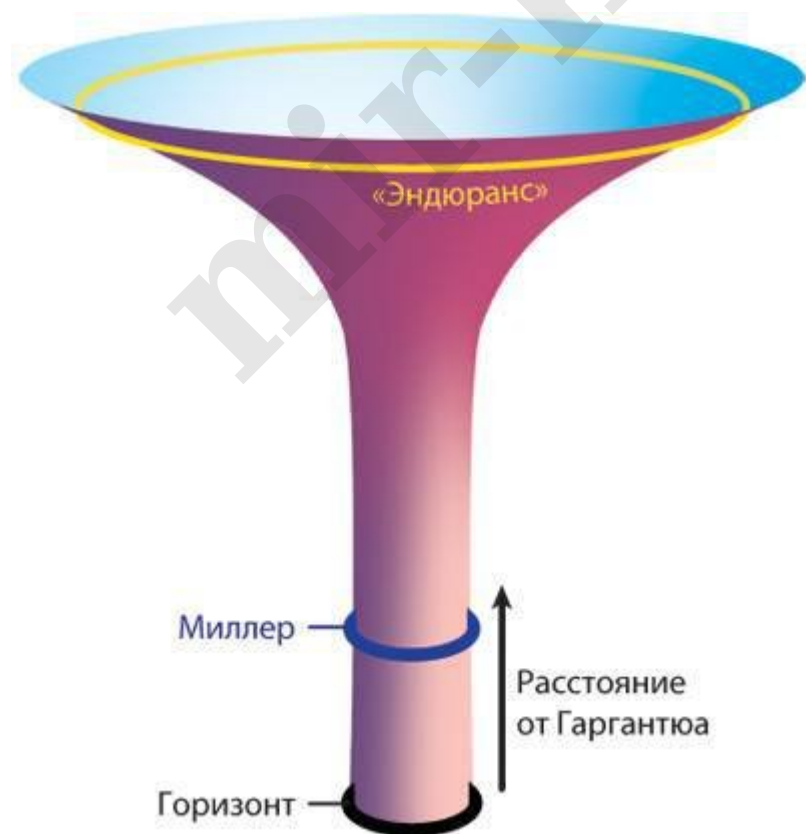


Рис. 17.1. Искривленное пространство вблизи Гаргантюа, вид из балка, одно пространственное измерение опущено. Также показана орбита планеты Миллер и орбита «Эндюранс», ожидающего возвращения десанта

Искривленное пространство здесь имеет форму поверхности цилиндра. На рисунке поперечные сечения цилиндра — это окружности, длина которых не меняется вне зависимости от расстояния до Гаргантюа. На самом деле, если вернуть опущенное измерение, эти поперечные сечения — сфероиды, тоже одинакового размера.

Так чем же это положение на цилиндре отличается от других? Что в нем особенного?

Ключ к ответу — искривление времени, которое на рис. 17.1 не показано. Вблизи Гаргантюа время замедляется, и это замедление усиливается по мере приближения к горизонту событий Гаргантюа. Следовательно, согласно эйнштейновскому закону искривления времени (см. главу 4), при приближении к горизонту гравитация становится сверхсильной. На рис. 17.2 красная кривая, обозначающая силу гравитационного поля, около горизонта резко уходит вверх. Центробежная сила, которую испытывает планета (синяя кривая), изменяется более плавно. В результате кривые пересекаются в двух точках — положения, где центробежная сила и сила гравитационного притяжения, действующие на вращающуюся вокруг Гаргантюа планету, уравновешены.



Рис. 17.2. Гравитационные и центробежные силы, действующие на планету Миллер

Во внутренней точке равновесия орбита планеты нестабильна: если планета чуть-чуть сместится в сторону от Гаргантюа (например, под воздействием гравитации пролетающей мимо кометы), центробежная сила возобладает и вытолкнет планету наружу. Если же она сместится к Гаргантюа, возобладает сила гравитации, и планета начнет падать к черной дыре. Это означает, что во внутренней точке равновесия планета Миллер долго не продержится.

Внешняя точка равновесия, напротив, стабильна: если планета Миллер, находясь там, сместится от Гаргантюа, сила гравитации «перевесит» и подтянет ее обратно. Если же

планета сместится к Гаргантюа, «перевесит» центробежная сила и вернет планету на место. Поэтому планета Миллер, согласно Кип-версии, располагается именно в этой точке<sup>61</sup>.

### Замедление времени и приливная гравитация

Орбита планеты Миллер — самая близкая к черной дыре из всех стабильных круговых орбит вокруг Гаргантюа. Таким образом, это орбита с максимальным замедлением времени. На семь земных лет приходится один час на планете Миллер — время там течет в 60 000 раз медленнее, чем на Земле! Именно это и нужно было Кристоферу Нолану.

Однако такая близость к Гаргантюа означает, что на планету Миллер действуют чудовищные силы приливной гравитации Гаргантюа. Настолько чудовищные, что они почти разрывают планету на части (см. главу 6). Почти, но не совсем. Вместо этого они просто деформируют планету, и деформируют значительно (рис. 17.3), так, что она сильно вытягивается в направлениях к черной дыре и от нее.

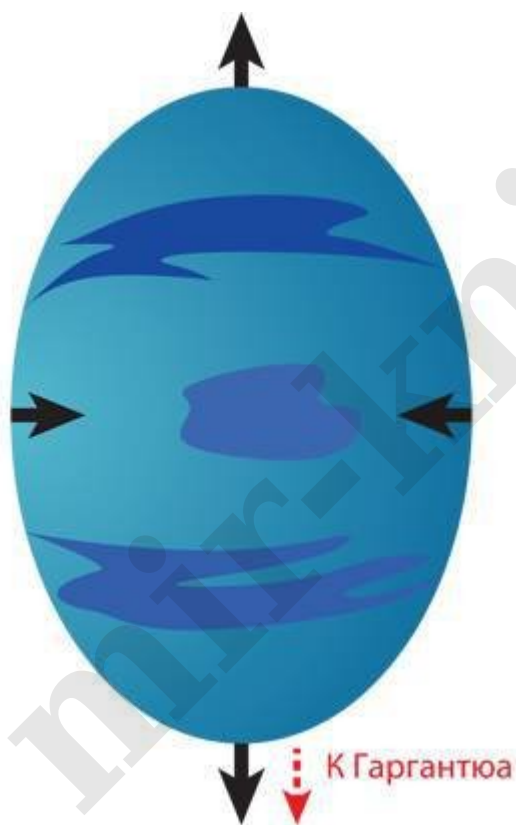


Рис. 17.3. Приливная деформация планеты Миллер

Если бы планета Миллер смещалась относительно радиального направления к Гаргантюа (то есть не была повернута к дыре все время одной и той же стороной), то и приливные силы смещались бы относительно планеты. Сначала планета сминалась бы с запада и востока и растягивалась от севера к югу. Затем, через четверть оборота (относительно радиального направления к Гаргантюа), сминалась бы с севера и юга и растягивалась от запада к востоку. Эти сжатия и растяжения были бы просто огромны по сравнению с прочностью мантии планеты (ее твердых наружных слоев). Мантия была бы стерта в пыль, а затем возникший от трения жар раскалил бы планету докрасна. Но Миллер выглядит вовсе не так! Вывод ясен: в Кип-версии планета всегда развернута к Гаргантюа одной и той же стороной (рис. 17.4), или

почти одной и той же (мы обсудим это после).

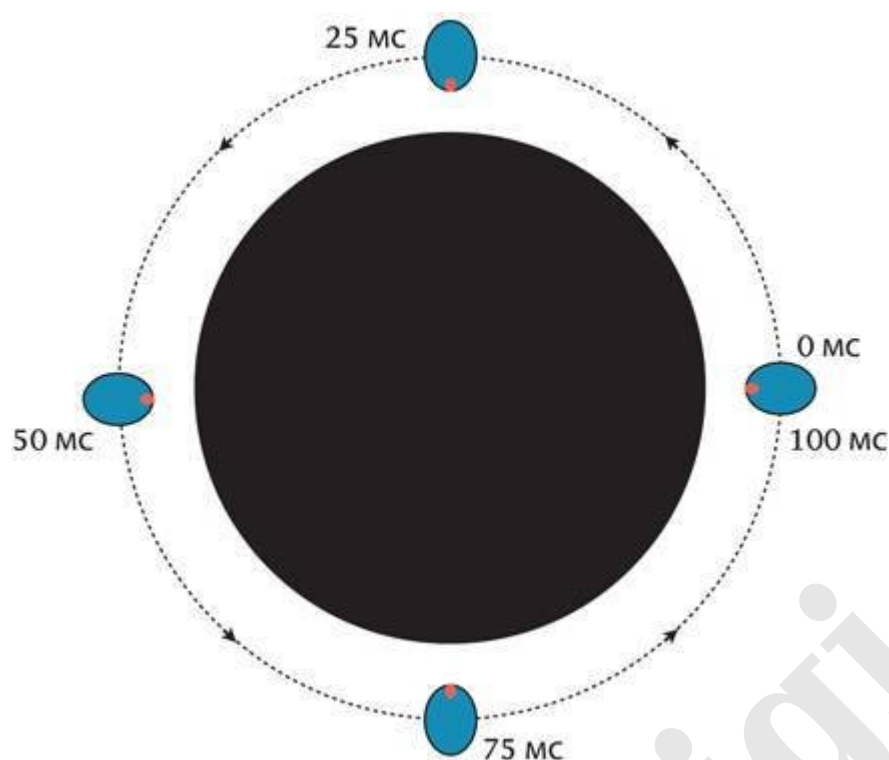


Рис. 17.4. Орбитальное движение и вращение планеты Миллер относительно отдаленных звезд. Красная точка на поверхности планеты и приливная выпуклость всегда направлены к Гаргантюа

### Пространственный вихрь

Законы Эйнштейна утверждают, что если смотреть издалека, например с планеты Манн, планета Миллер будет двигаться вокруг Гаргантюа по орбите длиной в миллиард километров, делая один оборот в течение 1,7 часа. Это приблизительно половина скорости света! Экипаж «Рейнджера», замеряя орбитальный период, из-за замедления времени получает в 60 000 раз меньшее значение — десятую долю секунды. Десять оборотов вокруг Гаргантюа за одну секунду — вот это скорость! Так что же, планета летит быстрее света? Нет, это не так. Дело тут в пространственном вихре, порожденном быстрым вращением Гаргантюа. Относительно завихряющегося пространства вблизи планеты и времени, измеренного там же, скорость движения планеты меньше световой, и только это имеет значение в плане запрета на сверхсветовую скорость.

Поскольку планета (в Кип-версии) всегда повернута к Гаргантюа одной и той же стороной (рис. 17.4), она должна вращаться вокруг своей оси с той же частотой, что и кружится по орбите, — десять оборотов в секунду. Как она может вращаться столь быстро? Неужто центробежные силы не разорвут ее на части? Нет, не разорвут — и снова благодаря пространственному вихрю. Планета не почувствует разрушительных центробежных сил, если будет вращаться в точности с той же скоростью, с которой вблизи нее завихряется пространство. А почти так оно и есть. Поэтому центробежные силы, возникающие при вращении планеты, в действительности слабы. Но если бы планета, напротив, не вращалась относительно отдаленных звезд, она бы вращалась с частотой десять оборотов в секунду относительно пространственного вихря и была бы разорвана центробежными силами. Странная штука эта относительность.

## Гигантские волны на планете Миллер

Откуда могли появиться две гигантские — в 1,2 километра вышиной — волны, которые норовят захлестнуть «Рейнджер» на планете Миллер (рис. 17.5)?



Рис. 17.5. Гигантская волна обрушивается на «Рейнджер» (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Некоторое время я ломал голову, производил расчеты и в конце концов нашел два возможных объяснения. Оба варианта требуют, чтобы планета не была четко направлена на Гаргантюа. Вместо этого она должна раскачиваться (относительно радиального направления к дыре) туда-сюда в небольших пределах — от положения на рис. 17.6 слева до положения на рис. 17.6 справа.

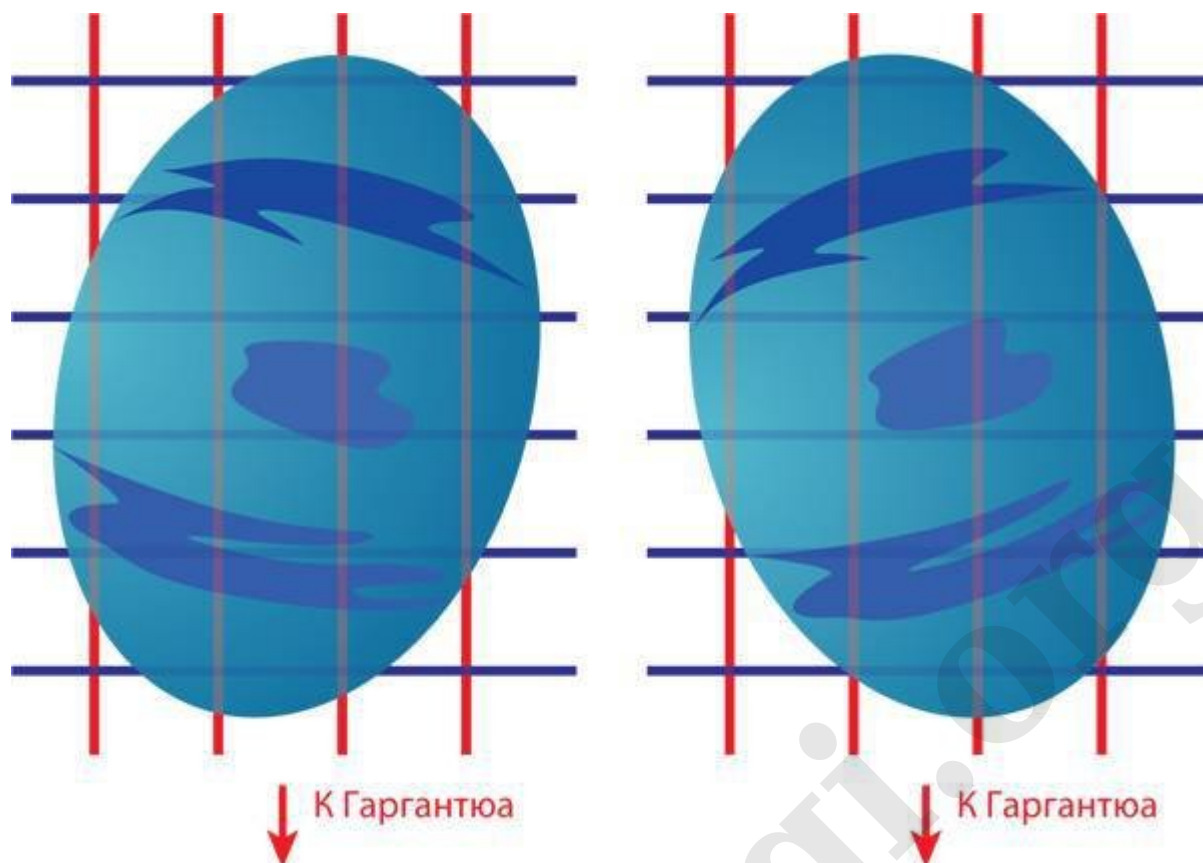


Рис. 17.6. Раскачивание планеты Миллер под воздействием приливной гравитации Гаргантюа, а именно ее растягивающих (красных) и сжимающих (синих) тендекс-линий

Такое раскачивание вполне естественно, в чем можно убедиться, рассмотрев, как влияет на планету приливная гравитация Гаргантюа.

На рис. 17.6 приливная гравитация изображена в виде тендекс-линий (см. главу 4). Вне зависимости от того, в какую сторону отклонилась планета (левая или правая половина рис. 17.6), синие сжимающие тендекс-линии Гаргантюа сдвигают ее «с боков», возвращая к «нормальной» ориентации: «нижним концом» к Гаргантюа, «верхним» — от нее (рис. 17.3). Кроме того, красные растягивающие тендекс-линии Гаргантюа тянут «нижний конец» планеты к черной дыре, а «верхний» — от нее. Это также возвращает планету к ее «нормальной» ориентации.

В итоге планета будет раскачиваться туда-обратно (если отклонения достаточно малы, чтобы не вызвать разрушение мантии). Когда я рассчитал период этого раскачивания, у меня получился замечательный результат — примерно час. Это соответствует наблюдаемому в фильме времени затишья между исполинскими валами воды, времени, которое Крис выбрал, ничего не зная о моих интерпретациях и расчетах.

Итак, первое объяснение гигантских волн в Кип-версии: раскачиваясь под влиянием приливной гравитации Гаргантюа, планета «расплескивает» воды своих океанов.

Похожее явление, называемое «бора», наблюдается на Земле в устьях некоторых рек. Когда во время прилива уровень океана поднимается, водяной вал устремляется вверх по реке; обычно он невелик, но в редких случаях бывает довольно внушителен. Пример этого явления показан на рис. 17.7 (сверху): приливный бора на реке Цяньтан в Ханчжоу, Китай, август 2010 года. Хоть этот бора и выглядит впечатляюще, он крайне невелик по сравнению с волнами высотой 1,2 километра. Потому что и приливная гравитация Луны, вызвавшая этот бора, очень слаба по

сравнению с мощнейшей приливной гравитацией Гаргантюа!



Рис. 17.7. Сверху: приливный бора на реке Цяньтан, Китай. Снизу: цунами в городе Мияко, Япония

Мой второй вариант объяснения — цунами. Раскачивая планету Миллер, приливные силы

Гаргантюа хоть и не стирают кору планеты в пыль, но деформируют ее то так, то эдак с периодом в час, и эти деформации могут запросто вызвать сильнейшие землетрясения... Хм... Думаю, правильнее их называть «миллеротрясения». Так вот, миллеротрясения могут порождать в океанах планеты цунами, сила которых значительно превышает любое земное цунами, например то, которое обрушилось на японский город Мияко 11 марта 2011 года (рис. 17.7, снизу).

## Прошлое планеты Миллер

Интересно порассуждать о прошлом и будущем планеты Миллер<sup>62</sup>. Попробуйте сделать это, призвав на помощь все свои познания в физике, а также информацию из книг и интернета. Предупреждаю, задача не из легких! Вот некоторые вопросы, над которыми стоит подумать.

Насколько стара планета Миллер? Если принять в качестве крайней гипотезы, что она возникла на своей нынешней орбите, когда ее галактика была еще совсем юной (около 12 миллиардов лет назад), и что скорость вращения Гаргантюа с тех пор не менялась, оставаясь такой же высокой, то возраст планеты равен 12 миллиардам лет, поделенным на 60 000 (замедление времени на планете): итого 200 000 лет. Это крайне мало по меркам геологических процессов на Земле. Может ли планета Миллер быть столь молодой и выглядеть при этом так, как в фильме? Могли ли за это время образоваться океаны и насыщенная кислородом атмосфера? Если нет, тогда как могла планета сформироваться где-нибудь в другом месте, а затем переместиться на орбиту, столь близкую к Гаргантюа?

Сколько долго будет планета раскачиваться, прежде чем силы трения внутри нее преобразуют всю энергию раскачивания в тепло? И как давно она уже раскачивается? Если сильно меньше, чем 200 000 лет, то, возможно, что-то заставило ее начать раскачиваться. Что бы это могло быть?

Когда силы трения преобразовывают энергию раскачивания в тепло, насколько это разогревает недра планеты? Достаточно ли сильно, чтобы возникли вулканы и брызнула лава?

Ио, одна из лун Юпитера, вращающаяся по ближайшей (по сравнению с другими крупными спутниками) к Юпитеру орбите, не раскачивается. Зато она то приближается к Юпитеру, то отдаляется от него, двигаясь по эллиптической орбите, из-за чего действие на Ио приливной гравитации то усиливается, то ослабевает, то снова усиливается — примерно такие же перепады приливной гравитации Гаргантюа испытывает Миллер. В результате Ио разогревается достаточно, чтобы на ней возникали колоссальные вулканы и били фонтаны лавы (рис. 17.8).

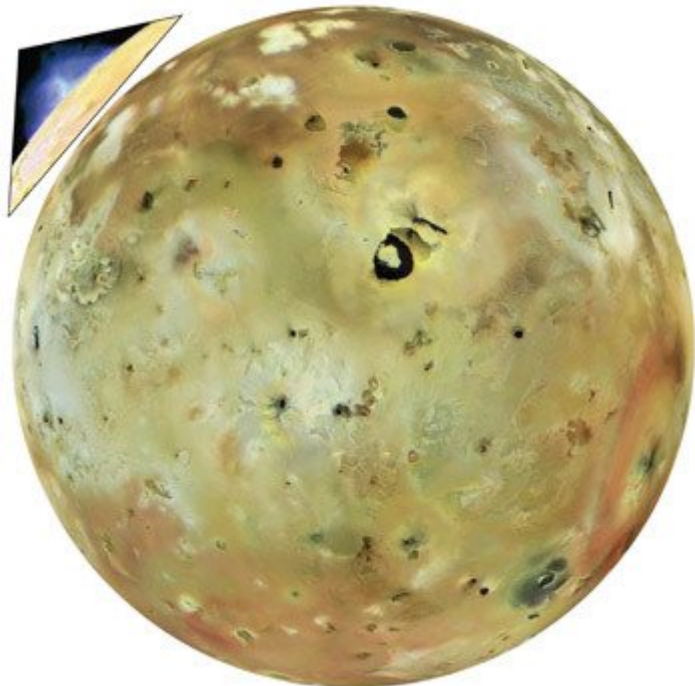


Рис. 17.8. На фотографии Ио, сделанной с космического аппарата «Галилео», видны многочисленные вулканы и потоки лавы. На врезке: фонтан лавы высотой в 50 километров

#### Вид Гаргантюа с планеты Миллер

Когда в фильме «Рейнджер» приближается к планете Миллер, мы видим в небе Гаргантюа, которая занимает 10 градусов обзора (в 20 раз больше, чем Луна, если смотреть на нее с Земли!) и окружена ярким аккреционным диском (рис. 17.9). Как бы впечатляюще это ни выглядело, в фильме угловой размер Гаргантюа сильно уменьшен по сравнению с тем, каким он должен был бы быть на самом деле.



Рис. 17.9. Гаргантюа, частично скрытая планетой Миллер; на переднем плане — «Рейнджер», идущий на снижение (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Если планета Миллер, в согласии с Кип-версией, действительно находится достаточно близко к Гаргантюа, чтобы замедление времени на ней было столь велико, то планета должна находиться у самого подножия цилиндрической области искривленного пространства Гаргантюа (рис. 17.1). Тогда, весьма вероятно, если вы направите взгляд, так сказать, в сторону нижней части цилиндра, то увидите Гаргантюа, а если в сторону верхней, то увидите внешнюю Вселенную. Значит, Гаргантюа занимает примерно половину неба над планетой (180 градусов), а внешняя Вселенная — другую половину. Именно так велят законы теории относительности.

Кроме того, очевидно, что если планета Миллер находится на минимальном от Гаргантюа расстоянии, где она может оставаться в стабильном состоянии, не падая к дыре, то аккреционный диск должен располагаться снаружи орбиты планеты. Таким образом, на подлете к планете астронавты должны наблюдать огромный диск сверху, над собой, и огромную тень черной дыры внизу, под собой. Опять же таковы прогнозы теории относительности.

Если бы Крис последовал этим требованиям эйнштейновских законов, он испортил бы фильм. Будь эта сцена столь грандиозна, кульминация (когда Купер падает к Гаргантюа) поблекла бы на ее фоне. Поэтому Крис сознательно допустил художественную вольность, сделав Гаргантюа и ее диск «всего лишь» в 20 раз больше, чем Луна при взгляде с Земли.

Хоть я и приверженец научной точности в фантастике, но не могу винить Криса за это решение. Решай я, то сделал бы точно так же, и вы сказали бы мне за это спасибо.

## Вибрации Гаргантюа



Пока Купер и Амелия Брэнд находятся на планете Миллер, Ромилли остается на «Эндюранс» и изучает черную дыру Гаргантюа. Он надеется, что точные данные позволят ему больше узнать о гравитационных аномалиях. Но более всего (как мне кажется) он надеется, что квантовые данные из сингулярности Гаргантюа (см. главу 26) просочатся через горизонт событий наружу и подскажут, как управлять гравитационными аномалиями (или, выражаясь емким языком Ромилли, как «решить гравитацию»).

Когда Амелия Брэнд возвращается с планеты Миллер, Ромилли говорит ей: «Я изучил черную дыру как мог, но не могу ничего сообщить твоему отцу. Мы принимаем сигналы, но назад они не проходят».

Что же изучал Ромилли? Он не уточняет, но я думаю, что он бы сосредоточился на вибрациях Гаргантюа, и предлагаю вам свою экстраполяцию событий.

### Колебания черных дыр

В 1971 году Билл Пресс, мой студент в Калтехе, обнаружил, что черные дыры могут вибрировать на особых резонансных частотах, подобно тому как это происходит со скрипичной струной.

Если правильно ущипнуть струну, она издаст чистый тон — звуковую волну определенной частоты без каких-либо примесей. Если ущипнуть струну чуть по-другому, она издаст тот же чистый тон плюс более высокие обертоны. Иными словами, если струна правильно зажата и палец неподвижен, ее колебания дают звук, состоящий из дискретного набора частот — резонансных частот струны.

То же верно и для бокала, если провести пальцем по его краю, и для колокольчика, если ударить по нему молоточком. А также, как обнаружил Пресс, для черной дыры, если в ее недра упадет какой-либо объект. Год спустя еще один мой студент, Саул Теукольский, с помощью законов теории относительности вывел математическое описание резонансных колебаний для вращающейся черной дыры (вот главное преимущество преподавания в Калтехе — у нас не студенты, а гении!). Применяя уравнения Теукольского, мы, физики, можем вычислить резонансные частоты черной дыры, однако если дыра вращается очень быстро (как Гаргантюа), решение сильно усложняется. Усложняется настолько, что это удалось сделать лишь спустя 50 лет — команде ученых, ведущие роли в которой играли Хуан Янг и Аарон Циммерман, как можно догадаться, студенты Калтехе.

В сентябре 2013 года Ричи Кремер, реквизитор «Интерстеллар», попросил у меня данные наблюдений, которые Ромилли мог бы показать Амелии Брэнд. Разумеется, я обратился за помощью к лучшим мировым специалистам — Янгу и Циммерману. Они быстро составили таблицы с расчетными значениями частот резонансных колебаний Гаргантюа и скоростей их затухания (возникающего из-за передачи энергии гравитационным волнам). К этому они добавили результаты вымышленных наблюдений, примерно соответствующие расчетам, а я — изображения горизонта событий Гаргантюа (или скорее края ее тени), смоделированные

командой по созданию визуальных эффектов Double Negative. И данные наблюдений Ромилли были готовы.

Когда Кристофер Нолан снимал сцену, где Ромилли обсуждает свои исследования с Амелией Брэнд, получилось, что Ромилли так и не показал ей данные наблюдений. Они лежали рядом на столе, но Ромилли не взял их в руки. Однако в Кип-версии эти данные играют ключевую роль.

#### Резонансные колебания Гаргантюа

На рис. 18.1 — первая страница данных, собранных Ромилли. Каждая строчка чисел на этой странице относится к одной из резонансных частот колебаний Гаргантюа.

mir-knigi.org

# ГАРГАНТЮА

Квазистабильные частоты — усреднение по всем экспериментальным данным

| Моды<br>(l,m,n) | Теория           |                  | Относительная разница<br>экспериментальных<br>и теоретических данных |                  |
|-----------------|------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------|
|                 | Re( $\omega$ ) M | Im( $\omega$ ) M | Re( $\omega$ ) M                                                     | Im( $\omega$ ) M |
| (2,1,0)         | 0.6664799        | 0.05541304       | 0.000054±23                                                          | 0.00038±44       |
| (2,1,1)         | 0.6665907        | 0.1662391        | 0.000008±8                                                           | 0.00025±26       |
| (2,1,2)         | 0.6667016        | 0.2770652        | 0.000040±17                                                          | 0.00039±39       |
| (2,1,3)         | 0.6668124        | 0.3878913        | 0.000016±24                                                          | 0.00051±8        |
| (2,1,4)         | 0.6669232        | 0.4987174        | 0.000003±25                                                          | 0.00005±8        |
| (2,0,0)         | 0.5235067        | 0.0809975        | 0.000057±10                                                          | 0.00017±19       |
| (2,0,1)         | 0.5236687        | 0.2429925        | 0.000029±9                                                           | 0.00065±13       |
| (2,0,2)         | 0.5238307        | 0.4049875        | 0.000005±31                                                          | 0.00042±15       |
| (2,0,3)         | 0.5239927        | 0.5669825        | 0.000023±12                                                          | 0.00039±50       |
| (2,0,4)         | 0.5241547        | 0.7289775        | 0.000041±61                                                          | 0.00003±46       |
| (3,2,0)         | 1.0749379        | 0.03192427       | 0.000014±91                                                          | 0.00009±71       |
| (3,2,1)         | 1.0750018        | 0.09577282       | 0.000019±32                                                          | 0.00021±24       |
| (3,2,2)         | 1.0750656        | 0.1596214        | 0.000004±25                                                          | 0.00006±21       |
| (3,2,3)         | 1.0751295        | 0.2234699        | 0.000024±14                                                          | 0.0011±19        |
| (3,2,4)         | 1.0751933        | 0.2873185        | 0.000032±38                                                          | 0.00007±28       |
| (3,1,0)         | 0.8623969        | 0.06574082       | 0.000004±74                                                          | 0.00051±27       |
| (3,1,1)         | 0.8625284        | 0.1972225        | 0.00039±1                                                            | 0.00016±9        |
| (3,1,2)         | 0.8626599        | 0.3287041        | 0.000019±35                                                          | 0.00057±41       |
| (3,1,3)         | 0.8627914        | 0.4601857        | 0.000030±35                                                          | 0.00002±21       |



Рис. 18.1. Первая страница данных, подготовленных Янгом и Циммерманом, чтобы Ромилли показал их Амелии Брэнд (Реквизит для съемок «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

В первой колонке указаны коды формы колебаний Гаргантюа, а картинка внизу — кадр из отснятого Ромилли видеоматериала, подтверждающего (в Кип-версии) прогнозы. Во второй колонке — частота колебаний, а в третьей — скорость их затухания в соответствии с уравнениями Теукольского63. В четвертой и пятой колонках указана разница между теоретическими прогнозами и практическими наблюдениями.

В моей экстраполяции Ромилли находит несколько аномалий — серьезных расхождений между теорией и практикой. Эти расхождения он выделяет в таблице красным шрифтом. На первой

странице (рис. 18.1) всего одна аномалия, но расхождение весьма серьезное — оно в 39 раз превышает погрешность измерений!

Эти аномалии, считает в Кип-версии Ромилли, могут пригодиться, чтобы «решить гравитацию» (понять, как использовать аномалии). Он хотел бы передать свои находки профессору Брэндру на Землю, но, на горе Ромилли, обратная связь недоступна.

Не может он также заглянуть внутрь Гаргантюа, чтобы извлечь важные квантовые данные из ее сингулярности (см. главу 26).

А еще Ромилли не знает, содержат ли обнаруженные им аномалии часть этих квантовых данных или нет. Быть может, благодаря столь быстрому вращению дыры какие-то квантовые данные просочились наружу, за горизонт, чем, собственно, и вызваны аномалии. Вот если бы Ромилли мог переслать данные наблюдений профессору Брэндру, тот, возможно, сумел бы в этом разобраться.

Позже (в главах 24–26) я расскажу гораздо больше о гравитационных аномалиях, а также о квантовых данных из недр Гаргантюа, благодаря которым эти аномалии можно укротить. А пока продолжим исследовать окрестности Гаргантюа и обратим внимание на еще одну планету, планету Манн.

## 19

### Планета Манн



Выяснив, что планета Миллер не подходит для заселения людьми, Купер и его команда отправляются на планету Манн.

#### Орбита планеты и отсутствие солнца

Я определил подходящую для планеты Манн орбиту, руководствуясь двумя киноэпизодами.

Во-первых, Дойл говорит, что путешествие к планете Манн займет месяцы. Отсюда вывод: когда «Эндюранс» прибывает к планете Манн, она должна находиться вдалеке от Гаргантюа, из ближайших окрестностей которой начался перелет. Во-вторых, практически сразу после того, как «Эндюранс» взрывается на орбите вокруг планеты Манн, экипаж обнаруживает, что «Эндюранс» затягивается к горизонту Гаргантюа. Отсюда вывод номер два: когда экипаж покидает планету Манн, она должна находиться вблизи Гаргантюа.

Чтобы выполнить оба условия, орбита планеты Манн должна быть сильно вытянутой. А чтобы планета, проходя вблизи Гаргантюа, не угодила в аккреционный диск, ее орбита должна проходить как можно выше или ниже экваториальной плоскости Гаргантюа, где этот диск располагается.

Исходя из этого орбита должна выглядеть примерно так, как показано на рис. 19.1, но отходить от Гаргантюа гораздо дальше — на 600 или больше радиусов дыры<sup>64</sup>. Напоминает орбиту кометы Галлея в Солнечной системе (рис. 7.5): подойдя к Гаргантюа, планета огибает ее и

снова улетает прочь. Пространственный вихрь вблизи Гаргантюа заставляет планету облетать вокруг дыры один или два раза при каждом сближении, а также вызывает прецессию под большим углом, как показано на рисунке.

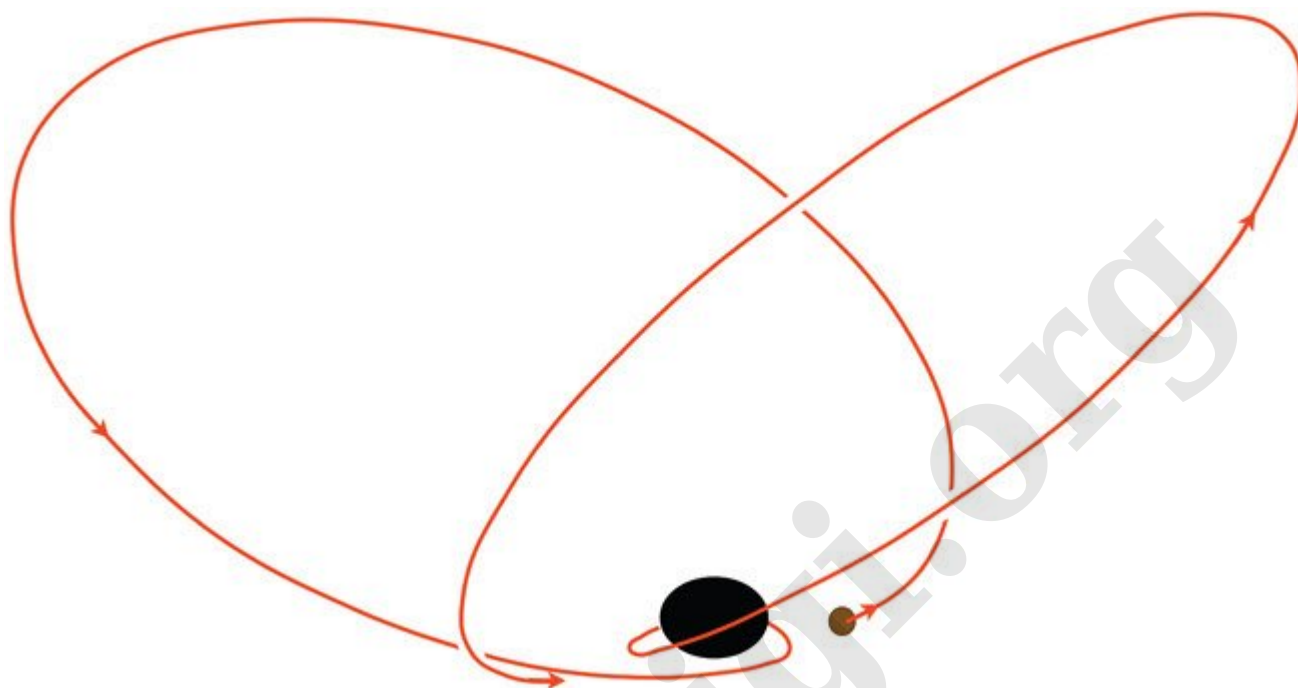


Рис. 19.1. Возможная орбита планеты Манн, вычисленная с помощью крайне дружелюбной интернет-программы, написанной Дэвидом Сароффом, см. [demonstrations.wolfram.com/3DKerr-BlackHoleOrbits](http://demonstrations.wolfram.com/3DKerr-BlackHoleOrbits)

Планету Манн в ее перемещениях к черной дыре и от нее не может сопровождать солнце, поскольку вблизи Гаргантюа огромные приливные силы развели бы планету и солнце врозь, отправив их дальше по совершенно разным орбитам. Поэтому обогревать и освещать планету Манн, как и планету Миллер, может только слабый аккреционный диск Гаргантюа.

#### Путь к планете Манн

Путь «Эндюранс» к планете Манн начинается рядом с Гаргантюа и заканчивается вдали от нее. Такой перелет требует — в Кип-версии — двух гравитационных пращей (см. главу 7), одной в начале и другой — в конце.

В начале этого пути есть двойная проблема. Во-первых, находясь на орбите ожидания возле Гаргантюа, «Эндюранс» движется со скоростью втрое меньшей, чем световая ( $c/3$ ), в неподходящем направлении — по круговой орбите вокруг Гаргантюа; движение нужно изменить на радиальное, от черной дыры. Во-вторых, скорость «Эндюранс» слишком мала — гравитационное притяжение Гаргантюа настолько сильное, что если «Эндюранс» ляжет на радиальную траекторию, не меняя скорости ( $c/3$ ), Гаргантюа будет удерживать корабль, позволив ему продвинуться лишь на малую часть от расстояния до планеты Манн. Чтобы преодолеть гравитацию Гаргантюа и достичь планеты Манн на скорости, равной скорости планеты (примерно  $c/20$ ), первая праща должна разогнать «Эндюранс» примерно до половины скорости света. Для этого Куперу нужно найти черную дыру средней массы в подходящем месте и с подходящей скоростью.

Найти такую дыру — дело непростое, и даже если это получится, могут возникнуть сложности с тем, чтобы приблизиться к ней в нужный момент, когда она находится в строго определенной точке своей орбиты. Возможно, большую часть пути (который займет месяцы) придется потратить на перелет к черной дыре средней массы, и не исключено, что придется долго ждать, пока эта дыра окажется в нужном месте. А после того как корабль наконец выполнит прашу, полет до планеты Манн с первоначальной скоростью около  $c/2$  и постепенным замедлением до  $c/20$  потребует еще приблизительно 40 дней.

Во время второй прашы, вблизи планеты Манн, «Эндюранс» понадобится обогнуть подходящую черную дыру средней массы и перейти к плавному сближению с планетой, к сближению, которое не потребует больших трат ракетного топлива.

#### Прибытие на планету Манн: ледяные облака

В фильме «Эндюранс» остается на орбите вокруг планеты Манн, а Купер с командой высаживаются на планету в «Рейнджере».

Планета покрыта льдом, чего вполне можно ожидать, учитывая, что (в Кип-версии) большую часть времени она находится вдали от Гаргантюа с ее горячим аккреционным диском. Когда «Рейнджер» снижается перед посадкой на планету, мы видим, как он маневрирует между облаками, но затем «Рейнджер» задевает одно из них (рис. 19.2), и выясняется, что облако состоит из льда.



Рис. 19.2. «Рейнджер» задевает край ледяного «облака» на планете Манн (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Основываясь на беседе с Полом Франклином, я полагаю, что эти облака состоят в основном из замерзшей двуокиси углерода, «сухого льда», и что по мере приближения планеты к аккреционному диску Гаргантюа они начинают нагреваться. Нагреваясь, сухой лед сублимирует (испаряется), и то, что кажется облаками, может быть смесью сухого льда и сублимированного пара — в основном, по-видимому, пара. На меньших высотах, когда «Рейнджер» садится, температура выше, и лед, на который опускается «Рейнджер», скорее всего, состоит исключительно из воды.

#### Геологические данные доктора Манна

В фильме доктор Манн ищет на своей планете органику и утверждает, что собрал

обнадеживающие данные. Обнадеживающие, но не более того. Он показывает данные Брэнд и Ромилли.

Данные представляют собой полевые заметки, в которых указано, где был найден каждый образец, описана геологическая среда в месте находки и дан химический анализ образца. На результаты химанализа и ссылается доктор Манн, говоря о возможном наличии органики.

На рис. 19.3 показана одна страница из этих заметок. Эти данные для фильма подготовила Эрика Суонсон, талантливый аспирант-геолог из Калтеха. Эрика, подобно доктору Манну, тоже занималась полевыми исследованиями и химическим анализом. Правда, на Земле.



| образец  | цитохромы | окислительно-восстановительные ферменты | полициклические ароматические углеводороды | формальдегид |
|----------|-----------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|
| EBL-VR01 | 0.03      | 0.379                                   | 8.7                                        | 1.64         |
| EBL-VR03 | 0.02      | 0.103                                   | 2.3                                        | 1.20         |
| EBL-VR04 | 0.02      | 0.170                                   | 3.9                                        | 1.38         |
| EBL-OS01 | 0.02      | 0.128                                   | 2.9                                        | 1.28         |
| EBL-OS02 | 0.01      | 0.038                                   | 0.8                                        | 0.88         |
| EBL-OS04 | 0.01      | 0.020                                   | 0.4                                        | 0.71         |
| GB0-VR01 | 0.04      | 0.426                                   | 9.7                                        | 1.67         |
| GB0-VR02 | 0.02      | 0.155                                   | 3.5                                        | 1.34         |
| GB0-VR03 | 0.01      | 0.015                                   | 0.3                                        | 0.64         |
| GB0-VR05 | 0.02      | 0.115                                   | 2.6                                        | 1.24         |
| GB0-OS01 | 0.04      | 0.613                                   | 14.0                                       | 1.76         |
| GB0-OS02 | 0.00      | 0.009                                   | 0.1                                        | 0.50         |
| GB0-OS03 | 0.02      | 0.115                                   | 2.6                                        | 1.24         |
| GB0-OS04 | 0.03      | 0.237                                   | 5.4                                        | 1.49         |
| EFO-VR02 | 0.01      | 0.053                                   | 1.2                                        | 0.98         |
| EFO-VR03 | 0.02      | 0.186                                   | 4.2                                        | 1.41         |
| EFO-VR05 | 0.02      | 0.103                                   | 2.3                                        | 1.20         |
| EFO-VR08 | 0.05      | 0.938                                   | 21.5                                       | 1.79         |
| EFO-VR11 | 0.07      | 1.648                                   | 37.9                                       | 1.64         |
| EFO-OS01 | 0.00      | 0.003                                   | 0.0                                        | 0.25         |
| EFO-OS02 | 0.03      | 0.219                                   | 5.0                                        | 1.46         |
| EFO-OS03 | 0.01      | 0.045                                   | 1.0                                        | 0.93         |
| EFO-KS01 | 0.02      | 0.128                                   | 2.9                                        | 1.28         |

Рис. 19.3. Сверху: Ромилли (актер Дэвид Гяси) и Брэнд (актриса Энн Хэтэуэй) обсуждают с доктором Манном его геологические данные. Снизу: одна страница данных, подготовленных для фильма Эрикой Суонсон: результаты химического анализа вымышленных камней, собранных на поверхности вымышленной планеты. Несколько образцов предположительно содержат следы органики, возможно даже — животного происхождения (Кадры из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Далее в фильме выясняется, что доктор Манн подделал данные. В этом есть некая ирония, поскольку Эрика данные, разумеется, тоже сфабриковала. Она не проводила полевых исследований на планете Манн. Возможно, когда-нибудь...

В этой книге я ничего не скажу о личной трагедии доктора Манна. Она не имеет отношения к точным наукам. Ее развязка — взрыв, серьезно повреждающий «Эндюранс». А вот конструкция «Эндюранс», взрыв и его последствия — это уже наша епархия, так что давайте об этом и

поговорим.

20

«Эндюранс»

и

Приливная гравитация и конструкция «Эндюранс»

«Эндюранс» состоит из 20 модулей, соединенных в кольцо, а также управляющего модуля в центре кольца (рис. 20.1). Два посадочных модуля и два «Рейнджера» пристыковываются к центральному модулю «Эндюранс».

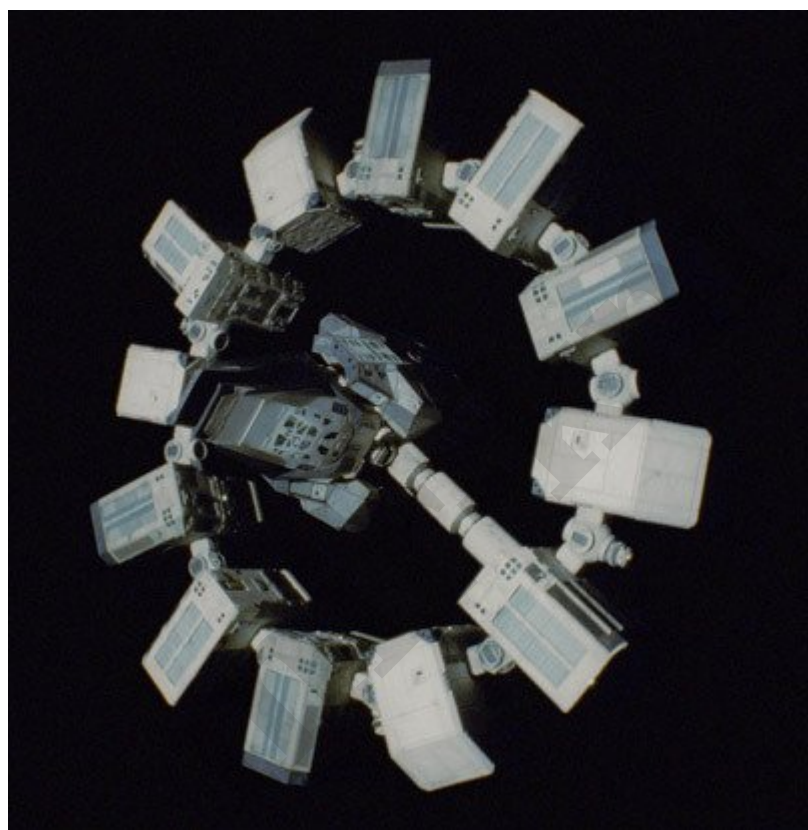


Рис. 20.1. «Эндюранс», два «Рейнджера» и два посадочных модуля пристыкованы к центральному управляющему модулю. «Рейнджеры» расположены перпендикулярно плоскости кольца, а посадочные модули — параллельно (Кадры из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Согласно Кип-версии, «Эндюранс» был сконструирован так, чтобы выдерживать серьезные воздействия сил приливной гравитации. Необходимая предосторожность, если собираешься путешествовать сквозь червоточину. Диаметр кольца «Эндюранс» — 64 метра — равен примерно одному проценту от длины окружности червоточины. Сталь и другие твердые материалы не годились, поскольку они ломаются или необратимо теряют изначальную форму, если подвергнуть их деформациям величиной более нескольких десятых долей процента. К

тому же было неясно, что случится с «Эндюранс» по другую сторону червоточины, возле Гаргантюа, так что «Эндюранс» требовался гораздо больший запас прочности, чем необходим для преодоления приливных сил в червоточине.

Углеродное волокно можно изгибать как угодно, при этом деформация материала составит значительно меньше одного процента. Причина в малой толщине волокна. Можно предположить, что прочность «Эндюранс» обеспечивается множеством тончайших углеродных волокон, натянутых по кольцу — подобно тросам, которые держат подвесной мост, изгибаясь и растягиваясь при сильном ветре. Но тогда кольцо стало бы очень гибким. А оно должно обладать достаточной жесткостью, чтобы изгибающие кольцо силы приливной гравитации не столкнули друг с другом его модули.

Конструкторы (в Кип-версии) приложили немало усилий, чтобы «Эндюранс» был устойчив к деформациям, но при этом, подвергаясь воздействию приливных сил, значительно превышающих ожидаемые, мог деформироваться без разрушения.

#### Взрыв на орбите вокруг планеты Манн

Такой подход к конструированию корабля приносит свои плоды, когда доктор Манн невольно инициирует сильный взрыв, который размыкает кольцо «Эндюранс», уничтожает два модуля и еще два повреждает (рис. 20.2).





Рис. 20.2. Вверху: взрыв на «Эндюранс», выше — посадочный модуль, ниже — планета Манн. (Десять радиальных лучей света не имеют прямого отношения к взрыву, это эффект светорассеивания в объективе камеры.) Внизу: поврежденный взрывом «Эндюранс» (Кадры из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Взрыв заставляет кольцо вращаться с такой скоростью, что его модули подвергаются центробежной силе величиной в  $70g$  (то есть в 70 раз больше притяжения Земли). Несмотря на это, разомкнутое кольцо не продолжает ломаться, а модули не сталкиваются друг с другом. Это, в Кип-версии, результат блестящей работы искусных инженеров, рассчитавших конструкцию на наихудшие условия!

Кстати говоря, я приятно поражен тем, как в фильме показан взрыв. В космосе взрывы беззвучны, поскольку там нет воздуха, в котором распространялись бы звуковые волны. И взрыв «Эндюранс» беззвучен. Пламя от такого взрыва должно быстро погаснуть, поскольку в космосе нет кислорода, который бы его подпитывал. И в фильме пламя гаснет быстро. Пол Франклин рассказал мне, сколько усилий стоил его команде этот взрыв, ведь он был снят на съемочной площадке, а не нарисован на компьютере. Еще один пример того, как тщательно Кристофер Нолан придерживался научной достоверности.

Разговор об окрестностях Гаргантюа привел нас к физике планет (приливная деформация, цунами, приливные боры...) и далее, через колебания Гаргантюа и поиск следов органической жизни, — к инженерии (конструкция «Эндюранс» и последствия взрыва). Как бы ни любил я эти темы — а я проводил исследования или писал учебники по большинству из них, — не они предмет моей главной страсти. Моя главная страсть — это экстремальная физика, физика на границе человеческих познаний и за ними. Об этом я сейчас и расскажу.

## VI

### ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ФИЗИКА

## Четвертое и пятое измерения

### Время как четвертое измерение



Пространство нашей Вселенной обладает тремя осями координат: «верх — низ», «восток — запад» и «север — юг». Однако чтобы пообедать с подружкой, 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<sup>65</sup>.

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 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



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.

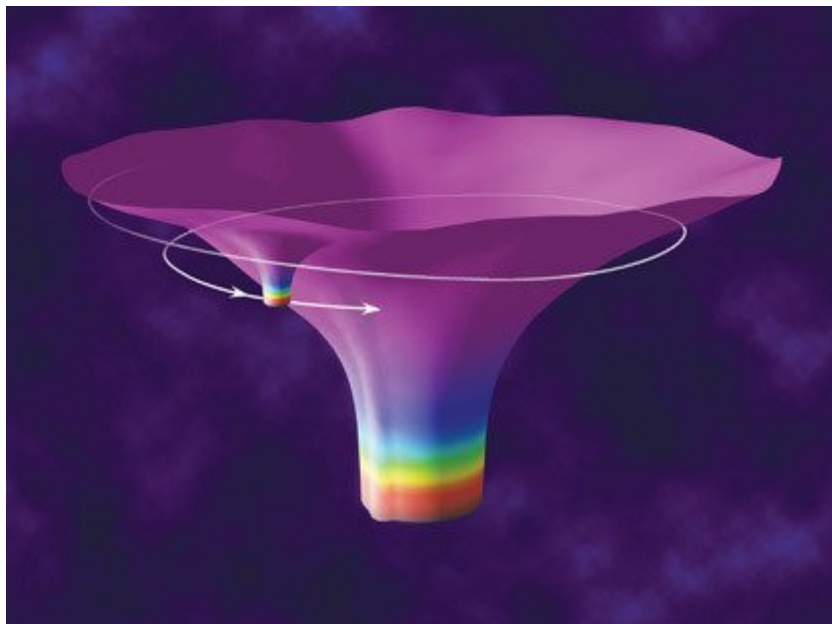


Рис. 21.1. Маленькая черная дыра, падающая по спирали в большую черную дыру: вид из балка, одно пространственное измерение опущено (Рисунок Дона Дэвиса по моему наброску.)

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 балк. Сформулировать законы теории относительности, которые управляют искривлением, можно без участия балка. В сущности, именно так почти всегда мы и поступаем. До восьмидесятых балк 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 балк»? 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<sup>66</sup>. 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 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.



Рис. 21.2. Слева: Майкл Грин (слева) и Джон Шварц (справа) путешествуют автостопом, 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»)

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



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 браной 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 бране, над и под ней, как на рис. 21.3.



Рис. 21.3. Наша Вселенная как брана с четырьмя пространственно-временными измерениями, находящаяся в пятимерном балке. Два измерения — время и «верх — низ» — здесь опущены

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.

## 22

Сущности из балка

Двумерная брана и трехмерный балк

И

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.

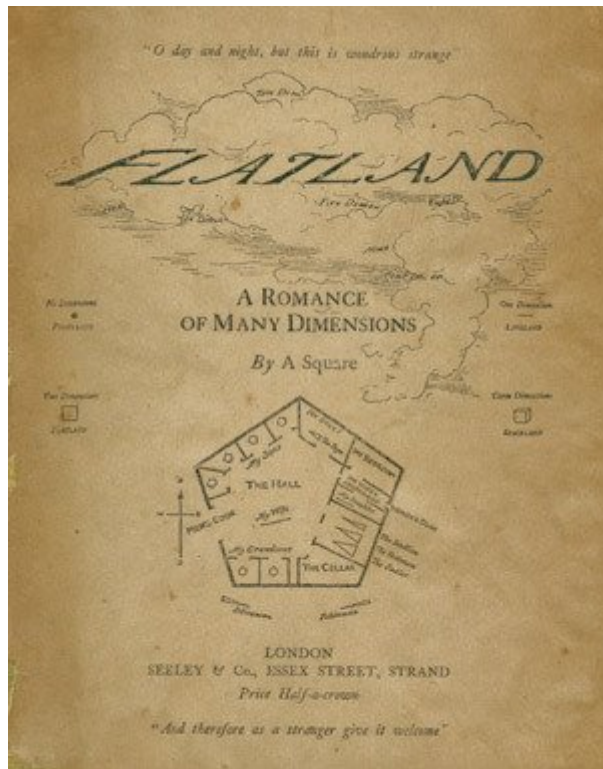


Рис. 22.1. Обложка первого издания «Флатландии»

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<sup>67</sup>. Кроме того, когда Квадрат живет во Флатландии, его посещает сферическая сущность из Спейсландии.

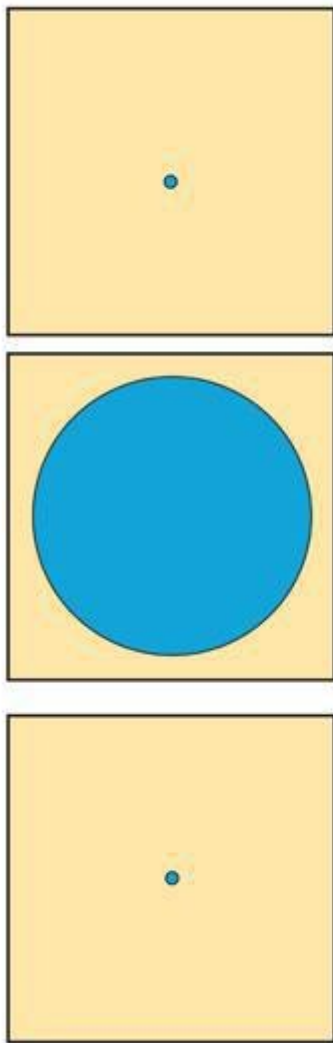
При нашей первой встрече с Кристофером Ноланом мы с радостью обнаружили, что оба знаем и любим роман Эбботта.

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.

Вид в двумерной бране



Вид из трехмерного балка

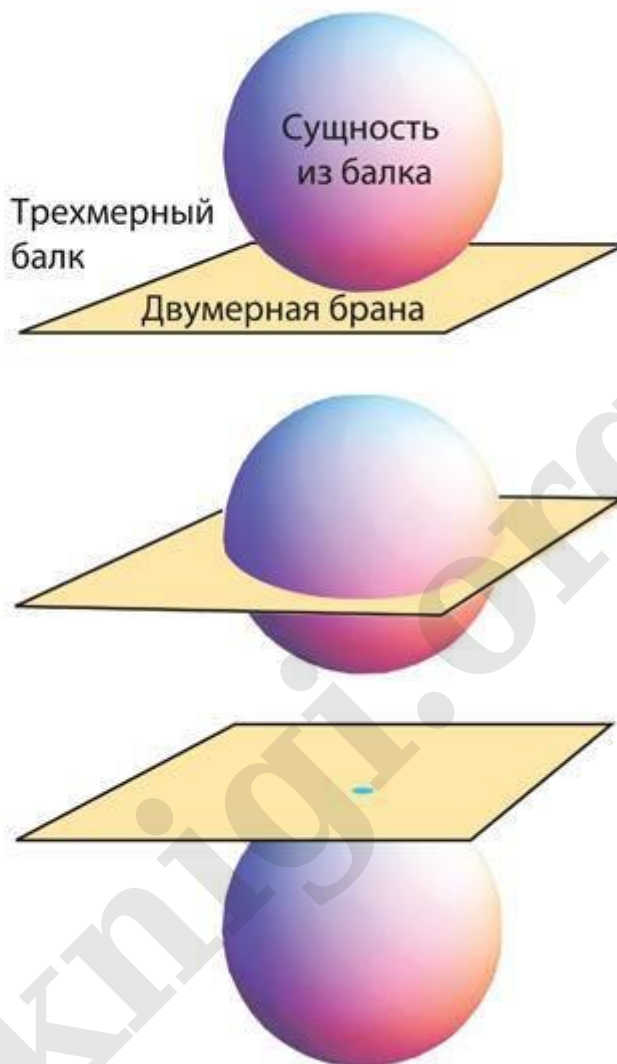


Рис. 22.2. Трехмерная сфера проходит через двумерную брану

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



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).



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

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.

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).



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

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 Мёрфу». 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.

## 23

### Ограничение гравитации

#### Проблема гравитации в пяти измерениях



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 удержать 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.

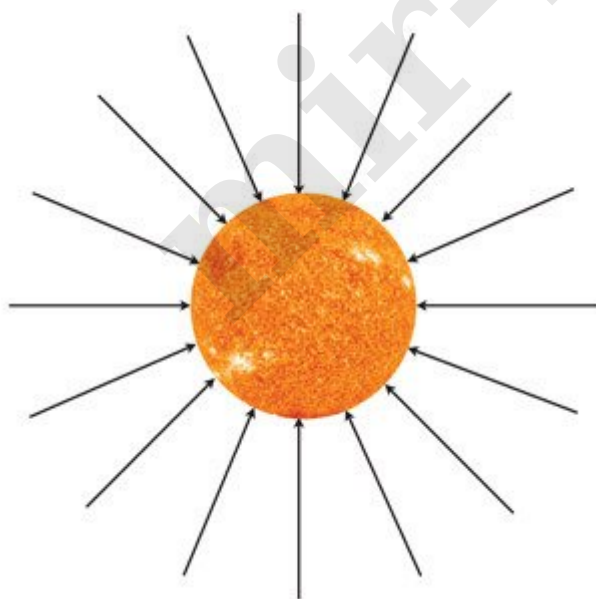


Рис. 23.1. Силовые линии гравитационного поля вокруг Солнца

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  $1/r^2$  68. Солнечное притяжение, действующее на Землю, будет в 200 раз слабее, а действующее на Сатурн — в 2000 раз слабее. Этак Солнце не сможет удерживать планеты рядом с собой, и они улетят прочь, в межзвездное пространство.

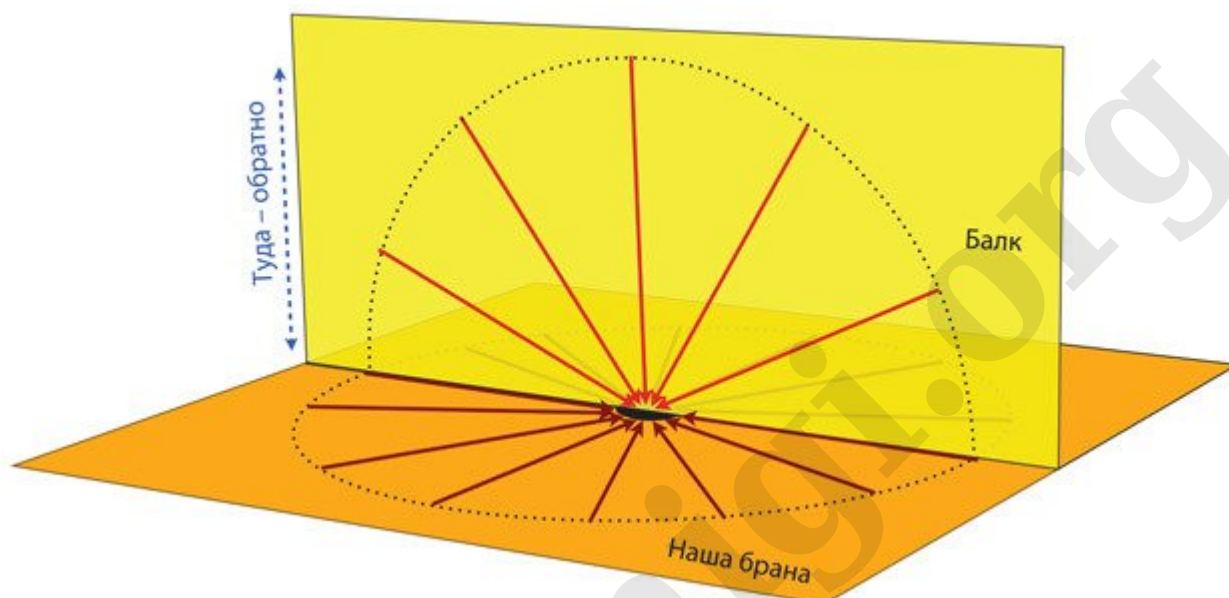


Рис. 23.2. Силовые линии гравитационного поля распространяются в балке радиально, если балк не искривлен. Пунктирные окружности изображены здесь лишь для наглядности (Перерисовка с иллюстрации из книги Лизы Рэндалл «Закрученные пассажи: Проникая в тайны скрытых размерностей пространства» [Рэндалл 2011].)

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».

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.

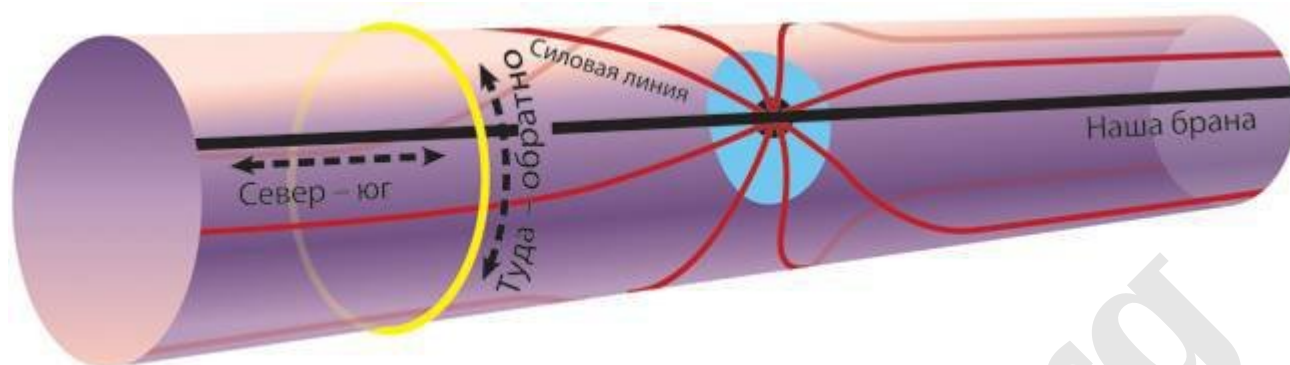


Рис. 23.3. Если измерение «туда — обратно» (желтая линия) свернуто, тогда за пределами синего диска силовые (красные) линии гравитационного поля частицы проходят параллельно нашей бране

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.

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



В 1999 году Лиза Рэндалл из Принстонского университета и Массачусетского технологического института вместе с Раманом Сандрамом 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<sup>69</sup>. 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<sup>70</sup>. Пока что достаточно сообщить, что это весьма естественный механизм образования искривлений. Однако само искривление анти-де-Ситтера<sup>71</sup> (обозначается AdS) вряд ли покажется вам естественным. Скорее ровно наоборот.



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

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.

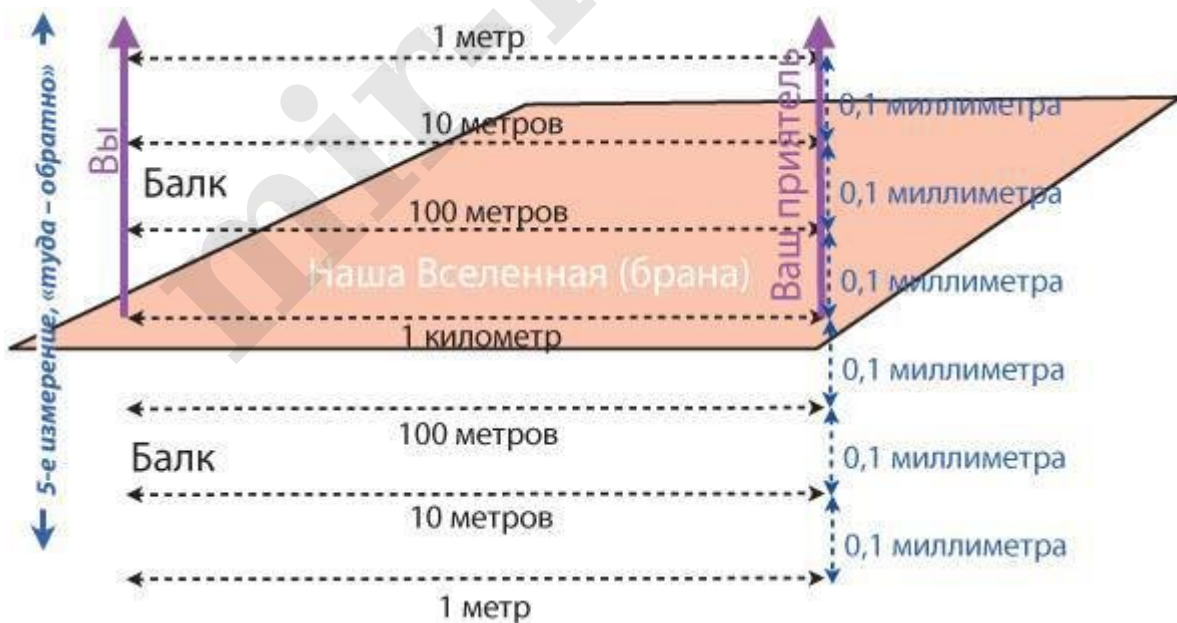


Рис. 23.5. AdS-искривление балка

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<sup>72</sup>. 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, 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<sup>73</sup>.

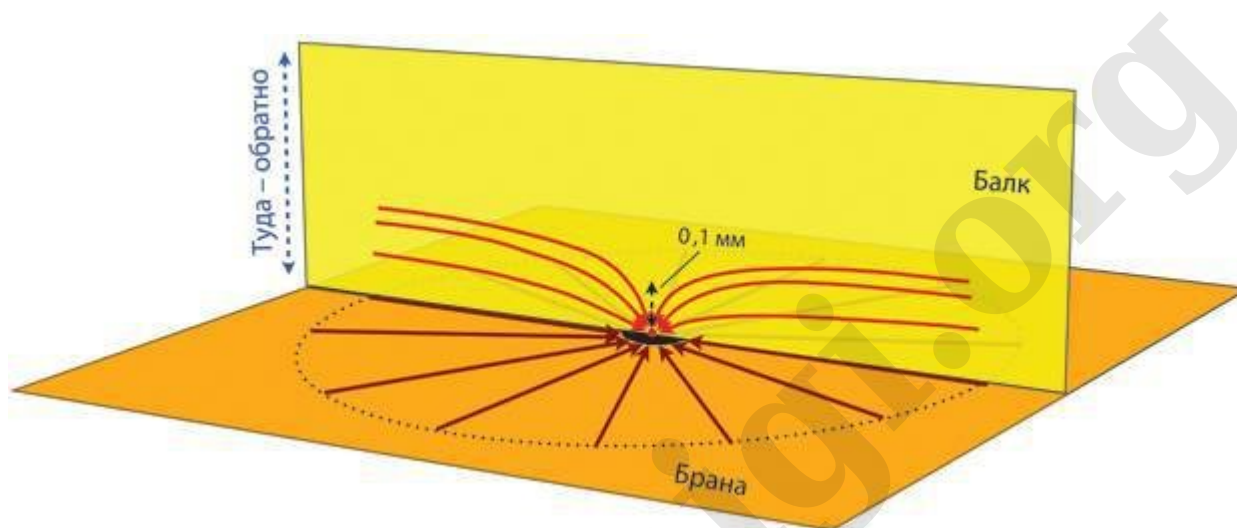


Рис. 23.6. Если в балке происходит AdS-искривление, силовые линии гравитационного поля изгибаются, выстраиваясь параллельно бране, поскольку пространство, в котором они могут распространяться над браной, ограничено (Перерисовка с иллюстрации из [Рэндалл 2011].)

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.

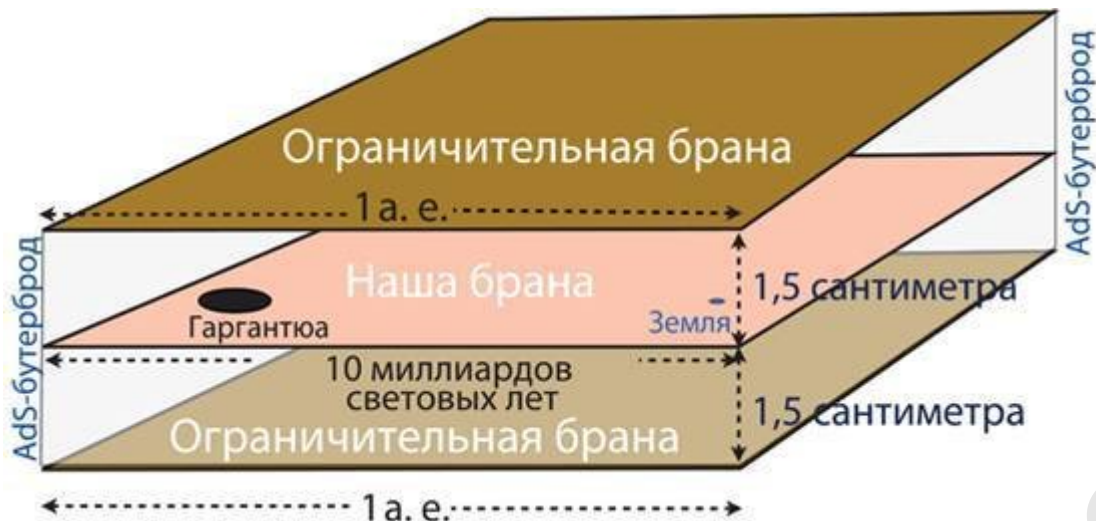


Рис. 23.7. AdS-бутерброд с двумя ограничительными бранами. AdS-слой между бранами обозначен светло-серым

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 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 посильнее — коробится. Также и ограничительные браны будут выгибаться, пока не столкнутся с нашей браной (нашей Вселенной), уничтожив ее. Уничтожение целой Вселенной! Хорошенькое дело!



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

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».

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 макаронину<sup>74</sup>.

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.

## Гравитационные аномалии

Гравитационная аномалия — это нечто такое, что связано с гравитацией и не укладывается в наши представления о Вселенной или не соответствует нашему пониманию законов физики, управляющих Вселенной: например падения книг в «Интерстеллар», которые Мёрф считает проделками призрака.

С середины XIX столетия физики со всем рвением выискивают новые гравитационные аномалии и изучают уже найденные. Почему? Потому, что исследование любой истинной аномалии может привести к научной революции, коренному изменению наших взглядов на то, что мы считаем истиной

И

. Начиная с середины XIX века подобное происходило уже трижды.

Попытки профессора Брэнда разобраться с гравитационными аномалиями в «Интерстеллар» — вполне в духе этих революций, о которых я сейчас вкратце расскажу.

### Аномальная прецессия орбиты Меркурия

И

Ньютоновский закон обратных квадратов для гравитации (см. главу 2 и главу 23) требует, чтобы орбиты планет, вращающихся вокруг Солнца, были эллиптическими. На каждую планету действует также и гравитационное притяжение других планет, что заставляет ее эллиптическую орбиту сдвигаться в пространстве — прецессировать.

В 1859 году астроном Урбен Леверье из Парижской обсерватории объявил, что обнаружил аномалию орбиты Меркурия. Рассчитав полную прецессию орбиты Меркурия, вызванную влиянием других планет, он получил неверный результат. Наблюдаемая прецессия оказалась больше расчетной примерно на 0,1 секунды дуги на каждый оборот Меркурия вокруг Солнца (рис. 24.1).

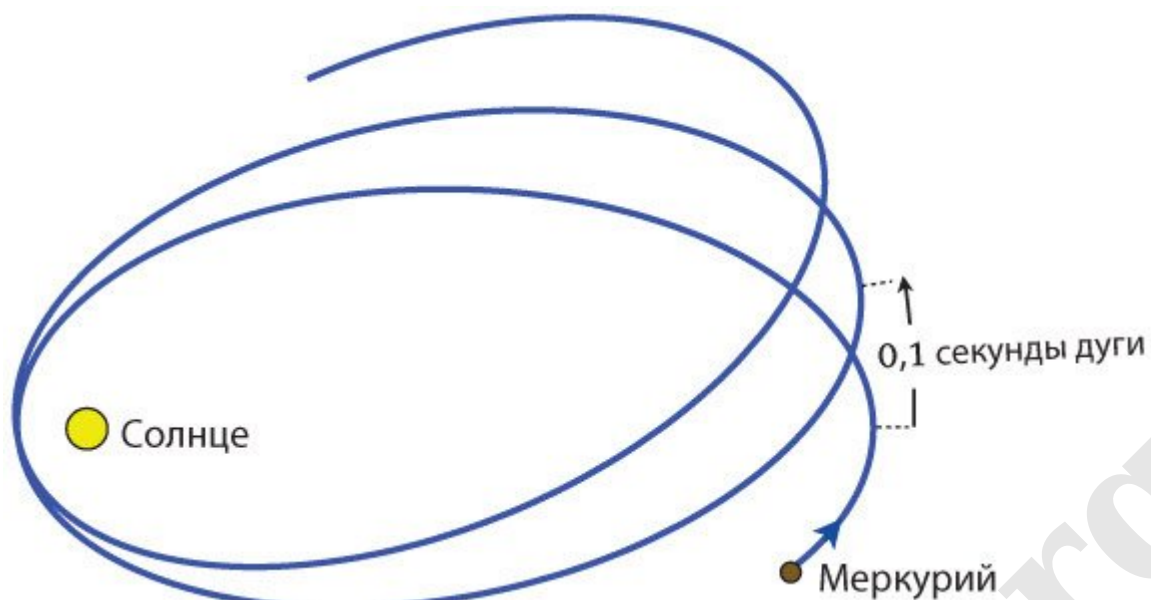


Рис. 24.1. Аномальная прецессия орбиты Меркурия. Я утрировал эллиптичность орбиты и величину прецессии

Конечно, 0,1 секунды дуги — это совсем небольшой угол, всего одна десятиллионная от полной окружности. Однако из ньютоновского закона обратных квадратов следует, что даже такой крохотной аномалии быть не должно.

Леверье решил, что аномалия вызвана притяжением еще не открытой планеты, находящейся ближе к Солнцу, чем Меркурий, — он назвал ее Вулкан.

Астрономы долго и безуспешно искали Вулкан. Но не могли ни отыскать его, ни придумать иное объяснение аномалии. К 1890 году созрело решение: ньютоновский закон обратных квадратов неверен — но совсем чуть-чуть.

И что означало это «чуть-чуть»? Как оказалось, это «чуть-чуть» предвещало революцию. Ту самую, которую совершил Эйнштейн 25 лет спустя. Искривление времени и пространства наделяет Солнце силой гравитации, которая подчиняется закону обратных квадратов, но лишь приблизительно, не абсолютно точно.

Осознав, что его новые релятивистские законы объясняют наблюдаемую аномалию, Эйнштейн пришел в восторг. Он почувствовал, будто что-то у него внутри щелкнуло, и его сердце заколотилось как бешеное: «Несколько дней я был вне себя от радостного возбуждения».

На сегодняшний день измеренная аномалия прецессии и прогнозы законов Эйнштейна совпадают с точностью до одной тысячной (одной тысячной от аномальной прецессии), что соответствует точности измерений — грандиозное достижение Эйнштейна!

#### Аномальные орбиты галактик



В 1933 году астрофизик Фриц Цвикки из Калтеха заявил, что обнаружил крупную аномалию орбитального движения галактик относительно друг друга. Галактики находились в скоплении Кома (рис. 24.2), состоящем примерно из тысячи галактик и расположенном в 300 миллионах световых лет от Земли, в созвездии Волосы Вероники.

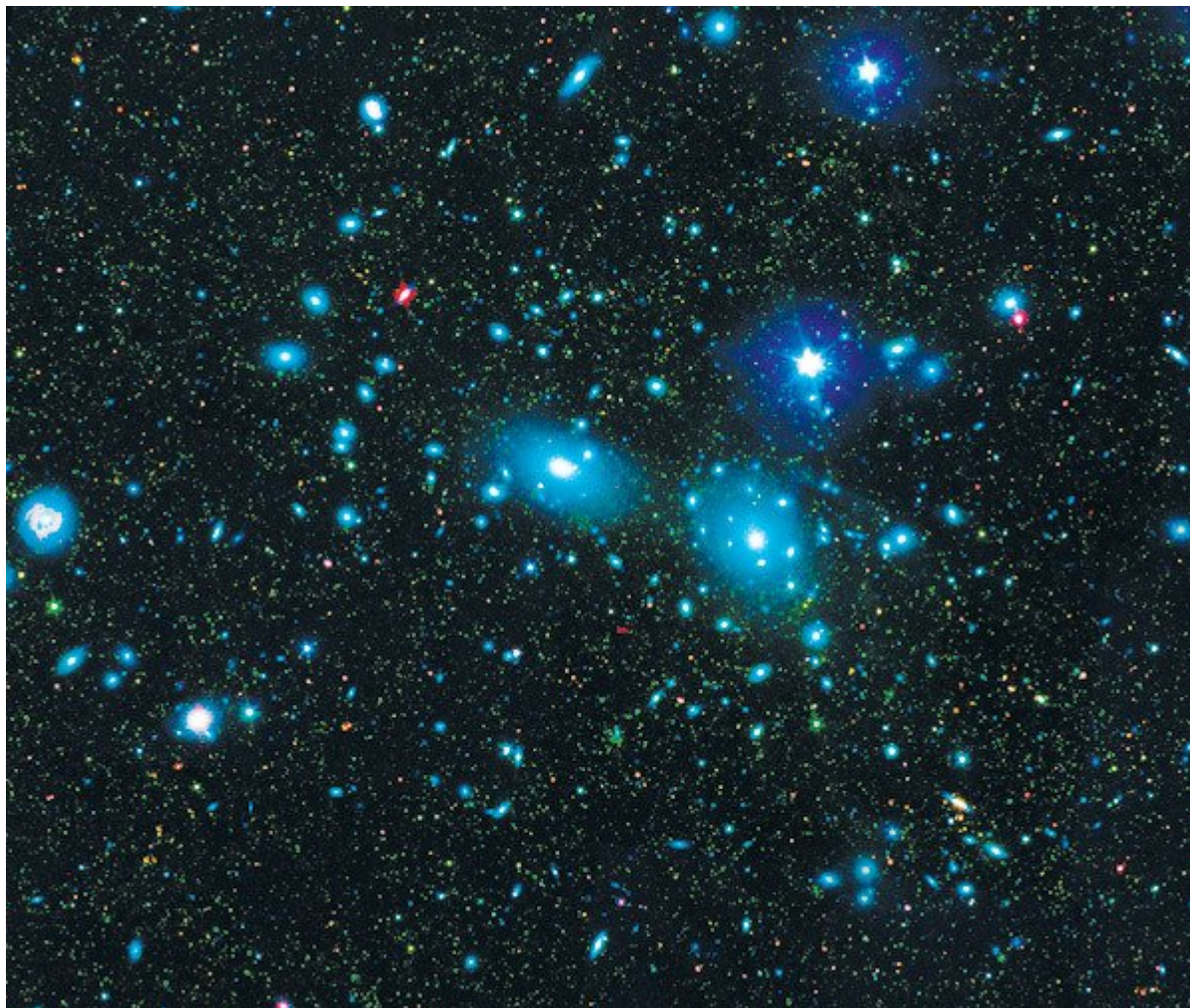


Рис. 24.2. Галактическое скопление Кома, увиденное через сильный телескоп

Пользуясь данными о доплеровском сдвиге в спектральных линиях галактик, Цвикки мог оценить, насколько быстро они движутся друг относительно друга, а измерив яркость каждой галактики — оценить ее массу и, следовательно, гравитационное притяжение. Галактики двигались так быстро, что их гравитационное притяжение не смогло бы удержать скопление от распада. Из всех наших знаний о Вселенной и гравитации явно следует, что этим галактикам положено разлететься в разные стороны и вскоре скопление должно полностью исчезнуть. В таком случае выходит, что скопление образовалось из-за случайных перемещений галактик и должно разрушиться в мгновение ока (по сравнению с другими астрономическими явлениями).

Но этот вывод казался Цвикки совершенно невероятным. Что-то было не так с нашими привычными взглядами. Цвикки сделал обоснованное предположение: скопление Кома должно быть заполнено некой «темной материей», гравитация которой достаточно сильна, чтобы удерживать скопление от распада.

Надо заметить, что, по мере того как росла точность измерений, астрономы и физики находили все больше и больше аномалий, но каждой из них в конце концов находилось объяснение, лишаящее ее статуса аномалии. Только не в этом случае. Более того, к 1970-м годам стало ясно, что так называемая темная материя пронизывает практически все скопления галактик и даже отдельные галактики. К началу этого века выяснилось, что темная материя гравитационно линзирует свет, исходящий от более далеких галактик (рис. 24.3), — так же, как Гаргантюа линзирует свет, исходящий от звезд (см. главу 8). Сегодня этот эффект линзирования используется для картографирования темной материи в нашей Вселенной.



Рис. 24.3. Темная материя в скоплении галактик Abell 2218 гравитационно линзирует свет от более далеких галактик. Изображения линзированных галактик дугообразны (обведены фиолетовыми овалами), подобно изображениям, которые видны при гравитационном линзировании Гаргантюа (см. главу 8)

Сейчас физики вполне уверены, что открытие темной материи — свершившаяся революция и что эта материя состоит из фундаментальных частиц незнакомого нам типа, причем типа, предсказанного наиболее перспективными на сегодняшний день концепциями в квантовой физике. Отныне ученые ищут святой Грааль — пытаются обнаружить частицы темной материи, безнаказанно пролетающие мимо нас, и измерить их свойства.

#### Аномальное ускорение расширения Вселенной



В 1998 году две исследовательские группы, независимо друг от друга, обнаружили поразительную аномалию расширения нашей Вселенной<sup>75</sup>. В 2011 году руководители групп (Сол Перлмуттер и Адам Рисс из Калифорнийского университета в Беркли и Брайан Шмидт из Австралийского национального университета) получили за это открытие Нобелевскую премию по физике.

Обе группы наблюдали за взрывами сверхновых. Подобный взрыв происходит, когда у массивной звезды заканчивается ядерное топливо, она коллапсирует, превращаясь в нейтронную звезду, и энергия коллапса разрывает на части ее внешние слои. Ученые

обнаружили, что далекие сверхновые более тусклые, чем ожидалось, а значит, находятся дальше, чем ожидалось. Настолько дальше, что стало ясно: в прошлом Вселенная расширялась медленнее, чем в наши дни. Расширение Вселенной ускоряется (рис. 24.4).

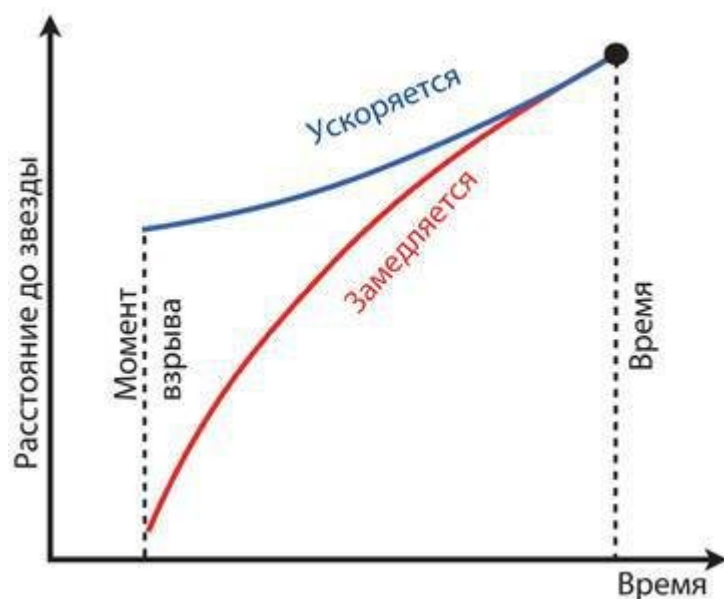


Рис. 24.4. Расстояние до звезды в момент взрыва (когда был испущен видимый нами свет) в двух вариантах: расширение Вселенной замедляется (красная кривая) или ускоряется (синяя). Наблюдаемый взрыв оказался тусклее, чем ожидалось, а значит дальше. Следовательно, Вселенная должна ускоряться

Однако из наших представлений о гравитации и о Вселенной явно следует, что всё существующее во Вселенной (звезды, галактики, скопления галактик, темная материя и т. д.) должно гравитационно притягиваться друг к другу. И это притяжение должно сдерживать расширение Вселенной. То есть расширение со временем должно замедляться, а не ускоряться.

По этой причине я не поверил в заявление об ускорении Вселенной, как не поверили многие мои коллеги — астрономы и физики. Мы не верили до тех пор, пока другие наблюдения, произведенные совершенно иными методами, не переубедили нас. Тогда мы сдались.

Так в чем же дело? Есть два варианта: либо в законах теории относительности что-то не так с гравитацией, либо Вселенную наполняет нечто помимо обычного вещества и темной материи. Нечто, порождающее гравитационное отталкивание.

Большинство физиков вовсе не жаждут отказываться от обожаемых ими законов теории относительности, а потому склоняются ко второму варианту. Гипотетическое вещество, обладающее свойством отталкивания, получило название «темная энергия».

Ясной картины пока нет. Но если аномальное ускорение действительно обусловлено влиянием темной энергии (что бы это ни было), то из гравитационных наблюдений следует, что 68 процентов массы Вселенной составляет темная энергия, 27 процентов — темная материя и лишь пять процентов составляет «обычное» вещество, из которого состоим мы с вами, а также планеты, звезды и галактики.

Так что у современных физиков есть еще одна священная миссия — разобраться, противоречит

ли ускоренное расширение Вселенной законам теории относительности (и если так, то какие законы верны) или ускорение вызвано влиянием отталкивающей темной энергии (и если так, какова природа этой темной энергии).

## Гравитационные аномалии в «Интерстеллар»



В отличие от гравитационных аномалий, о которых я рассказывал только что, в «Интерстеллар» гравитационные аномалии наблюдаются на Земле.

Физики, начиная с самого Исаака Ньютона, усиленно искали аномалии на Земле. Находок было немало, но после более тщательных исследований все они оказались мнимыми.

В «Интерстеллар» аномалии потрясают своей причудливостью и силой, а также тем, как они изменяются со временем. Если бы что-либо подобное происходило в XX столетии или в начале двадцать первого, физики, конечно, обратили бы на это внимание и кинулись бы эти аномалии изучать. Так или иначе, в эпоху «Интерстеллар» с земной гравитацией определенно что-то произошло.

И действительно, Ромилли говорит Куперу: «Мы стали находить гравитационные аномалии [на Земле. — К. Т.] почти пятьдесят лет назад». И примерно в то же время обнаруживается самая значительная аномалия — внезапное, буквально из ниоткуда, появление червоточины вблизи Сатурна.

В начальной сцене фильма Купер и сам сталкивается с аномалией, когда пытается совершить посадку на «Рейнджере». Он говорит об этом Ромилли: «Над протоками что-то отключило мою систему управления».

Система GPS, которую Купер приспособил для управления комбайнами на кукурузном поле, тоже вышла из строя, и комбайны съехались к его дому. Купер считает, что виной этому гравитационные аномалии, вызвавшие сбой системы гравитационной коррекции, которая необходима для правильной работы GPS (рис. 4.2).

В начале фильма мы видим, как остолбеневшая Мёрф смотрит на пыль, которая с неестественной быстротой оседает на пол в ее спальне и собирается полосами, напоминающими штрихкод. Купер смотрит на эти полосы (рис. 24.5) и бросает монетку. Монетка по аномальной траектории устремляется к одной из полос.



Рис. 24.5. Купер разглядывает пылевой узор на полу в спальне Мёрф (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Я полагаю, что команда профессора Брэнда собрала множество данных по аномалиям. Наиболее интересные (для меня как физика и для профессора Брэнда как героя Кип-версии) из этих данных относятся к изменениям приливной гравитации.

В главе 4 мы говорили о приливной гравитации черной дыры, а также о действующей на Землю приливной гравитации Луны и Солнца. В главе 17 мы узнали, как приливная гравитация Гаргантюа вызывает сильнейшие «миллеротрясения», а также цунами и приливные боры. В главе 16 мы встретились с крохотными растяжениями и сжатиями в гравитационной волне.

Приливная гравитация свойственна не только черным дырам, Солнцу, Луне и гравитационным волнам, но также и любым гравитирующим объектам. Например, содержащие нефть участки земной коры менее плотны, чем участки, состоящие только из горных пород, из-за чего их гравитационное притяжение слабее. Это порождает специфическую картину сил приливной гравитации.

На рис. 24.6 я изобразил приливные силы с помощью тендекс-линий (о последних мы говорили в главе 4). Сжимающие (синие) тендекс-линии выходят из нефтеносной области, тогда как растягивающие (красные) тендекс-линии выходят из более плотной области, где нефти нет. И, как всегда, эти тендекс-линии двух типов перпендикулярны друг другу.

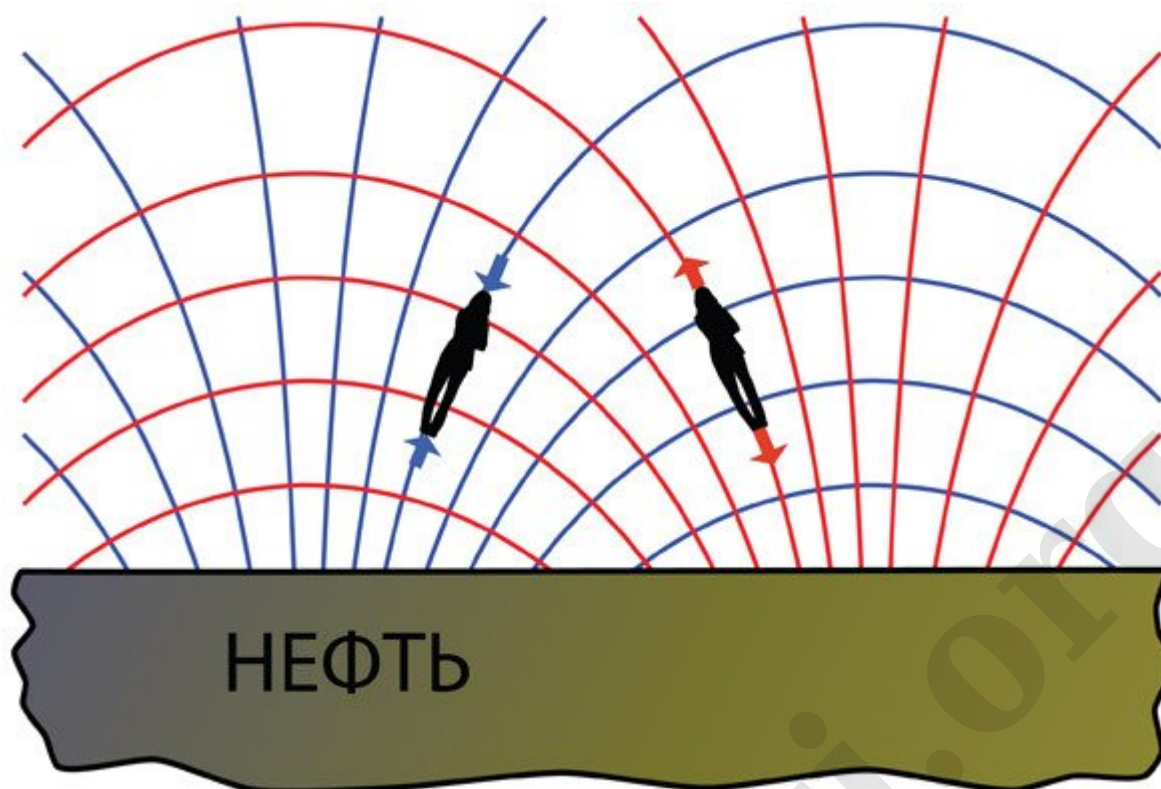


Рис. 24.6. Тендекс-линии над участком земной коры. Вдоль красных линий действует приливное растяжение, вдоль синих — сжатие

Составить карту приливных сил помогает такой измерительный прибор, как гравитационный градиометр. Он состоит из двух перекрещенных стержней, соединенных с торсионной пружиной. На концах каждого из стержней закреплены массы, на которые действует гравитация. В нормальном состоянии стержни перпендикулярны друг другу, но на рис. 24.7 синие тендекс-линии прижимают две верхние массы одна к другой, и то же происходит с двумя нижними массами. При этом красные тендекс-линии отталкивают друг от друга попарно левые и правые массы. В итоге угол между стержнями уменьшается до тех пор, пока пружина не уравновесит приливные силы. Этот угол, «угол считывания», и есть показание градиометра.

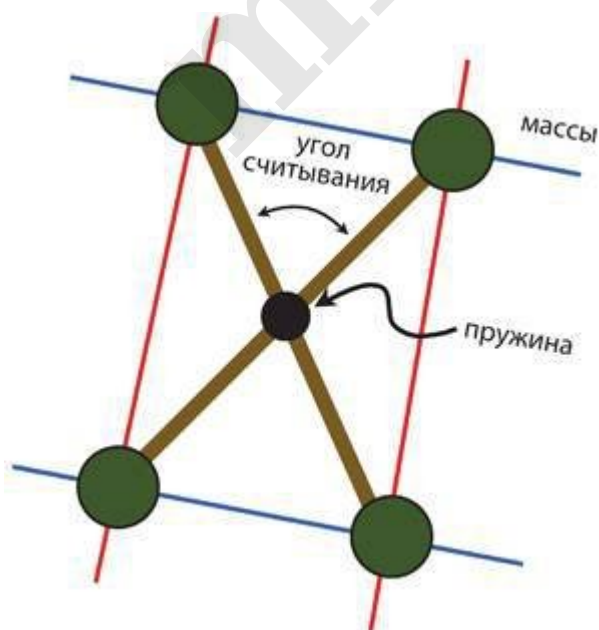


Рис. 24.7. Упрощенная схема гравитационного градиометра, разработанного и собранного Робертом Форвардом из Исследовательской лаборатории Хьюза, 1970

Если перемещать градиометр высоко над землей, слева направо над участком с рис. 24.6, его угол считывания будет увеличиваться над нефтеносными областями и уменьшаться над областями без нефти. Геологи используют градиометры (только более сложные) для поиска месторождений нефти и минералов.

NASA запустило в космос более сложный градиометр под названием GRACE76 (рис. 24.8), который предназначен для картографирования приливных сил Земли и наблюдения за медленными изменениями приливной гравитации, вызванными, к примеру, таянием ледяных щитов.

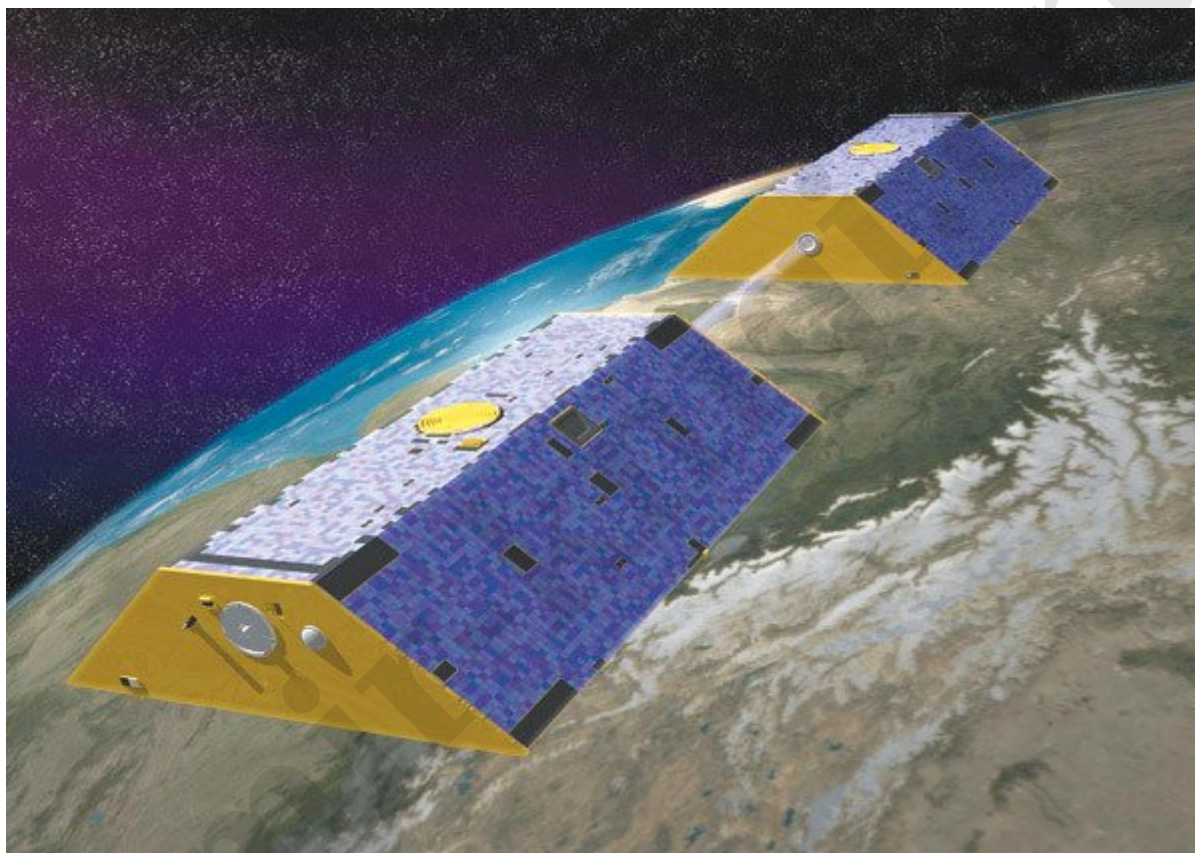


Рис. 24.8. GRACE: два спутника, каждый из которых отслеживает положение другого с помощью микроволновых сигналов, сближаются и отдаляются под действием тендекс-линий (на рисунке не показаны)

В Кип-версии большинство гравитационных аномалий, которые разыскивает и изучает команда профессора Брэнда, представляет собой внезапные изменения в узоре тендекс-линий над поверхностью Земли — изменения, происходящие без очевидных причин. Горные породы и залежи нефти в земной коре не перемещаются. Таяние ледяных щитов — слишком медленный процесс, чтобы вызывать столь быстрые изменения. Люди не наблюдают новых гравитирующих масс, проходящих рядом с градиометрами. Тем не менее градиометры регистрируют смену характера приливных сил. Пыль оседает полосами. Монетку Купера притягивает к одной из них.

Члены команды профессора Брэнда отслеживают эти изменения и, в частности, с интересом

выслушивают сообщение Купера. От собираемых данных и отталкивается профессор Брэнд в своих исследованиях гравитации, исследованиях, краеугольным камнем которых является уравнение профессора.

25

## Уравнение профессора



В «Интерстеллар» гравитационные аномалии волнуют профессора Брэнда по двум причинам. Если он поймет их природу, это может привести к революционному скачку в наших познаниях о гравитации, к скачку столь же грандиозному, как эйнштейновская теория относительности. Но что более важно, если профессор разберется, как управлять аномалиями, это поможет NASA эвакуировать большие колонии людей с умирающей Земли и отправить их к новому дому где-то на просторах Вселенной.

Ключом к пониманию аномалий и к управлению ими профессор считает уравнение, которое он записал на своей доске (рис. 25.7). В фильме он вместе с Мёрф бьется над решением этого уравнения.



Рис. 25.1. Майкл Кейн (профессор Брэнд) и я на съемочной площадке (в кабинете профессора Брэнда)

Блокнот Мёрф, блокнот профессора и доски в кабинете

Прежде чем начались съемки фильма, два выдающихся студента-физика из Калтеха заполнили

блокноты расчетами, связанными с уравнением профессора. Елена Мурчикова заполнила новенький блокнотик расчетами взрослой Мёрф — расчетами, записанными элегантным каллиграфическим почерком. Кейт Мэтьюс заполнила потрепанный блокнот вычислениями профессора Брэнда, почерком более неряшливым, какой присущ стариканам вроде профессора и меня.

В фильме взрослая Мёрф (актриса Джессика Честейн) обсуждает расчеты, записанные в ее блокноте, с профессором (актер Майкл Кейн). Мурчикова, специалист по квантовой гравитации и космологии, присутствовала на съемочной площадке, чтобы консультировать Честейн по поводу ее реплик, блокнота и того, что ей предстояло писать на доске. Они смотрелись потрясающе — две рыжеволосые женщины, одинаково прекрасные, но из совершенно разных миров, склонившиеся над блокнотом.

Что до меня, я, разумеется, по просьбе Кристофера Нолана, заполнил доску профессора Брэнда графиками и формулами (рис. 25.8), включая уравнение профессора. То самое уравнение! И я получил огромное удовольствие от беседы с Майклом Кейном (рис. 25.1), который, похоже, воспринимал меня как прототип своего героя. И неизъяснимое наслаждение было наблюдать, как Крис, истинный мастер своего дела, снимал сцены, получая в точности то, что хотел.

Однажды, за несколько недель до съемок сцены в кабинете профессора, мы с Крисом обсуждали, каким должно быть «то самое уравнение». (На рис. 1.2 из первой главы Крис держит в руках пачку листов с заметками по поводу этого уравнения.) Вот моя пространная интерпретация того, на чем мы сошлись, — моя экстраполяция.

#### Источник аномалий — пятое измерение

В Кип-версии профессор довольно быстро пришел к выводу, что причина аномалий — в гравитации из пятого измерения, из балка. Но почему?

В нашей четырехмерной Вселенной нет очевидных причин для внезапных изменений приливной гравитации. Например, в Кип-экстраполяции команда профессора, наблюдая приливную гравитацию над нефтяным месторождением, видит, как всего за несколько минут ожидаемая картина приливных сил (рис. 25.2 сверху) сменяется совершенно другой (рис. 25.2 снизу). Нефть никуда не перемещалась, горные породы не сдвигались. Ничего в нашей четырехмерной Вселенной не изменилось. Ничего, кроме приливной гравитации.

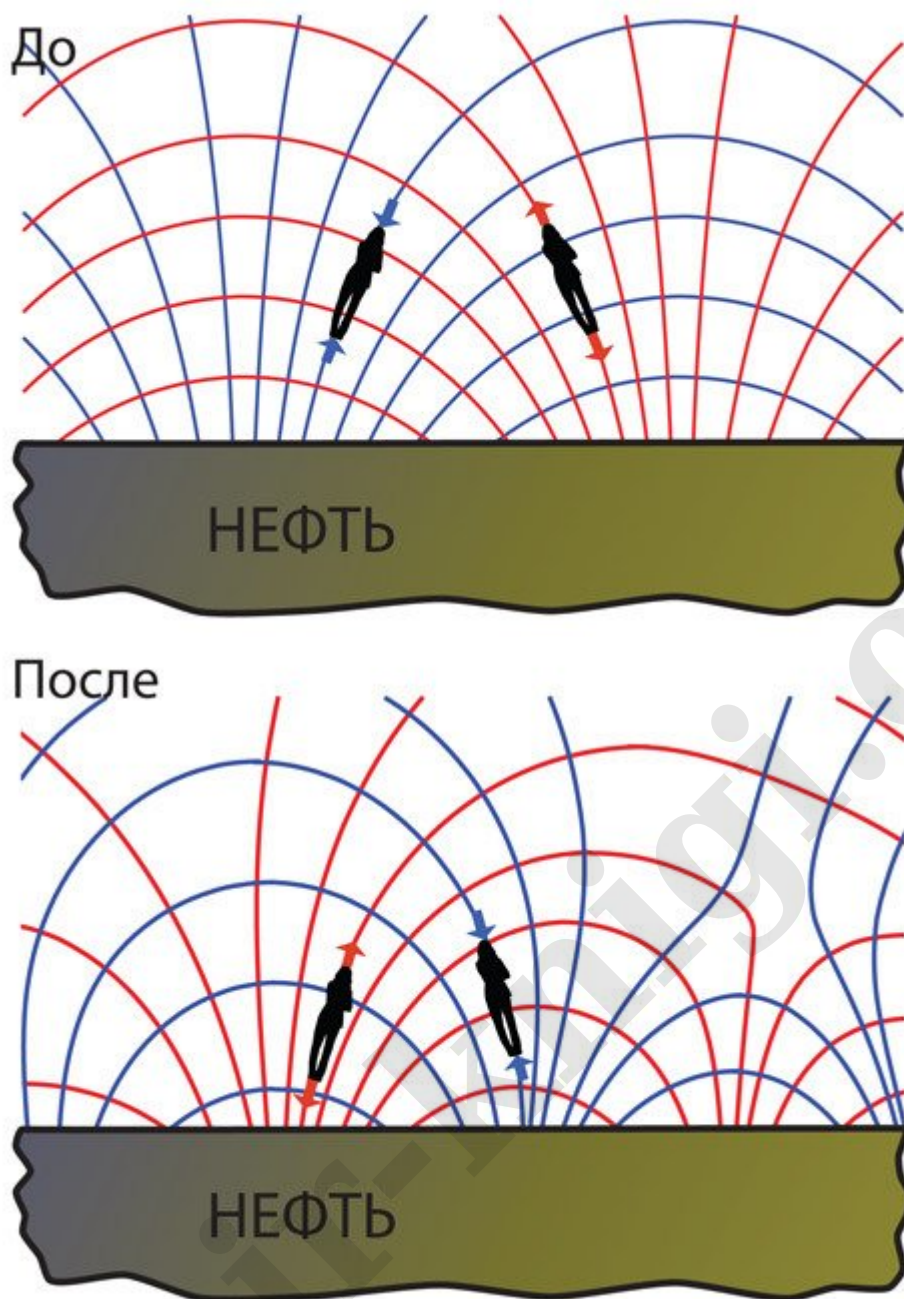


Рис. 25.2. Тендекс-линии (см. главу 4) приливной гравитации над нефтяным месторождением до и после внезапных изменений

Что-то должно быть причиной таких перемен. Если причина находится не в нашей Вселенной (нашей бране), значит, решает профессор, остается лишь одно место, где она может быть, — в балке.

В Кип-экстраполяции профессор может вообразить лишь три способа, которыми нечто, находящееся в балке, может вызвать аномалии; причем первые два он быстро отменяет.

Некий объект в балке (возможно, живой объект, сущность из балка) может приблизиться к нашей бране, но не проникать в нее (рис. 25.3 справа сверху). Гравитация этого объекта распространяется во всех измерениях балка и таким образом может достичь нашей браны. Однако AdS-слой, окружающий нашу брану (см. главу 23), развернул бы приливные тендекс-линии объекта параллельно бране, позволив лишь очень малой части гравитации воздействовать на нашу брану. И профессор отменяет этот вариант.

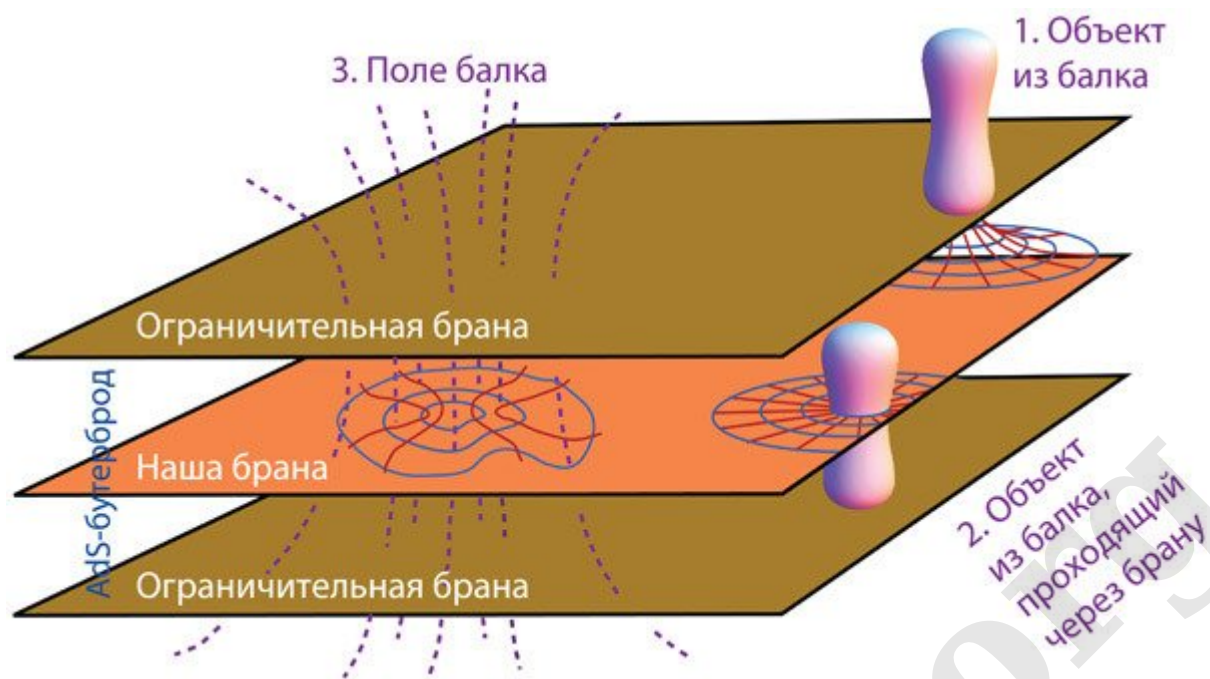


Рис. 25.3. Три способа, которыми балк может вызвать наблюдаемые гравитационные аномалии. Красные и синие кривые — приливные тендекс-линии, порождаемые объектом из балка или полем балка

Объект из балка, проходящий сквозь нашу брану, может порождать приливную гравитацию, картина которой меняется по мере движения объекта (рис. 25.3 справа посередине). Однако (в Кип-версии) большинство случаев изменения гравитации, с которыми имела дело команда профессора, не вписывается в это объяснение — наблюдаемые тендекс-линии, как правило, более рассеянные, чем тендекс-линии от локализованного объекта. Лишь некоторые приливные аномалии могли быть вызваны локализованными объектами, однако у большей их части должна быть другая природа.

Поля балка, проходящие через нашу брану, могли вызвать изменение приливной гравитации (рис. 25.3 слева). Это, решает в Кип-версии профессор, и есть наиболее подходящее объяснение большинства аномалий.

Что такое «поле балка»? Физики называют словом «поле» нечто, распространяющееся в пространстве и оказывающее воздействие на объекты. Мы уже встречались с несколькими видами полей, действующих в нашей Вселенной: в главе 2 это были магнитные поля (совокупности магнитных силовых линий), электрические поля (совокупности электрических силовых линий), гравитационные поля (совокупности гравитационных силовых линий), а в главе 4 — приливные поля (совокупности растягивающих и сжимающих тендекс-линий).

Поле балка — это совокупность силовых линий, располагающихся в пятимерном балке. Что это за силовые линии, профессор не знает, но он строит догадки (см. ниже). На рис. 25.3 показано поле балка (фиолетовые пунктирные линии), проходящее через нашу брану. Это поле вызывает в нашей бране приливную гравитацию (красные и синие тендекс-линии). По мере того как меняется поле балка, меняется и приливная гравитация, что и служит (по мнению профессора) причиной большей части наблюдаемых аномалий.

Однако, подозревает (в Кип-версии) профессор, поля балка способны не только на это. Еще они могут управлять силой гравитации, порождаемой другими объектами нашей браны, будь то камень или планета.

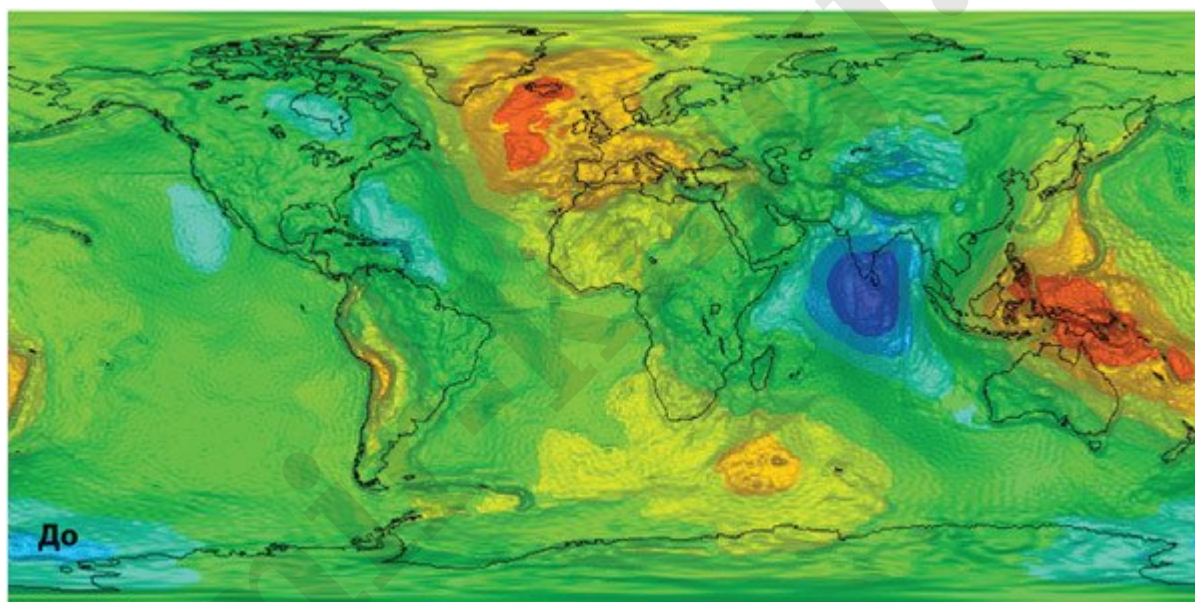
Поля балка управляют силой гравитации

Гравитацией каждой частицы вещества в нашей бране управляет (с высокой точностью) ньютоновский закон обратных квадратов (см. главу 2 и главу 23). Гравитационное притяжение выражается формулой  $g = Gm/r^2$ , где  $r$  — это расстояние от частицы вещества,  $m$  — масса этой частицы, а  $G$  — гравитационная постоянная, входящая в формулу всемирного тяготения.

Теория относительности Эйнштейна еще более точно описывает законы гравитации, и сила гравитации, а также сила всех искривлений пространства и времени, порожденных веществом, здесь тоже пропорциональна  $G$ .

Если балка нет и есть только наша четырехмерная Вселенная, законы Эйнштейна утверждают, что  $G$  — абсолютная постоянная, она одинакова в любой точке пространства и не меняется со временем.

Но если балка существует, законы теории относительности допускают изменение  $G$ . Возможно, рассуждает профессор, поля балка способны ее изменять. Вероятно, так и происходит, думает он. Это наилучшее объяснение одной из наблюдаемых в Кип-версии аномалий (рис. 25.4).



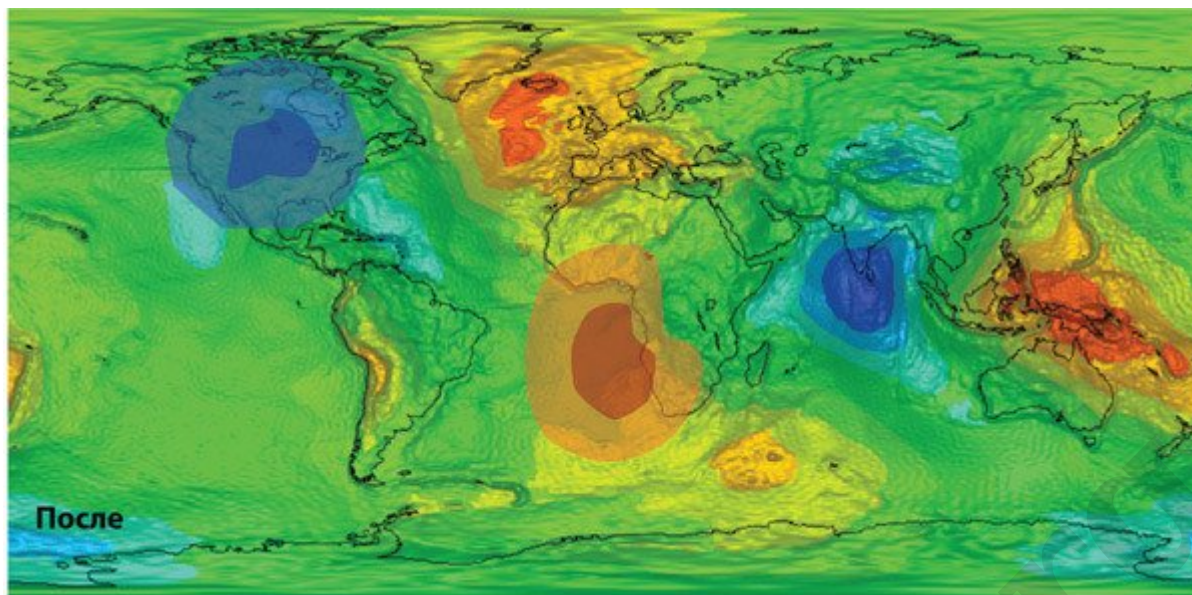


Рис. 25.4. Карты гравитационного притяжения Земли. Сверху: в 2014 году, по данным спутника GOCE. Снизу: после внезапного изменения в эпоху аномалий

Сила гравитационного притяжения Земли немного меняется от места к месту, поскольку отличающиеся друг от друга по плотности горные породы, залежи нефти, водные массивы и т. д. распределены по планете неравномерно. Различия в гравитации отображаются на карте с помощью орбитальных спутников. Самая точная на 2014 год карта составлена спутником GOCE77 Европейского космического агентства (рис. 25.4 сверху). По ней видно, что на 2014 год слабее всего земная гравитация на юге Индии (синее пятно), а сильнее всего — в Исландии и Индонезии (красные пятна).

В Кип-версии карта практически не менялась, пока не начали появляться аномалии. А затем весьма резко гравитационное притяжение Земли ослабело в Северной Америке и усилилось в Южной Африке (рис. 25.4 снизу).

Профессор Брэнд пытался объяснить это изменением приливных сил под влиянием полей балка, но испытывал затруднения. Лучшим объяснением, что он мог найти, было увеличение гравитационной постоянной  $G$  в недрах Земли под Южной Африкой и ее уменьшение в недрах под Северной Америкой. Видимо, эти изменения породило некое поле балка, проходящее через нашу брану и влияющее на  $G$ , решил профессор.

Поля балка — это не только ключ к гравитационным аномалиям на Земле, считает профессор Брэнд (в Кип-версии). Эти поля играют также две другие важные роли — они удерживают червоточину открытой и защищают нашу Вселенную от разрушения.

Как не дать червоточине схлопнуться

Если предоставить червоточину, которая соединяет Солнечную систему с окрестностями Гаргантюа, самой себе, она схлопнется (рис. 25.5). Наша связь с Гаргантюа будет прервана. Это однозначно следует из законов теории относительности Эйнштейна (см. главу 14).

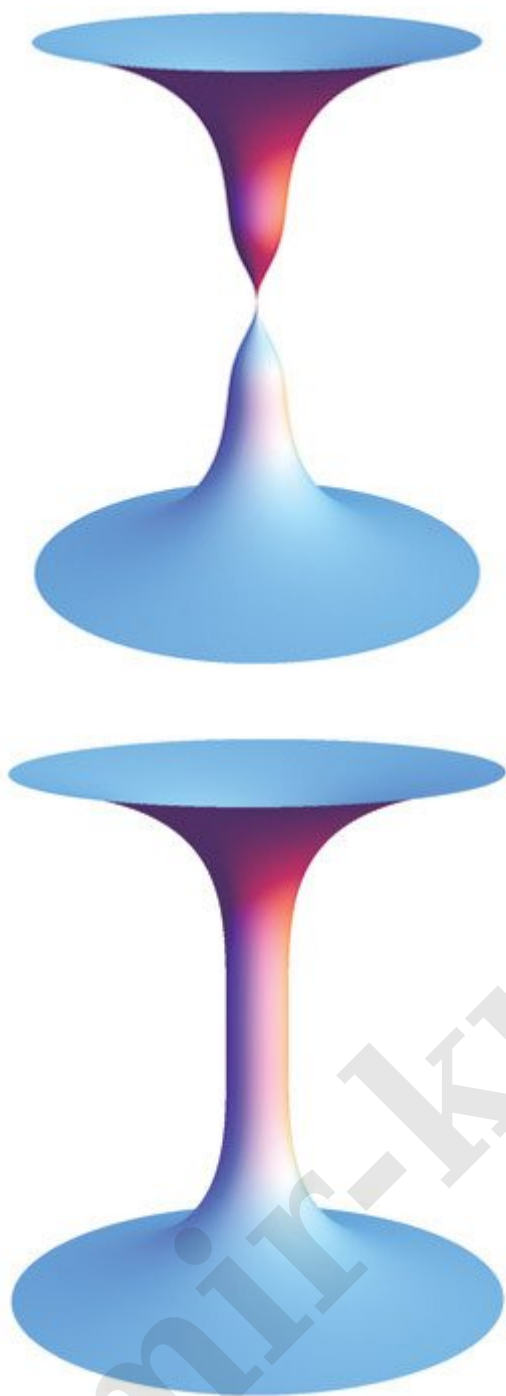


Рис. 25.5. Червоточины. Сверху: схлопывающаяся. Снизу: удерживаемая в открытом состоянии полями балка

Если исключить балку, единственный способ удерживать червоточину открытой — это пронизать ее экзотической материей со свойством гравитационного отталкивания (см. главу 14). Темная энергия, которая (вероятно) убыстряет расширение Вселенной (см. главу 24), скорее всего, не обладает достаточным для наших целей гравитационным отталкиванием. Причем на 2014 год представляется вероятным, что законы квантовой физики не позволят даже чрезвычайно развитой цивилизации когда-либо собрать столько экзотической материи, чтобы удерживать червоточину открытой. И я подозреваю, что в эпоху профессора Брэнда ученые лишь еще больше утвердятся в этой мысли.

Но, понимает профессор (в Кип-экстраполяции), есть альтернатива: удерживать червоточину от схлопывания могут поля балка. А поскольку профессор считает, что червоточину создали и поместили возле Сатурна сущности из этого самого балка, ему эта версия кажется

перспективной.

## Как спасти Вселенную

Чтобы гравитация в нашей Вселенной с высокой точностью подчинялась ньютоновскому закону обратных квадратов, наша брана должна быть заключена между двух ограничительных бран с AdS-слоем между ними (см. главу 23). Однако ограничительные браны находятся под давлением<sup>78</sup> и подвержены короблению, словно игральные карты, зажатые между пальцев (рис. 23.8). Согласно теории относительности, все будет именно так, а не иначе.

Если этому короблению ничего не препятствует, произойдет столкновение ограничительных бран с нашей браной — с нашей Вселенной (рис. 25.6)<sup>79</sup>. И Вселенная неизбежно погибнет!

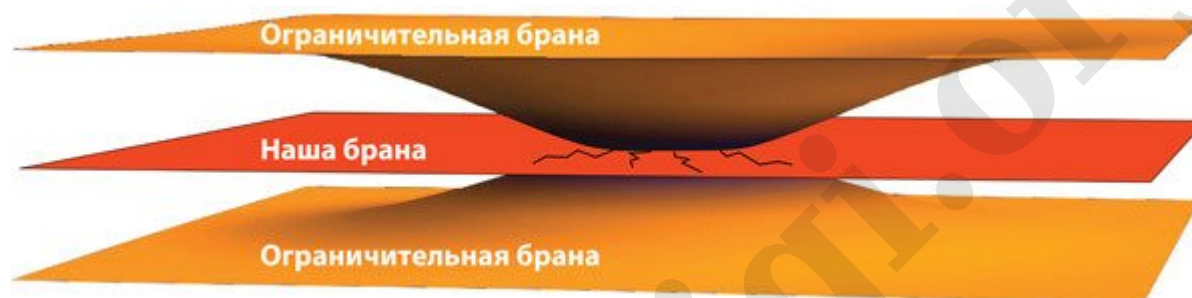


Рис. 25.6. Столкновение бран

Очевидно, что наша Вселенная не разрушилась, отмечает профессор в Кип-экстраполяции. Значит, что-то должно предохранять ограничительные браны от коробления. Единственное, что, по мнению профессора, подходит для этого, — поля балка. Как только ограничительная брана начинает прогибаться, поля балка должны каким-то образом на нее воздействовать, возвращая ей прямизну.

И наконец, уравнение профессора!

Законы физики описываются языком математики. Еще до того, как Купер встретил профессора Брэнда (в Кип-версии), профессор пытался составить математическое описание полей балка и их проявлений — того, как они порождают аномалии, как изменяют гравитационную постоянную  $G$  в нашей Вселенной, как удерживают червоточину открытой и как защищают нашу брану от столкновений.

Составляя это описание, профессор руководствовался данными наблюдений, собранных его командой, и эйнштейновскими законами физики, расширенными на пятое измерение.

Профессор выразил все свои идеи в одном уравнении, «том самом» уравнении, которое он записал на одной из досок в своем кабинете (рис. 25.7)<sup>80</sup>. Купер видит это уравнение во время первого визита в NASA, и оно все там же десятки лет спустя — когда Мёрф выросла, стала выдающимся физиком и помощницей профессора.

MY EQUATION  
for the Effective Action  $S(\lambda, \xi, Q, \dots)$

$$S = \int \sqrt{-g_5} d^5x \left\{ \mathcal{L}_{\text{bulk}} + \sum_{\substack{\text{branes} \\ Q=0,1,2}} \delta(\sigma(x^4) - \sigma_a) \mathcal{L}_{\text{brane}}^a \right\}$$

↑ brane location

Where!

$$\mathcal{L}_{\text{bulk}} = \frac{1}{16\pi G_5} (R_5 - 2\Lambda_5) - \frac{1}{2} \nabla_\lambda Q \nabla^\lambda Q - \frac{1}{2} U(Q) - \frac{1}{2} \sum_{\substack{\text{auxiliary} \\ \text{fields } i,j}} H_{ij}(Q^2) \nabla_A \Phi^i \nabla^A \Phi^j$$

$$\mathcal{L}_{\text{brane}}^0 = \frac{K}{16\pi G_5} + \frac{1}{2} (Q^2 - \lambda) \nabla_\mu \xi \nabla^\mu \xi + \frac{1}{2} \nabla_\mu \lambda \nabla^\mu \lambda + \frac{1}{2} \sum_{i,j} W_{ij} \Phi^i \Phi^j \mathcal{M}(\text{standard model fields}) + \frac{1}{2} V(\sqrt{[\xi - \xi_0(Q^2)]^2 + [\lambda - \lambda_0(Q^2)]^2}) + (\text{Standard Model Terms})$$

Рис. 25.7. Уравнение профессора Брэнда

Для подобных уравнений применяют термин «действие». Есть хорошо известная (физикам) математическая процедура — взять действие и вывести все следующие из него некантовые физические законы. Из уравнения профессора, в сущности, можно вывести абсолютно все некантовые законы. Но чтобы это были верные законы — законы, безошибочно описывающие, как возникают аномалии, как червоточина остается открытой, как изменяется  $G$  и что защищает Вселенную, — уравнение должно иметь надлежащую математическую форму. Профессор не знает, что это за форма. Он пытается угадать. Он делает обоснованные предположения, но это тем не менее лишь предположения.

Его уравнение содержит множество членов (таких, как  $U(Q)$ ,  $H_{ij}(Q)$ ,  $W_{ij}$  и  $M$  (поля стандартной модели)), значение которых неизвестно (рис. 25.7). Эти члены касаются природы силовых линий полей балка, того, как они влияют на нашу брану и как поля нашей браны влияют на них. (Более подробные разъяснения см. в приложении «Некоторые технические примечания» в конце книги.)

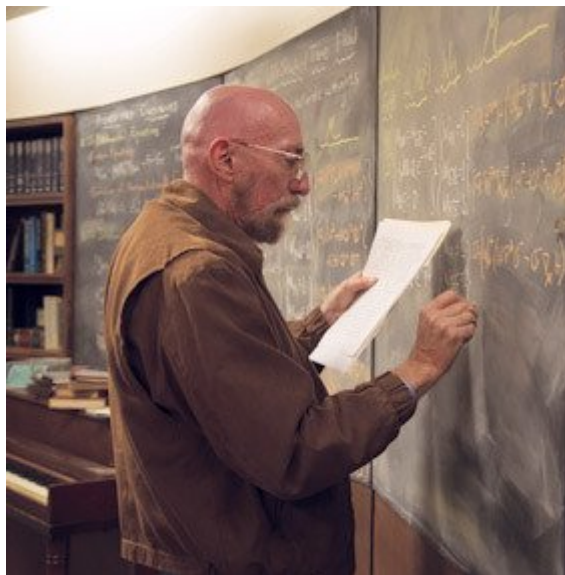


Рис. 25.7. Я записываю варианты значений для членов уравнения на доске профессора

Когда профессор и его сотрудники говорят «решить уравнение», в Кип-версии они имеют в виду две вещи. Во-первых, выяснить значения всех этих  $U(Q)$ ,  $H_{ij}(Q)$ ,  $W_{ij}$  и  $M$ . Во-вторых, вывести из уравнения все необходимые сведения о нашей Вселенной, об аномалиях и, что особенно важно, о том, как управлять аномалиями, чтобы эвакуировать людей с Земли.

Когда персонажи фильма говорят «решить гравитацию», они подразумевают то же самое.

Ближе к концу фильма мы видим, как постаревший профессор и повзрослевшая Мёрф пытаются решить его уравнение перебором вариантов. На досках перед ними — перечень возможных значений для неизвестных величин (я записал там эти значения прямо перед началом съемок, рис. 25.7 и 25.8). Затем, в Кип-версии, Мёрф вводит каждый из вариантов в сложную компьютерную программу, написанную специально ради этого. Программа, пользуясь введенным значением, показывает, какие законы следуют в этом случае из формулы профессора, а также как при этом должны себя вести гравитационные аномалии.

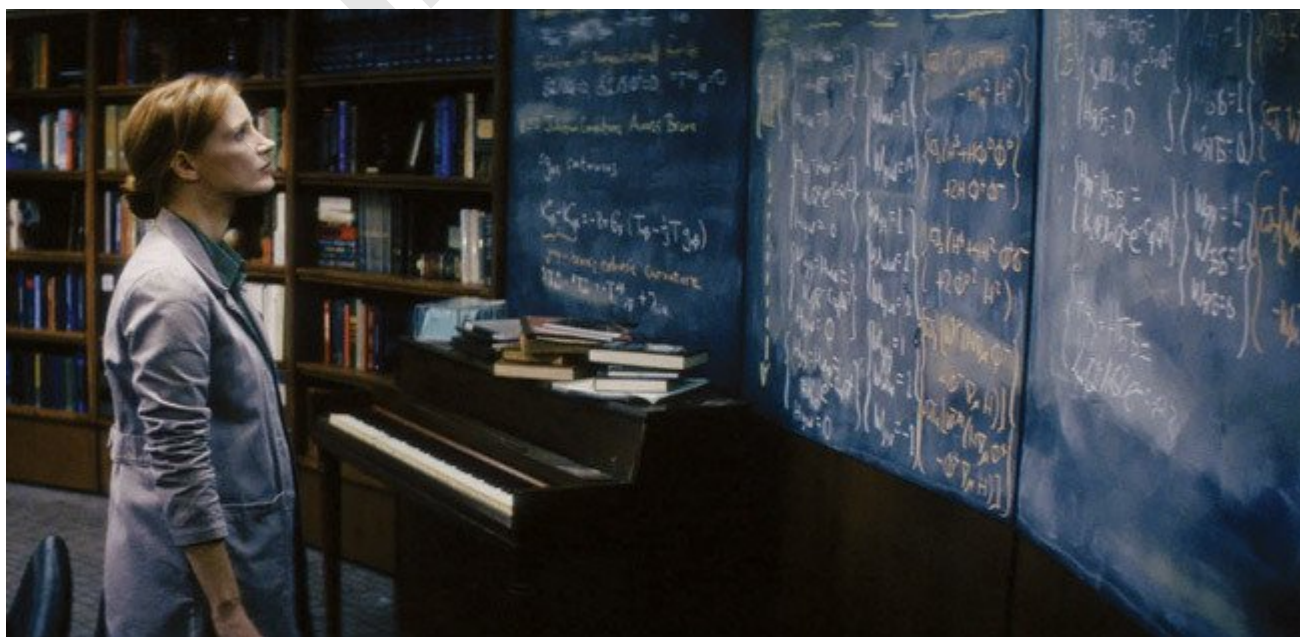


Рис. 25.8. Мёрф изучает перечень вариантов (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

В Кип-версии ни одна из попыток не дает поведения аномалий, хотя бы немного похожего на наблюдаемые. Однако в фильме профессор и Мёрф упорно продолжают действовать методом перебора: берут вариант, смотрят на результат, отмечают вариант, переходят к следующему и т. д., пока не выбьются из сил. И на следующий день — то же самое.

Немного позже в фильме профессор, лежа на смертном одре, признается Мёрф: «Я лгал, Мёрф. Я обманывал тебя». Пронзительная сцена. Мёрф открывается правда: профессор знал, что с его уравнением что-то не в порядке, знал с самого начала. И столь же пронзительная сцена происходит на планете Манн — разговор доктора Манна с дочерью профессора.

Однако на самом деле, понимает Мёрф вскоре после смерти профессора, «его решение было верным. Он давно его нашел. Но это половина ответа». Другую половину можно найти внутри черной дыры. В ее сингулярности.

26

## Сингулярности и квантовая гравитация

В «Интерстеллар» Купер и ТАРС ищут внутри Гаргантюа квантовые данные — данные, которые помогли бы профессору решить его уравнение и эвакуировать человечество с Земли. Они считают, что эти данные должны быть в сингулярности, которая находится внутри Гаргантюа — в «мягкой сингулярности», как выражается Ромилли. Что же такое квантовые данные? Чем они способны помочь профессору? И что такое мягкая сингулярность?

## Приоритет квантовых законов

и

Наша Вселенная в основе своей квантовая. Под этим я имею в виду, что всё в ней флуктуирует, то есть случайным образом колеблется. Хотя бы чуть-чуть, но абсолютно всё!

Когда мы используем высокоточные инструменты для изучения крохотных объектов, мы видим сильные флуктуации. Положение электрона в атоме флуктуирует так быстро и так беспорядочно, что мы не можем знать, где находится электрон в тот или иной момент. И флуктуации электрона ограничиваются лишь размерами атома. Поэтому законы квантовой физики имеют дело не с конкретным положением электрона, а с вероятностями его положения (рис. 26.1).

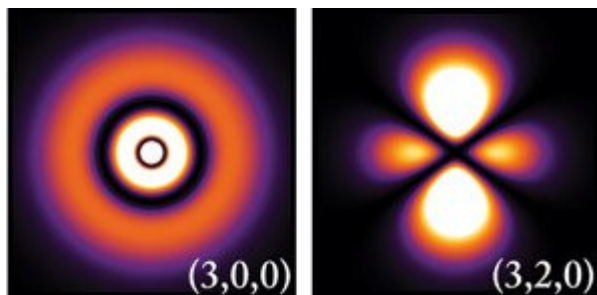


Рис. 26.1. Плотность вероятности местонахождения электрона для двух разных атомов водорода. Вероятность велика для белых областей, меньше для красных и очень мала для черных.  $(3, 0, 0)$  и  $(3, 2, 0)$  — наборы квантовых чисел, характеризующие эти состояния электрона

Наблюдая с помощью высокоточных инструментов за большими объектами, мы тоже видим флуктуации. Но флуктуации больших объектов крайне малы. В детекторах гравитационных волн ЛИГО (см. главу 16) положения 40-килограммовых зеркал<sup>81</sup> определяются с помощью лазерных лучей. Положения зеркал флуктуируют, но величина этих флуктуаций намного — в десять миллиардов раз! — меньше размеров атома (рис. 26.2). Тем не менее лазерные лучи ЛИГО уже в течение нескольких лет отслеживают эти флуктуации. (Конструкция ЛИГО, однако, не позволяет флуктуациям мешать измерению гравитационных волн. Мы с моими учениками успели это доказать.)



Рис. 26.2. 40-килограммовое зеркало, подготовленное для установки в ЛИГО. Его положение квантовомеханически флуктуирует — очень-очень слабо, на одну десятиллиардную от диаметра атома

Поскольку объектам человеческих и больших масштабов присущи лишь крохотные квантовые флуктуации, физики зачастую их не учитывают. Игнорирование флуктуаций сильно облегчает формулы и упрощает расчеты.

Если мы возьмем обычные квантовые законы, не учитывающие гравитацию, а затем отбросим флуктуации, мы получим законы ньютоновской физики — законы, которые в течение нескольких последних столетий использовались для описания планет, звезд, мостов и бильярдных шаров (см. главу 3).

Если же взять законы квантовой гравитации (о которых мы знаем пока немного) и пренебречь флуктуациями, то должны получиться законы теории относительности (которые изучены куда

лучше). Флуктуации, которыми мы пренебрежем, — это, например, пена из крохотных флуктуирующих червоточин («квантовая пена», которой пронизано все пространство; см. рис. 26.3 и главу 14)<sup>82</sup>. Без учета флуктуаций законы теории относительности точно описывают искривление пространства и времени вблизи черной дыры и замедление времени на Земле.

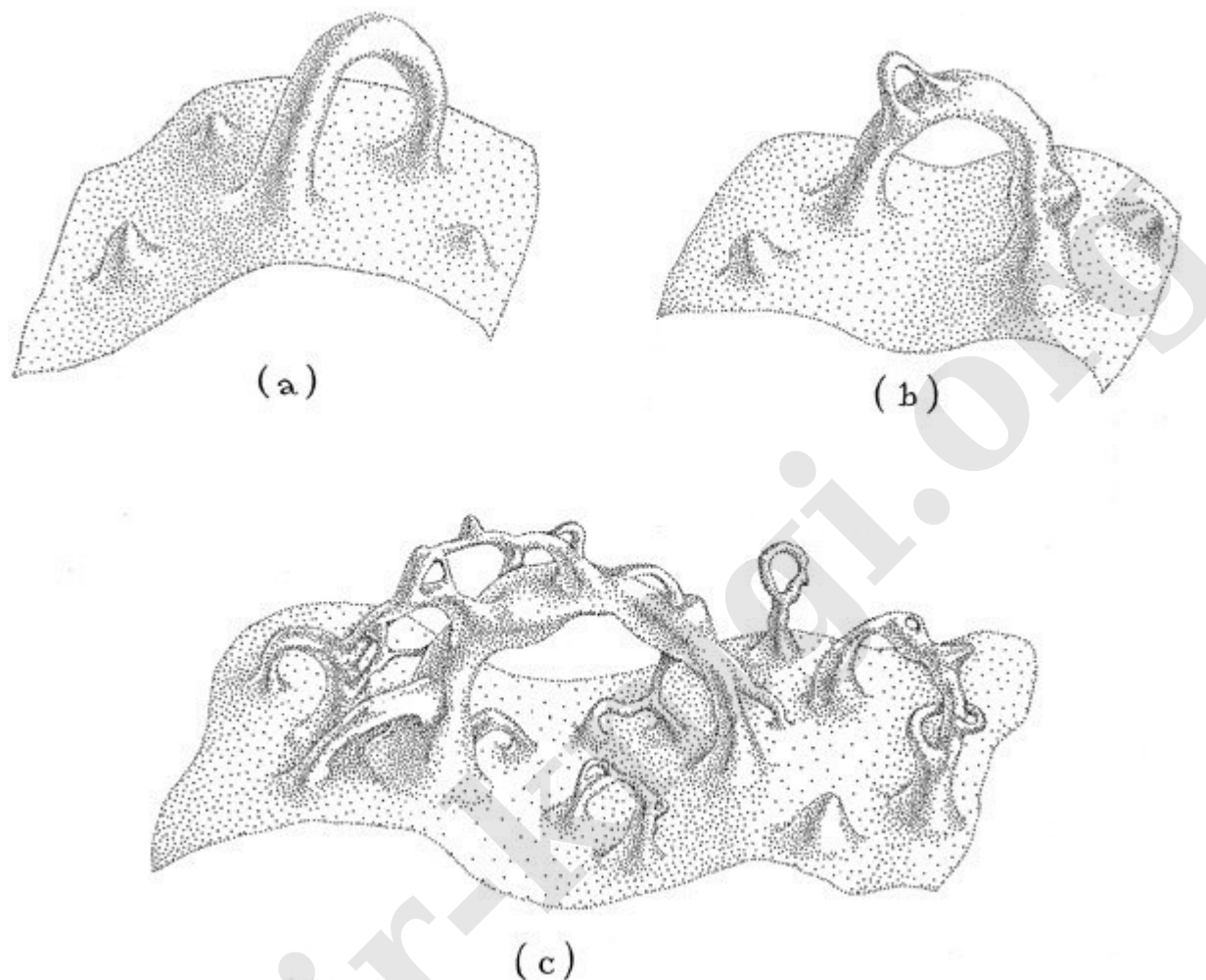


Рис. 26.3. Квантовая пена. Есть некоторая вероятность (скажем, 0,4), что пена будет иметь форму а, другая вероятность (скажем, 0,5) — что b, и еще одна (0,1) — что с (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из [Торн 2009].)

Все это время мы вели к главному: если бы профессору Брэнду удалось открыть законы квантовой гравитации и для балка, и для нашей браны, тогда, исключив из этих законов флуктуации, он мог бы найти точную форму своего уравнения (см. главу 25). И узнал бы причину гравитационных аномалий и как ими можно управлять — то есть как можно их использовать для эвакуации человечества с Земли.

Профессор (в Кип-версии) хорошо это понимает. Кроме того, он знает, откуда можно получить законы квантовой гравитации. Из сингулярностей.

Сингулярности: область квантовой гравитации

Источник сингулярности — это место, где искривление пространства и искривление времени возрастают неограниченно, где они становятся бесконечно большими.

Если мы представим, что искривленное пространство нашей Вселенной подобно волнующейся поверхности океана, тогда источник сингулярности похож на вершушку волны, которая вот-вот обрушится вниз, а недра сингулярности подобны бурлению разбившейся волны (рис. 26.4). Гладкая волна — перед тем, как она разобьется, — подчиняется «гладким» законам физики, таким как законы теории относительности Эйнштейна. Бурун требует иных законов — таких, как законы квантовой физики с их квантовой пеной.



Рис. 26.4. Сингулярность как вершушка океанской волны, которая вот-вот обрушится

Сингулярности лежат в сердцевинах черных дыр. Законы теории относительности однозначно говорят нам об этом, хоть они и не могут объяснить, что происходит внутри сингулярностей. Для этого предназначены законы квантовой гравитации.

В 1962 году я перешел из Калтеха (где окончил бакалавриат) в Принстонский университет, чтобы учиться на доктора физических наук. Я выбрал именно Принстон, потому что там преподавал Джон Уилер. Ведь Уилер тогда был флагманом в теории относительности.



Одним сентябрьским днем я с трепетом постучал в дверь кабинета профессора Уилера. Это была моя первая встреча с этим великим человеком. Широко улыбаясь, он приветствовал меня, провел внутрь и сразу же — как будто я был его достославным коллегой, а не полнейшим новичком — начал разговор о тайнах звездных коллапсов. Коллапсов, в результате которых образуются черные дыры с сингулярностями в их сердцевине. В этих сингулярностях, утверждал он, «вершится пылкий брак законов теории относительности с законами квантовой физики». Плоды этого брака, говорил Уилер, законы квантовой гравитации, в сингулярностях расцветают полным цветом. Если бы мы могли разобраться в сингулярностях, мы бы узнали законы квантовой гравитации. Сингулярности — это розеттский камень<sup>83</sup> для расшифровки квантовой гравитации.

После этой персональной лекции я стал новообращенным. И множество других физиков после открытых лекций и статей Уилера встали на путь познания сингулярностей и законов квантовой гравитации. И этот путь до сих пор не пройден. Пока он привел нас к теории суперструн, которая, в свою очередь, привела к утверждению, что наша Вселенная — это брана, находящаяся в многомерном балке (см. главу 21).

Голые сингулярности?



Было бы чудесно, если бы мы могли найти или создать сингулярность вне черной дыры — сингулярность, которая не скрывалась бы за горизонтом событий. Голую сингулярность. Тогда задача профессора Брэнда была бы куда проще. Он мог бы извлечь необходимые квантовые данные из этой голой сингулярности прямо у себя в лаборатории.

В 1991 году мы с Джоном Прескиллом поспорили с нашим другом Стивеном Хокингом о голых сингулярностях. Прескилл — профессор в Калтехе, один из лучших в мире специалистов в области квантовой информации. Стивен — тот самый «парень на кресле-каталке», который успел мелькнуть в «Звездном пути», «Симпсонах» и «Теории Большого взрыва». А еще он один из величайших гениев нашего времени. Мы заключили пари: Джон и я считали, что законы физики допускают существование голых сингулярностей. Стивен утверждал, что нет (рис. 26.6).

*Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,*

*And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,*

*Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.*

*The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.*

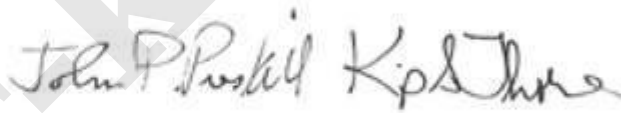
  
  
Stephen W. Hawking    John P. Preskill & Kip S. Thorne  
Pasadena, California, 24 September 1991  
  
*Conceded on a technicality*  
*5 Feb. 1997:*                      *Stephen W. Hawking*

Рис. 26.6. Наше пари насчет голой сингулярности

Текст на рисунке 26.6

Поскольку Стивен Хокинг твердо верит, что голые сингулярности — ересь и что они должны быть запрещены законами классической физики, и поскольку Джон Прескилл и Кип Торн считают голые сингулярности квантовыми гравитационными объектами, которые могут существовать, неприкрытые горизонтами, открытые взорам всей Вселенной, Хокинг предлагает, а Прескилл и Торн принимают пари со ставкой 100 фунтов стерлингов против 50 фунтов стерлингов на то, что если к любому типу классического вещества или поля, неспособному быть сингулярным в плоском пространстве — времени, применить общую

теорию относительности посредством классических уравнений Эйнштейна, результатом никогда не будет голая сингулярность.

Проигравший вознаграждает победившего одеждой, дабы прикрыть его наготу. Одежда должна быть украшена соответствующей надписью, выражающей признание правоты победителя.

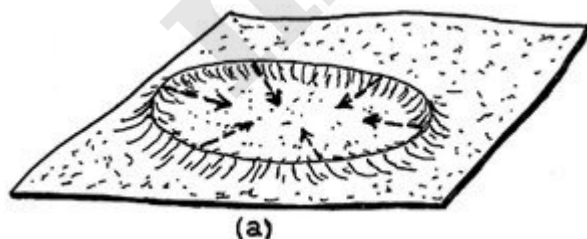
Стивен У. Хокинг

Джон П. Прескилл и Кип С. Торн

Пасадена, Калифорния, 24 сентября 1991 года

*Преписка от руки:* Признаю техническое поражение. 5 февраля 1997 г. Стивен У. Хокинг

Никто из нас не думал, что спор разрешится так быстро. Всего через пять лет Мэттью Чоптюк, докторант Техасского университета, прогнал на суперкомпьютере моделирование, которое, как он надеялся, выявит новые, неожиданные свойства законов физики, — и попал в яблочко. Он моделировал схлопывание гравитационной волны<sup>84</sup>. Если волна была слаба, то она схлопывалась и затем рассеивалась. Если сильна, то схлопывалась и образовывала черную дыру. Но когда сила волны была очень тонко «настроена» на промежуточное значение, волна вызывала нечто вроде кипения пространства и времени. Это кипение порождало исходящие гравитационные волны все меньшей и меньшей длины. И в конце концов там образовывалась бесконечно малая голая сингулярность (рис. 26.7).



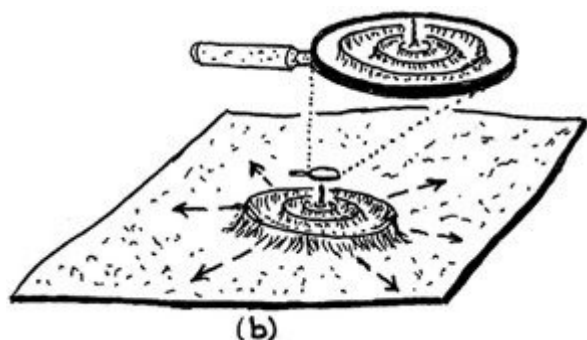


Рис. 26.7. Сверху: Мэттью Чоптюк. В центре (а): схлопывающаяся гравитационная волна. Снизу (b): кипение, вызванное волной, и голая сингулярность в центре увеличительного стекла

Впрочем, такая сингулярность не может возникнуть сама собой — необходимые для этого условия несвойственны естественным процессам. Однако сверхразвитая цивилизация могла бы, тонко отрегулировав схлопывание волны, создать такую сингулярность искусственно, а затем «выпытать» у нее законы квантовой гравитации.

Ознакомившись с моделированием Чоптюка, Стивен признал, как он выразился, «техническое поражение» (см. рис. 26.6). Он счел тонкую настройку волны жульничеством. Стивен хотел знать, могут ли голые сингулярности возникать естественным путем, так что мы возобновили наше пари в новой формулировке: сингулярность должна появляться без необходимости тонкой настройки. Тем не менее публичное заявление Стивена (рис. 26.8) было большим событием, и о нем даже написали на первой странице «Нью-Йорк Таймс».



Рис. 26.8. Хокинг официально признает победу Прескилла и Торна во время своей лекции в Калтехе, 1997

Несмотря на все пари, я сомневаюсь, что во Вселенной существуют голые сингулярности. В «Интерстеллар» доктор Манн твердо уверен, что «законы природы не допустят голой сингулярности», да и профессор Брэнд ни разу о такой возможности не упоминает. Вместо этого профессор обращает все свое внимание на сингулярности внутри черных дыр. В них,

считает профессор, единственная надежда на познание законов квантовой гравитации.

#### БХЛ-сингулярность



Во времена Уилера (1960-е) мы думали, что сингулярность черной дыры похожа на сужение пространства в точку, где материя сгущается, пока не становится бесконечно плотной и не исчезает. И я, вплоть до этого момента, изображал в книге сингулярность черной дыры именно так (см., например, рис. 26.9).



Рис. 26.9. Фантастическое изображение нескольких черных дыр с сингулярностями на их сужающихся концах (Фрагмент рисунка 4.5.)

С тех пор математические вычисления по законам теории относительности показали, что такие сужающиеся сингулярности нестабильны. Чтобы создать такую сингулярность внутри черной дыры, потребуется тонкая настройка. И если что-нибудь сингулярность хотя бы слегка потревожит, например если что-то упадет в черную дыру, она разительно изменится. Чем же она станет?

В 1971 году три российских физика — Владимир Белинский, Исаак Халатников и Евгений

Лифшиц — предложили ответ на этот вопрос в виде пространных и сложных вычислений. А в 2000-х годах благодаря развитию компьютерного моделирования их ответ подтвердил Дэвид Гарфинкль из Оклендского университета. Эти стабильные сингулярности теперь называют БХЛ — в честь Белинского — Халатникова — Лифшица.

БХЛ-сингулярности хаотичны. Исключительно хаотичны. И опасны. Дьявольски опасны.

На рис. 26.10 я изобразил искривление пространства снаружи и внутри быстровращающейся черной дыры. Внизу находится БХЛ-сингулярность. Если вы упадете в черную дыру, сначала у нее внутри все будет спокойно, быть может, даже приятно. Но по мере приближения к сингулярности пространство вокруг вас начнет хаотически растягиваться и сжиматься. И приливные силы начнут — хаотически же — растягивать и сжимать вас. Сначала растяжения и сжатия будут небольшими, но вскоре они усилятся и, наконец, станут сверхсильными. Вашу плоть растерзает в клочья. А затем и атомы, из которых состояло ваше тело, изуродует так, что родная мать не узнает.

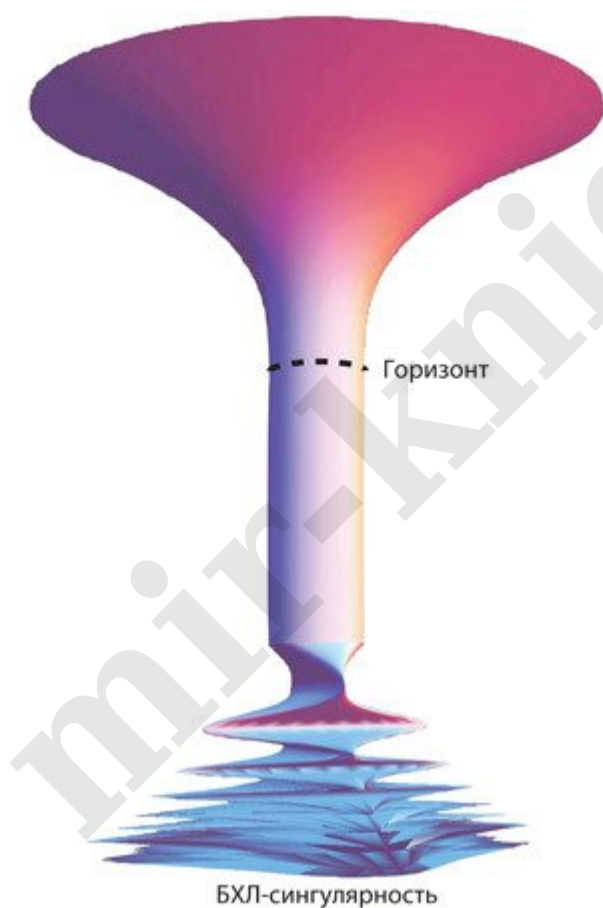


Рис. 26.10. Искривленное пространство вокруг быстровращающейся черной дыры наподобие Гаргантюа с БХЛ-сингулярностью внизу. Хаотические растяжения и сжатия вблизи сингулярности изображены не точно, а умозрительно

Все это, включая хаотичность, следует из законов теории относительности. Именно это предсказали российские физики Б., Х. и Л. Чего они не могли предсказать и чего не может предсказать никто по сей день, так это какая судьба ожидает ваши угодившие в БХЛ-сингулярность атомы и субатомные частицы, когда миллион хаотических терзаний перейдут в бесконечное крещендо. Судьба ваших атомарных останков ведома лишь законам квантовой гравитации. Так или иначе, вы сами будете давно уже мертвы, без шансов добыть какие-либо

квантовые данные и спастись.

Я пометил этот раздел значком



(обоснованное предположение), поскольку у нас нет полной уверенности, какие именно сингулярности скрываются внутри черных дыр — БХЛ или нет. Законы теории относительности допускают существование БХЛ-сингулярностей, Гарфинкль подтвердил это с помощью компьютерного моделирования. Но чтобы подтвердить, что характерные для БХЛ-сингулярностей чудовищные растяжения и сжатия действительно происходят в черных дырах, необходимо более сложное моделирование. Я почти уверен, что в результате такого моделирования станет ясно: да, так все и есть. Но не могу утверждать это наверняка.

Падающие и вылетающие сингулярности



В восьмидесятых годах мы с моими коллегами-физиками были вполне уверены (в рамках обоснованного предположения), что в черной дыре находится всего одна сингулярность и что это БХЛ-сингулярность. Мы ошибались.

В 1991 году Эрик Пуассон и Вернер Израэль из Альбертского университета в Канаде, работая с математическим аппаратом теории относительности, обнаружили вторую сингулярность — сингулярность, растущую по мере того, как стареет черная дыра, и порожденную экстремальным замедлением времени внутри дыры.

Если вы упадете во вращающуюся черную дыру наподобие Гаргантюа, вслед за вами неизбежно упадет еще много чего: газ, пыль, свет, гравитационные волны и т. д. Для меня, стороннего наблюдателя, все это будет опускаться в дыру в течение миллионов или миллиардов лет. Но на ваш взгляд, взгляд изнутри дыры, это займет несколько секунд, а то и меньше — из-за экстремального (по сравнению с моим) замедления вашего времени. Относительно вас то, что попадет в дыру за вами следом, образует тонкий слой и будет падать внутрь, прямо к вам, со световой или околосветовой скоростью. Этот слой будет порождать внушительные приливные силы, искажающие пространство, и если он столкнется с вами, вам тоже достанется.

Эти приливные силы будут расти до бесконечности, порождая «падающую сингулярность» (рис. 26.11)<sup>85</sup>, подчиняющуюся законам квантовой гравитации. Однако, как выяснили Пуассон и Израэль, приливные силы растут так стремительно, что если вы с ними встретитесь, они деформируют вас лишь в некоторой конечной степени — а затем вы достигнете сингулярности. Это объясняет график на рис. 26.12, где показано ваше общее растяжение вдоль направления верх — низ и сжатие в направлениях север — юг и восток — запад в зависимости от времени. Когда вы встретитесь с сингулярностью, ваши общие растяжение и сжатие будут конечны, но скорости, с которыми вас растягивает и сжимает (крутизна трех кривых), будут бесконечны. Это действие бесконечных приливных сил, признака сингулярности.

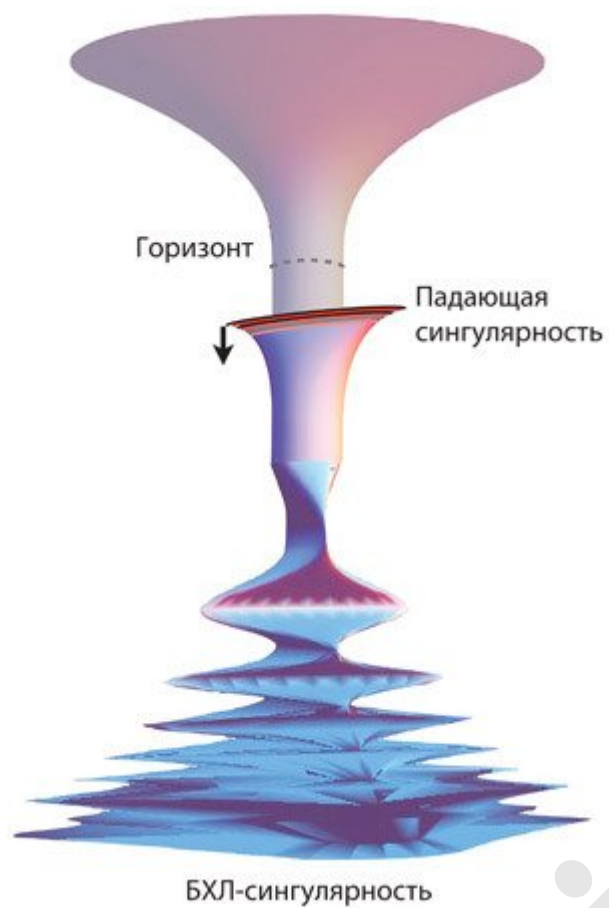


Рис. 26.11. Падающая сингулярность, порожденная всем тем, что падает в черную дыру (разноцветные ободки) вслед за вами

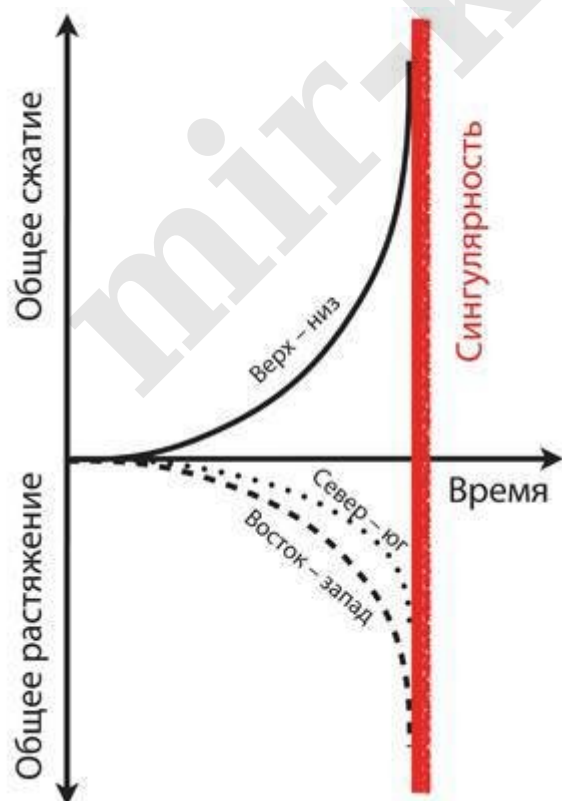


Рис. 26.12. Ваши общие растяжение и сжатие, когда на вас опускается падающая

## сингулярность

Поскольку ваше тело подверглось лишь конечным общим растяжению и сжатию, возможно, что, войдя в сингулярность, вы останетесь живы (возможно, но, на мой взгляд, маловероятно). В этом смысле падающая сингулярность гораздо «мягче» БХЛ-сингулярности. Но если вы и уцелеете, снова только законам квантовой гравитации ведомо, что случится с вами дальше.

В 1990-х и 2000-х годах мы, физики, думали, что это всё — БХЛ-сингулярность, возникшая при рождении черной дыры, и падающая сингулярность, которая вырастает позже. И больше ничего.

Но затем в конце 2012 года, когда Кристофер Нолан вел переговоры насчет работы над «Интерстеллар», Дональд Марольф (Калифорнийский университет в Санта-Барбаре) и Амос Ори (Технион в Хайфе, Израиль) открыли третью сингулярность. Разумеется, открыли они ее в результате углубленного изучения законов теории относительности, а не увидев в телескоп. Странно даже, что эту сингулярность не открыли раньше — настолько все очевидно. Это «вылетающая сингулярность», которая, как и падающая, растет по мере старения черной дыры. Источник ее возникновения — то, что упало в черную дыру прежде вас (газ, пыль, свет, гравитационные волны и прочее); см. рис. 26.13. Малая часть всего этого будет рассеиваться вверх, по направлению к вам, рассеиваться из-за искривления пространства и времени — примерно так же, как солнечный свет рассеивается, когда проходит сквозь изогнутую, гладкую океанскую волну, формируя для наших глаз ее изображение.



Рис. 26.13. Вылетающая сингулярность, порожденная рассеянием того, что упало в черную дыру до вас, и падающая сингулярность, порожденная тем, что упало в дыру вслед за вами. Вы находитесь между этими сингулярностями. К наружным областям черной дыры и к ее БХЛ-

сингулярности у вас доступа нет

Из-за экстремального замедления времени в черной дыре рассеянные газ, пыль и т. д. уплотняются, формируя тонкий слой, который напоминает ударную волну. Гравитация этого слоя порождает приливные силы, которые бесконечно возрастают, образуя вылетающую сингулярность. Но приливные силы этой сингулярности, так же как и падающей, «мягкие»: они нарастают так быстро и внезапно, что, достигнув сингулярности, вы испытаете конечную, а не бесконечную общую деформацию.

В «Интерстеллар» Ромилли рассказывает Куперу о мягких сингулярностях: «Есть предложение насчет твоего обратного пути [с планеты Манн. — К. Т.]. Заглянем напоследок в черную дыру. Гаргантюа — старая вращающаяся черная дыра. То, что мы зовем мягкой сингулярностью [точнее, то, что ее содержит. — К. Т.]. «Мягкой?» — спрашивает Купер. «Ну, не очень. Но ее приливная гравитация настолько шустрая, что объект, быстро преодолевший горизонт, может уцелеть». Позже Купер, вдохновившись этим разговором и заинтересовавшись поисками квантовых данных, бросается в Гаргантюа (см. главу 28). Это смелый поступок. Купер не может знать заранее, уцелеет ли он. Известно это лишь законам квантовой гравитации. Или сущностям из балка...

Итак, мы заложили «экстремальнофизический» фундамент для кульминационных сцен «Интерстеллар». Что же, давайте перейдем к кульминации.

## VII

### КУЛЬМИНАЦИЯ

27

Кромка кратера



Ближе к концу фильма Купер выводит «Эндюранс» из смертельного штопора возле планеты Манн, и не успевает он порадоваться, как робот КЕЙС сообщает: «Нас затягивает к Гаргантюа».

Купер мгновенно принимает решение: «Модуль навигации полностью уничтожен, и наших ресурсов не хватит, чтобы вернуться на Землю. Но, может быть, мы дотянем до планеты Эдмундс». «А топливо?» — спрашивает Амелия Брэнд. «Не хватит, — отвечает Купер. — Но у меня есть план. Мы позволим Гаргантюа затянуть нас к горизонту, используем топливо для пращи и махнем к планете Эдмундс». — «Вручную?» — «А я здесь для чего? Доставлю нас напрямую на критическую орбиту».

За несколько минут они добираются до критической орбиты, и начинается самое интересное. В этой главе я поделюсь Кип-версией этих событий.

Приливная гравитация: «Эндюранс» улетает от планеты Манн

В Кип-версии орбита планеты Манн сильно вытянута (см. главу 19). Когда «Эндюранс» прибывает к планете, она находится далеко от Гаргантюа, но движется в ее направлении. Взрыв «Эндюранс» (см. главу 20) происходит, когда планета приближается к черной дыре (рис. 27.1).

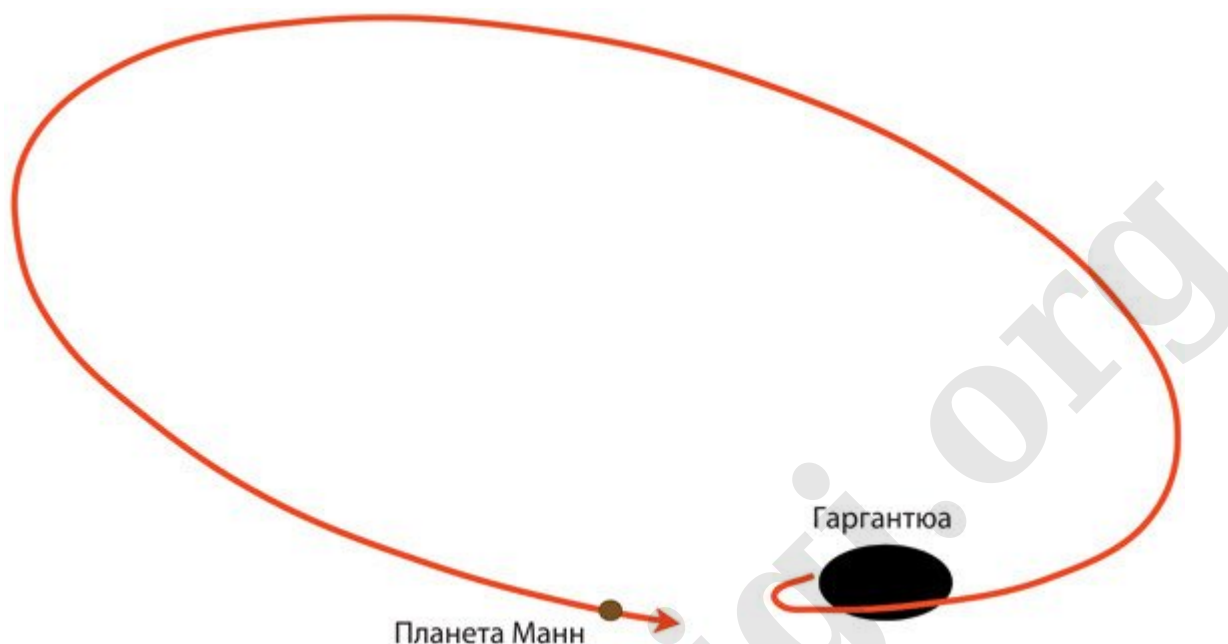


Рис. 27.1. Орбита планеты Манн и положение планеты на момент взрыва «Эндюранс»

Купер спасает «Эндюранс» после взрыва и уводит его прочь от планеты. В Кип-версии «Эндюранс» удаляется от планеты на достаточное расстояние, чтобы приливные силы Гаргантюа оттянули его прочь, послав на отдельную траекторию (рис. 27.2).

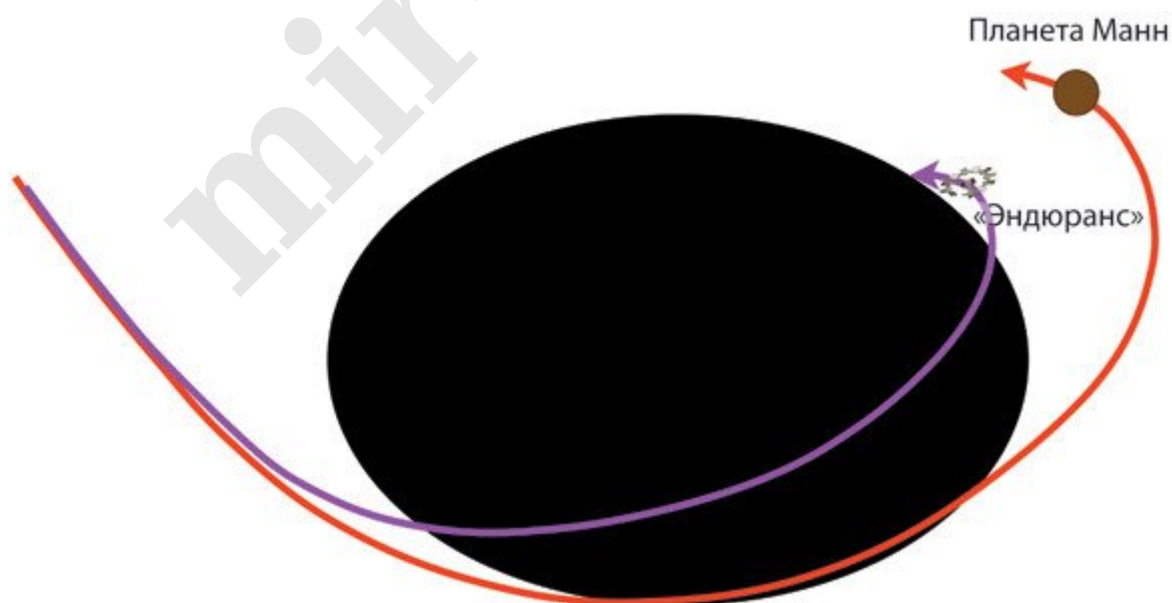


Рис. 27.2. Приливные силы Гаргантюа оттягивают «Эндюранс» от планеты Манн (Изображение «Эндюранс» взято из фильма.)

Центробежные силы отбрасывают планету Манн прочь от черной дыры, к новому витку по

удаленной части орбиты, тогда как «Эндюранс» устремляется к критической орбите вокруг Гаргантюа<sup>86</sup>.

### Критическая орбита и аналогия с вулканом

Я расскажу о критической орбите, пользуясь иллюстрацией иного типа, чем те, что встречались в книге раньше: рис. 27.3. Сначала я опишу саму иллюстрацию, а затем — ее суть с точки зрения физики.



Рис. 27.3. Траектория «Эндюранс» на скульптуре в виде вулкана и его окрестностей; поверхность скульптуры наглядно изображает гравитационную и центробежную энергии

Представьте, что поверхность на рис. 27.3 — это гладкая гранитная скульптура, стоящая у вас дома на полу. Ее внешние края понижаются внутрь, плавно переходя в глубокий ров, окружающий вулкан.

«Эндюранс», после того как гравитация Гаргантюа оттянула его от планеты Манн, подобен крохотному мраморному шарик, который свободно катится по гранитной поверхности. По мере того как шарик катится внутрь, приближаясь ко рву, его скорость из-за наклона поверхности возрастает. Затем шарик, постепенно замедляясь, поднимается по склону вулкана и оказывается на краю кратера с некоторым остаточным вращением. Затем он катится по кромке кратера — круг за кругом и, удерживая хрупкое равновесие, не падает ни в вулкан, ни вниз по его склону, обратно в ров.

Недра вулкана — это Гаргантюа, а кромка кратера — критическая орбита, с которой «Эндюранс» стартует к планете Эдмундс.

### Аналогия с вулканом: гравитационная и центробежная энергии

Чтобы объяснить, как этот вулкан связан с законами физики, придется слегка углубиться в технические детали.

Для простоты будем считать, что «Эндюранс» движется в экваториальной плоскости Гаргантюа. (В случае неэкваториальной траектории суть будет та же, но из-за несферической формы черной дыры возникнут излишние сложности.) Аналогия с вулканом изящно иллюстрирует физику критической орбиты и траектории «Эндюранс». Чтобы пояснить это, придется ввести два понятия — угловой момент «Эндюранс» и его энергия.

После того как приливные силы оттянули «Эндюранс» от планеты Манн, «Эндюранс» обладает некоторым угловым моментом (его круговая скорость вокруг Гаргантюа, помноженная на расстояние до Гаргантюа). Законы теории относительности утверждают, что этот угловой момент останется неизменным вдоль всей траектории «Эндюранс» (см. главу 10). Это означает, что по мере затягивания (приближения) «Эндюранс» к Гаргантюа его круговая скорость растет. Похожим образом фигуристка начинает вращаться быстрее, если прижимает руки ближе к себе.

«Эндюранс» направляется к Гаргантюа с определенным количеством энергии, которая, как и угловой момент, остается постоянной вдоль всей траектории. Эта энергия складывается из трех составляющих: гравитационная энергия «Эндюранс», которая имеет отрицательное значение и по мере затягивания корабля к Гаргантюа становится еще меньше; его центробежная энергия (энергия кругового движения вокруг Гаргантюа), которая с приближением к черной дыре растет, потому что увеличивается окружная скорость; и его радиальная кинетическая энергия (энергия движения в направлении к Гаргантюа).

Сложная поверхность на рис. 27.3 представляет собой своеобразный график суммы гравитационной и центробежной энергий «Эндюранс» (вертикальная координата) в зависимости от его местонахождения в экваториальной плоскости Гаргантюа (горизонтальная координата). Там, где поверхность уходит вниз, сумма гравитационной и центробежной энергий «Эндюранс» уменьшается, а значит, его радиальная кинетическая энергия возрастает (поскольку совокупная энергия неизменна) — то есть радиальное движение должно ускоряться. В точности это и происходит в нашей «вулканической» аналогии.

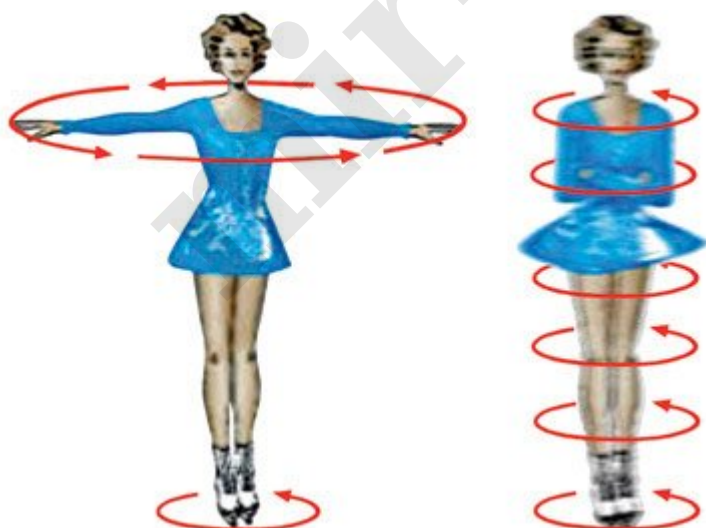


Рис. 27.4. Фигуристка

Снаружи от подножия вулкана на рис. 27.3 высота поверхности определяется отрицательной гравитационной энергией «Эндюранс» (см. подпись «гравитационная энергия» на рисунке). В сравнении с ней положительной центробежной энергией здесь можно пренебречь. На склоне вулкана высота поверхности, напротив, определяется возрастающей центробежной энергией,

которая преобладает над энергией гравитационной. Внутри кратера, у горизонта событий Гаргантюа, отрицательная гравитационная энергия становится столь сильной, что перевешивает центробежную энергию, и поверхность устремляется вниз, образуя жерло вулкана (рис. 27.5). Критическая же орбита соответствует кромке кратера.

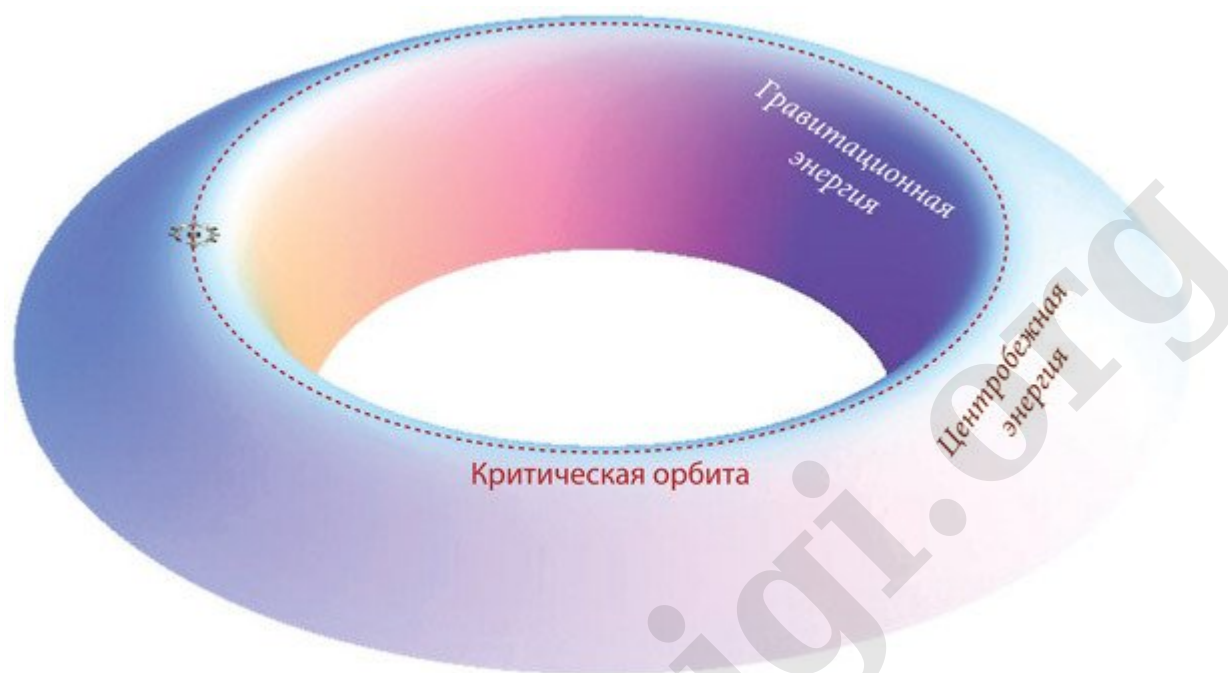


Рис. 27.5. Критическая орбита «Эндюранс» на кромке кратера. Центробежная энергия и центробежная сила преобладают снаружи от кратера, а отрицательная гравитационная энергия и сила гравитации — внутри него

Критическая орбита: равновесие центробежных и гравитационных сил

Прибыв на кромку кратера, «Эндюранс» в идеале должен вращаться по ней круг за кругом, с постоянной скоростью. Чтобы он не смещался ни внутрь, ни наружу, гравитационное притяжение черной дыры на кромке должно быть в точности уравновешено центробежной силой, порожденной быстрым круговым движением корабля.

Так оно и есть, что отражено на рис. 27.6 (подобный график, описывающий баланс сил для планеты Миллер, мы уже видели на рис. 17.2). На критической орбите «Эндюранс» красная кривая (гравитационное притяжение, действующее на «Эндюранс») и синяя кривая (центробежная сила) пересекаются, то есть две эти силы уравновешены.



Рис. 27.6. Гравитационная и центробежная силы, действующие на «Эндюранс», и их изменение в зависимости от расстояния до Гаргантюа

Однако, как подсказывает наша аналогия с вулканом, это равновесие нестабильно<sup>87</sup>. Если «Эндюранс» случайно чуть-чуть сдвинется внутрь, гравитация возобладает над центробежной силой (красная кривая там выше синей) и «Эндюранс» затянет внутрь, к горизонту Гаргантюа. Если «Эндюранс» хоть немного сместится наружу, центробежная сила одержит победу над гравитацией (синяя кривая там выше красной) и «Эндюранс» отбросит от Гаргантюа.

В противоположность этому (как мы знаем из главы 17) на орбите планеты Миллер равновесие между гравитационной и центробежной силами стабильно.

#### ТАРС и Купер «падают с кромки кратера»

В Кип-версии «кромка кратера» очень узка, так что критическая орбита на этой кромке чрезвычайно нестабильна. Крохотные огрехи управления могут отправить «Эндюранс» напрямик в Гаргантюа (в жерло вулкана) либо прочь от Гаргантюа (вниз по склону ко рву).

Ошибки управления неизбежны, поэтому курс «Эндюранс» необходимо постоянно корректировать с помощью грамотно сконструированной системы с обратной связью наподобие автомобильного круиз-контроля, но гораздо более совершенной.

Согласно Кип-версии, эта система недостаточно хороша, и «Эндюранс» заходит опасно далеко по «внутреннему краю кратера». «Эндюранс» должен использовать всю доступную тягу, чтобы выбраться назад, на критическую орбиту.

Но это слишком тонкий технический момент для динамичной сцены блокбастера, поэтому Кристофер Нолан упростил суть эпизода для зрителя. Никаких упоминаний о нестабильности и обратной связи в фильме нет. «Эндюранс» лишь подходит к Гаргантюа слишком близко, и Купер использует все доступные средства, чтобы выбраться назад и увести «Эндюранс» от черной дыры.

Однако результат — тот же самый: пристыкованные к «Эндюранс» посадочный модуль 1, которым управляет ТАРС, и «Рейнджер-2», который пилотирует Купер, начинают, включив двигатели, выводить корабль из плена Гаргантюа. Затем ТАРС и Купер используют последнюю возможность подтолкнуть «Эндюранс»: взрыв пироболтов отделяет от «Эндюранс» посадочный модуль 1 и «Рейнджер-2», и они устремляются вниз, в черную дыру, унося с собой ТАРСа и Купера. «Эндюранс» спасен (рис. 27.7 и 27.8).

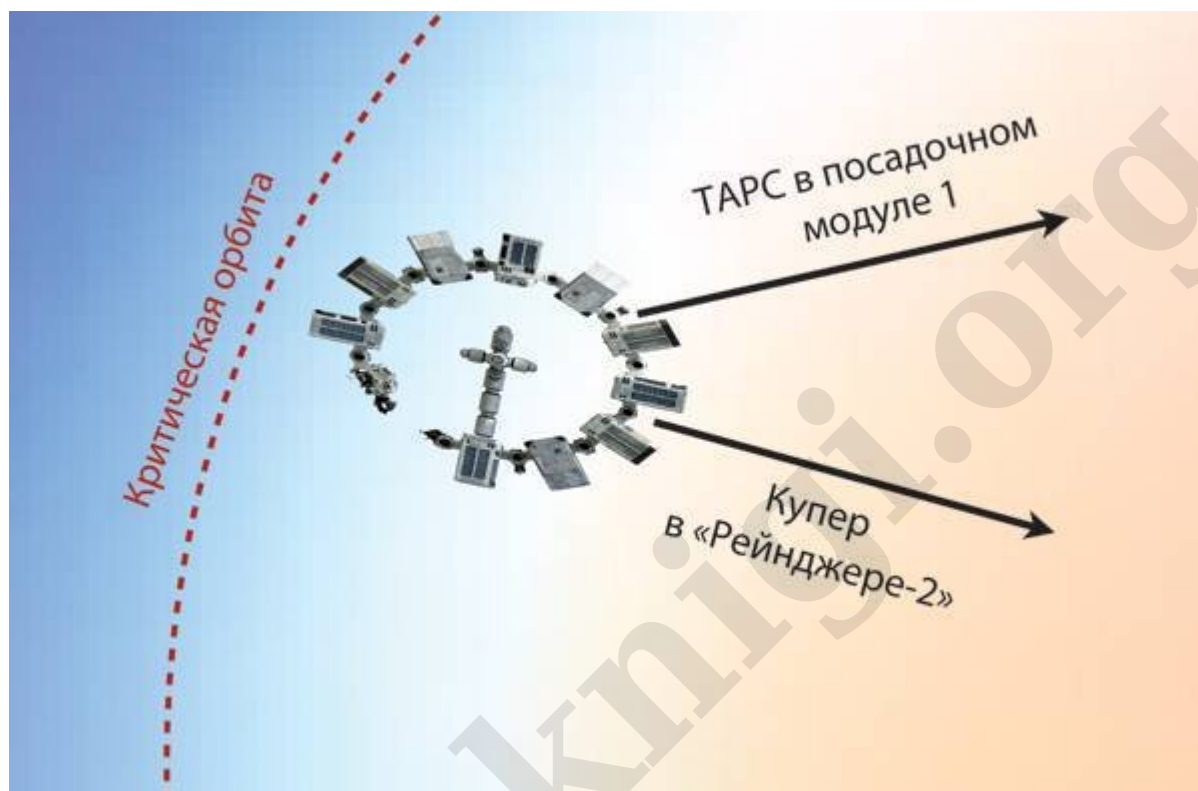


Рис. 27.7. «Эндюранс» возвращается на критическую орбиту с помощью запуска двигателей и последующего отделения посадочного модуля 1 и «Рейнджера-2» (Изображение «Эндюранс» взято из фильма.)



Рис. 27.8. Полет «Рейнджера-2» к Гаргантюа, как это видит из «Эндюранс» Амелия Брэнд. На переднем плане — два модуля «Эндюранс». «Рейнджер-2» смутно виден в нижней половине рисунка (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

В этот момент в фильме происходит трагичная сцена — прощальный диалог Брэнд и Купера. Амелия не понимает, почему Купер и ТАРС должны отправиться в черную дыру вместе с посадочным модулем и «Рейнджером». Купер дает довольно сомнительное, но поэтичное объяснение: «Третий закон Ньютона. Единственный известный людям способ куда-то попасть — это оставить что-то позади».

Безусловно, это так. Но за счет того, что посадочный модуль и «Рейнджер» летят в черную дыру вместе с ТАРСом и Купером, а не без них, сила толчка, переданного кораблю «Эндюранс», возрастает крайне мало. Более правдоподобная причина в том, что Купер хочет отправиться в Гаргантюа. Он надеется, что они с ТАРСом смогут узнать законы квантовой гравитации, получив их из скрытой в Гаргантюа сингулярности, и найдут способ передать эту информацию на Землю. Это его последняя надежда спасти человечество.

#### Запуск «Эндюранс» к планете Эдмундс

Критическая орбита — наилучшее положение, чтобы отправить «Эндюранс» в любом необходимом направлении, в данном случае — к планете Эдмундс. Как Амелия и КЕЙС могут повлиять на направление запуска? Поскольку критическая орбита крайне нестабильна, достаточно на мгновение включить двигатели, чтобы увести с нее «Эндюранс». И если двигатели включатся строго в нужной точке критической орбиты со строго выверенной мощностью, «Эндюранс» отправится строго в выбранном направлении (рис. 27.9).

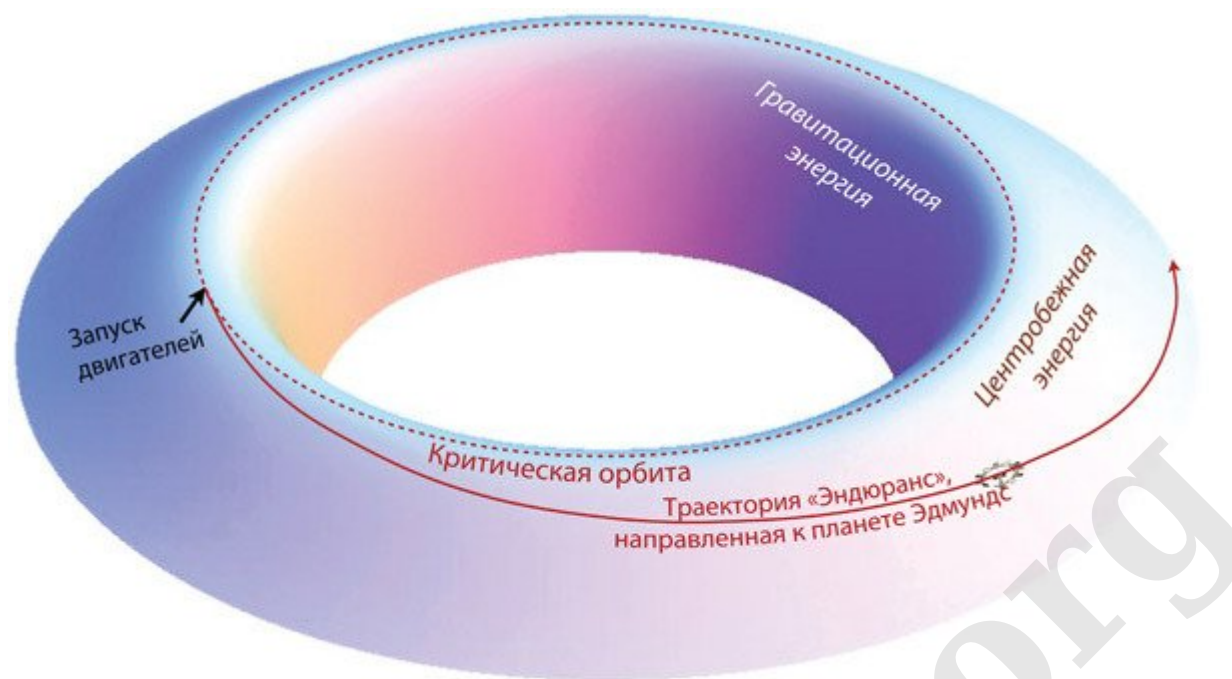


Рис. 27.9. Траектория «Эндюранс», уходящего с критической орбиты по направлению к планете Эдмундс (Изображение «Эндюранс» взято из фильма.)

Глядя на рис. 27.9, вы можете усомниться, что Брэнд и КЕЙС могут стартовать в каком им угодно направлении. Дело в том, что на рисунке не учитывается трехмерность критической орбиты — см. рис. 27.10.

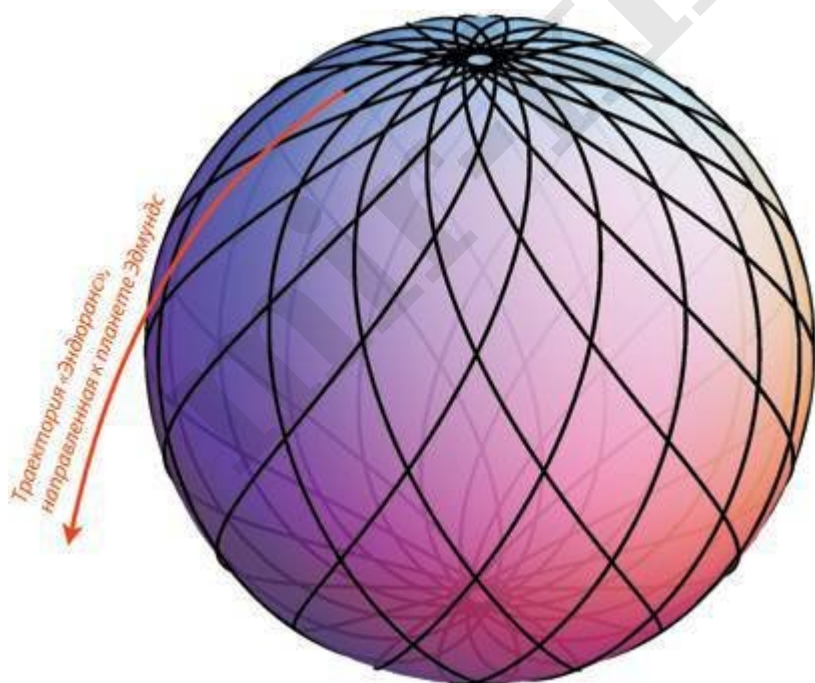


Рис. 27.10. Критическая орбита «Эндюранс» и запуск к планете Эдмундс в трех измерениях. Критическая орбита охватывает сферу, окружающую Гаргантюа

Эта закрученная критическая орбита — близкий аналог траекторий лучей света, задержавшихся в огненной оболочке Гаргантюа (рис. 6.5 и 8.2). Так же как эти лучи, «Эндюранс» временно заключен на своей критической орбите. Но, в отличие от них, у

«Эндюранс» есть система управления и двигателя, поэтому его старт с критической орбиты зависит от действий Амелии Брэнд и КЕЙСа. А благодаря тому, что критическая орбита охватывает сферу, будто нитка клубок, Амелия и КЕЙС могут стартовать в каком им угодно направлении.

Однако, стартуя, они оставляют позади Купера и ТАРСа, которые падают к горизонту Гаргантюа. К сингулярностям Гаргантюа.

## 28

### Внутри Гаргантюа

#### Немного о смене убеждений

И

В 1985 году, когда Карл Саган решил отправить свою героиню Элинор Эрроуэй (актриса Джоди Фостер) к звезде Вега через черную дыру, я сказал ему: нет! Она погибнет внутри черной дыры, безжалостная сингулярность растерзает ее хаотическим образом. Взамен я предложил Карлу отправить доктора Эрроуэй к Веге через червоточину (см. главу 14). А вот в 2013 году я поддержал Кристофера Нолана в его желании послать Купера в черную дыру Гаргантюа.

Что же произошло за четверть столетия между 1985 и 2013 годом? Почему мое мнение по поводу падения в черную дыру кардинально изменилось?

В 1985 году мы, физики, считали, что в сердцевине всех черных дыр находятся хаотично-разрушительные БХЛ-сингулярности и что бы ни попало в черную дыру, оно будет уничтожено растяжениями и сжатиями сингулярности (см. главу 26). Это было весьма обоснованное предположение. Но мы ошибались.

За четверть века внутри черных дыр были открыты (математически) еще две сингулярности — две мягкие сингулярности, насколько сингулярность вообще может быть мягкой (см. главу 26). Достаточно мягкие, чтобы Купер, угодив в одну из них, имел шанс выжить. Я сомневаюсь, что он бы выжил, однако не могу сказать это наверняка. Так что, как я считаю теперь, для научной фантастики вариант с выживанием вполне допустим.

Кроме того, за эту четверть столетия мы узнали, что наша Вселенная, вероятно, является браной в многомерном балке (см. главу 21). И в фантастике, на мой взгляд, вполне допустимо принять, что в балке обитают живые создания — высокоразвитая цивилизация существей балка, — которые могут в последний момент спасти Купера от сингулярности. Этот вариант и выбрал Кристофер Нолан.

#### Через горизонт событий

И

В фильме, когда «Рейнджер-2», пилотируемый Купером, и посадочный модуль 1, которым управляет ТАРС, отделяются от «Эндюранс», они опускаются по спирали к горизонту событий

Гаргантюа и проходят сквозь него. Что говорят законы теории относительности о такой нисходящей спирали?

Согласно им, а значит и Кип-версии, Амелия Брэнд, наблюдающая за этими событиями из «Эндюранс», никогда не увидит, как «Рейнджер» проходит сквозь горизонт. И ни один сигнал, посланный Купером с той стороны горизонта, никогда не выйдет наружу. За горизонтом событий время течет вниз, и этот нисходящий поток времени увлекает Купера и все посылаемые им сигналы за собой, внутрь, прочь от горизонта (см. главу 5).

Что же видит Брэнд (если она и КЕЙС сумели стабилизировать «Эндюранс» на достаточное время, чтобы наблюдать за этими событиями)? Поскольку и «Эндюранс», и «Рейнджер» находятся довольно глубоко в цилиндрической области искривленного пространства Гаргантюа (рис. 28.1), пространственный вихрь носит их обоих по кругу примерно с одинаковой угловой скоростью (с одинаковым орбитальным периодом). Поэтому с точки зрения Брэнд, в ее орбитальной системе отсчета, «Рейнджер» удаляется от «Эндюранс», падая почти строго вниз к горизонту (рис. 28.1), как это и показано в фильме.

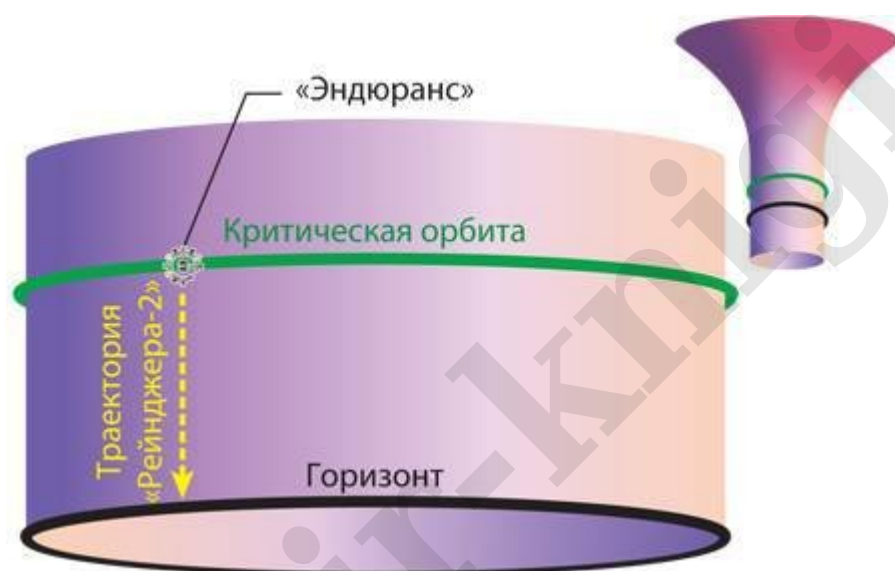


Рис. 28.1. Траектория, по которой «Рейнджер» движется через искривленное пространство Гаргантюа, в орбитальной системе отсчета «Эндюранс» (корабль изображен большим, чем он есть в действительности, чтобы вы могли его разглядеть). В правом верхнем углу: более крупная область искривленного пространства Гаргантюа (Изображение «Эндюранс» взято из фильма.)

Когда Брэнд наблюдает, как «Рейнджер» приближается к горизонту, относительно ее времени, как требуют того законы Эйнштейна, время для «Рейнджера» замедляется, а затем останавливается. Из этого есть несколько следствий. Она должна видеть, как падение «Рейнджера» замедляется и он застывает прямо над горизонтом. Она должна видеть, как свет, идущий от «Рейнджера», сдвигается в сторону все большей и большей длины волн, все к меньшим и меньшим частотам, становясь все краснее и краснее, до тех пор пока «Рейнджер» не станет полностью черным и неразличимым. Те сигналы, которые Купер посылает Брэнд с интервалом в одну секунду (по времени «Рейнджера»), доходят до нее со все большей и большей задержкой (по времени «Эндюранс»). Через несколько часов до Амелии дойдет последний сигнал, который она когда-либо получит от Купера, — сигнал, который он отослал перед тем, как пересек горизонт. Купер же, напротив, продолжает получать сигналы от Брэнд и после пересечения горизонта. Эти сигналы без проблем проникают в Гаргантюа и достигают

Купера, тогда как его сигналы не могут выйти наружу. Именно так и должно все происходить согласно законам теории относительности.

Более того, эти законы говорят нам, что Купер, пересекая горизонт, не замечает ничего особенного. Он не может знать, какой из его сигналов станет последним из дошедших до Брэнд. И он не может, оглядевшись вокруг, точно сказать, где расположен горизонт. Горизонт для него так же неразличим, как для вас — земной экватор, когда вы пересекаете его на круизном лайнере.

Эти противоречивые на первый взгляд наблюдения Брэнд и Купера — результат двух обстоятельств: искривления времени и того, что время, которое проводят в пути свет и сигналы, конечно. Если обратить внимание на эти два аспекта, то все противоречия будут сняты.

Между сингулярностями



Когда «Рейнджер» несет Купера глубже и глубже в недра Гаргантюа, Купер продолжает видеть над собой внешнюю Вселенную. И следом за лучами света, которые приносят ему это изображение, мчится падающая сингулярность. Сначала она слаба, но быстро усиливается по мере того, как все больше и больше вещества падает в Гаргантюа и собирается тонким слоем (см. главу 27). Этого требуют законы Эйнштейна.

А под «Рейнджером» находится вылетающая сингулярность, порожденная всем, что упало в черную дыру уже давно и теперь рассеивается в направлении «Рейнджера» (см. главу 27).

«Рейнджер» находится между двух сингулярностей (рис. 28.2). И он неизбежно встретится или с той, или с другой.

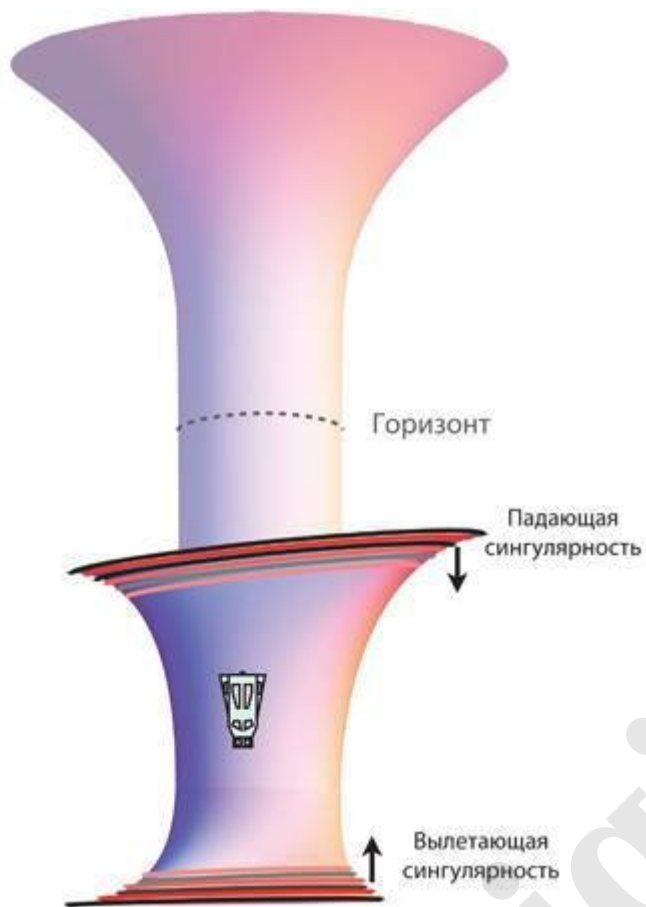


Рис. 28.2. «Рейнджер» зажат между падающей и вылетающей сингулярностями Гаргантюа. «Рейнджер» здесь гораздо больше, чем был бы в действительности

Когда я рассказал об этих сингулярностях Крису, он сразу понял, с какой из них повстречается «Рейнджер» — с вылетающей сингулярностью. А почему? Потому что Крис уже внес в правила фильма запрет, гласящий, что физические объекты никогда не могут путешествовать во времени назад (см. главу 30). Падающая сингулярность порождена всем, что упало в Гаргантюа спустя много времени после падения Купера (много — по меркам внешней Вселенной, по земному времени). Если Купер столкнется с этой сингулярностью и выживет, далекое будущее Вселенной станет его прошлым. Он окажется настолько далеко в нашем будущем, что даже с помощью существей из балка не сможет вернуться в Солнечную систему раньше, чем спустя миллиарды лет после того, как он ее покинул (если сможет вообще). И это не позволит ему когда-либо воссоединиться с дочерью.

Поэтому Крис твердо решил, что Купер столкнется с вылетающей, а не падающей сингулярностью — сингулярностью, которая образована всем, что упало в Гаргантюа прежде «Рейнджера», а не после него.

Правда, решение Криса несколько усложнило мою задачу интерпретировать события фильма с научной точки зрения (хоть, разумеется, и не так, как ее могло бы усложнить путешествие назад во времени). Если «Рейнджер» сразу падает с критической орбиты прямоком в Гаргантюа, его падение будет достаточно медленным — и тогда его нагонит падающая сингулярность. Чтобы вместо этого он столкнулся с вылетающей сингулярностью, как хотел этого Крис, «Рейнджер» должен убежать от падающей сингулярности, которая опускается на него со скоростью света. Он сможет это сделать, если сильно подтолкнуть его внутрь. Но как? Уже привычным нам способом. С помощью гравитационной пращи от черной дыры средней массы, вскоре после отделения от «Эндюранс».



Глядя вверх во время своего падения, Купер видит внешнюю Вселенную. Поскольку его падение было ускорено, он видит, как время во внешней Вселенной течет примерно с той же скоростью, что и его собственное<sup>88</sup>, и он видит изображение внешней Вселенной уменьшенным<sup>89</sup> — оно занимает не около половины неба, а примерно четверть.

Впервые увидев соответствующие кадры из фильма, я порадовался, что команда Пола Франклина поняла все правильно. Более того, они обратили внимание на то, о чем забыл я: в фильме изображение Вселенной окружено аккреционным диском Гаргантюа (рис. 28.3). Можете объяснить почему?



Рис. 28.3. Внешняя Вселенная, окруженная аккреционным диском, как ее видит Купер из Гаргантюа, глядя вверх вдоль фюзеляжа «Рейнджера». Черная область слева — тень Гаргантюа (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Купер видит все, что над ним, но не видит падающей сингулярности, которая опускается за ним со скоростью света, вслед за лучами, которые приносят ему изображение аккреционного диска и внешней Вселенной, но не настигая их.

Поскольку мы весьма невежественны по части внутреннего устройства черных дыр, я сказал Крису и Полу, что изображая то, что Купер видит внизу (то, что приближается к нему по мере его падения), они могут дать волю своей фантазии. Я попросил их лишь об одном: «Пожалуйста, не показывайте внутри черной дыры Сатану и адское пламя, как это было в фильме студии Диснея». В ответ Крис и Пол захихикали. Само собой, у них и в мыслях такого не было.

Когда мне показали, что у них в итоге вышло, я счел их решение весьма разумным. Глядя вниз, Купер видит свет от объектов, которые упали в Гаргантюа раньше него и все еще продолжают падать. Сами объекты не должны для этого испускать свет: Купер видит их, поскольку они отражают свет аккреционного диска — так мы видим Луну, отражающую свет Солнца. Думаю, большая часть этих объектов — межзвездная пыль, чем объясняется то, что Купер видит туман.

Также Купер может догонять объекты, падающие медленнее, чем он сам. Этим можно объяснить белые хлопья, которые ударяются о «Рейнджер» и отлетают от него.

### Спасительный тессеракт



В Кип-версии, когда «Рейнджер» приближается к вылетающей сингулярности, он сталкивается с нарастающими приливными силами. В последний момент Купер катапультируется, и приливные силы разрывают «Рейнджер» на части — он разламывается надвое. У края сингулярности Купера поджидает тессеракт, который, видимо, поместили сюда сущности из балка (рис. 28.4).

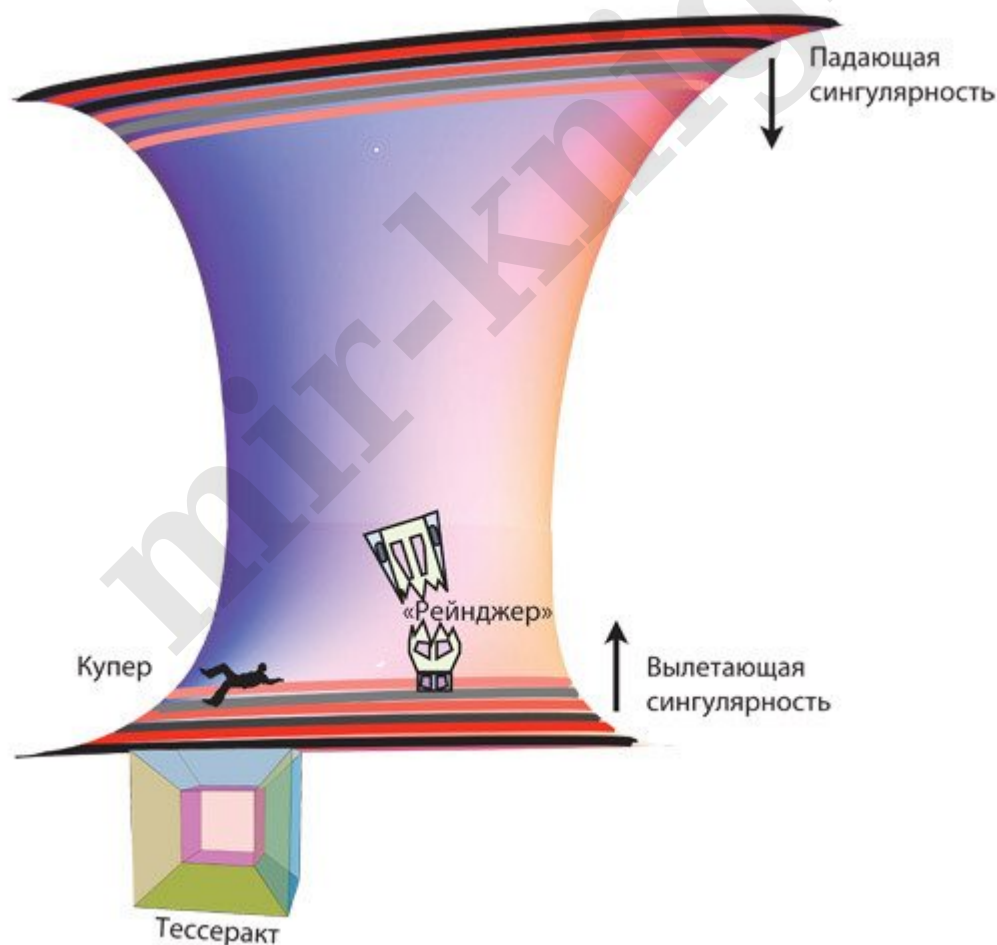


Рис. 28.4. Купера вот-вот подхватит тессеракт, находящийся у края сингулярности. «Рейнджер» и Купер изображены гораздо больше, чем должны быть; к тому же они двумерны, поскольку одно пространственное измерение на этом рисунке опущено

## Тессеракт

В «Интерстеллар» издалека тессеракт выглядит как сфера, покрытая узором из светящихся квадратов. Каждый квадрат — это торец стержня. Попад в тессеракт, оцепеневший и дезориентированный Купер падает в шахту между стержнями, то и дело задевая что-то, напоминающее кирпичи, из которых сложены стены шахты, хотя на деле оказывается, что это книги. «Шахта» ведет в большой зал; Купер плавает в нем и постепенно начинает понимать, что к чему.

Этот зал — одна из трехмерных граней четырехмерного тессеракта в уникальной трактовке Кристофера Нолана, с доработками от Пола Франклина и его команды по созданию визуальных эффектов. Зал и окружающее его пространство в высшей степени сложны и необычны. Когда я увидел это впервые, я был сбит с толку не меньше Купера, хоть и знаю, что такое тессеракт. Крис и Пол настолько усложнили тессеракт, что, лишь поговорив с ними, я окончательно разобрался в его структуре.

Вот то, что я знаю и что понял. Я начну с обычного, простого тессеракта, а затем перейду к усложненному тессеракту Криса.

Точка — линия — квадрат — куб — тессеракт



Обычный тессеракт — это гиперкуб, куб в четырех измерениях. С помощью рис. 29.1 и 29.2 я по шагам объясню, что это значит. Если мы возьмем точку (рис. 29.1 сверху) и будем двигать ее в одном измерении, мы получим линию (точнее отрезок). Два конца линии можно представить как две грани шириной в одну точку. Линия обладает одним измерением (вдоль которого она тянется), а у ее «граней» на одно измерение меньше — то есть ноль.

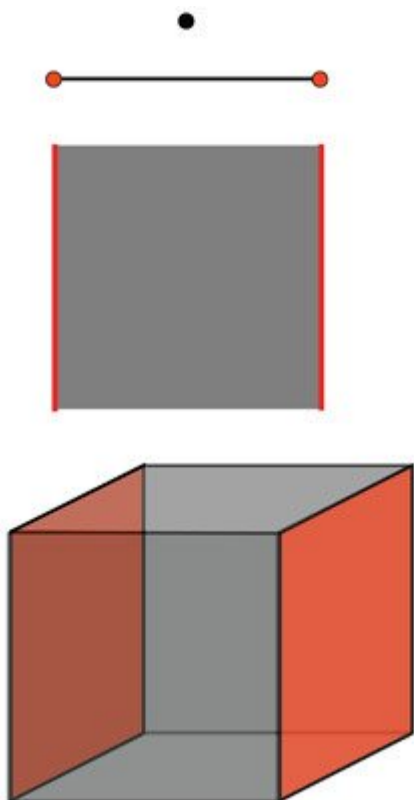


Рис. 29.1. От точки к линии, от линии к квадрату, от квадрата к кубу

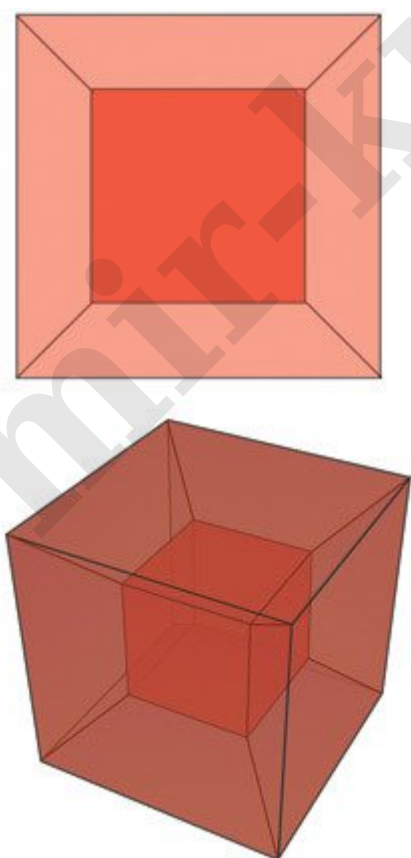


Рис. 29.2. От куба к тессеракту

Если мы возьмем линию и будем двигать в перпендикулярном ей измерении (рис. 29.1

посередине), то получим квадрат. У квадрата четыре грани, и это линии. У квадрата два измерения, а у его граней на одно измерение меньше — то есть одно.

Если мы возьмем квадрат и будем двигать в перпендикулярном ему измерении (рис. 29.1 снизу), то получим куб. У куба шесть граней, и это квадраты. У куба три измерения, а у его граней на одно меньше — то есть два.

Следующий шаг нетрудно предугадать, но чтобы его изобразить, мне придется перерисовать куб так, как вы бы его видели, если бы находились прямо перед одной из оранжевых граней (рис. 29.2 сверху). Если теперь перемещать первоначальный (темно-оранжевый) квадрат, чтобы образовался куб, покажется, что квадрат, став ближней гранью куба, увеличился в размере.

Теперь, если мы возьмем куб и будем его двигать в измерении, которое перпендикулярно ему (рис. 29.2 снизу), то получим тессеракт. Изображенный тессеракт похож на два куба, один внутри другого. На картинке внутренний куб расширился наружу, образуя четырехмерный объем тессеракта. У тессеракта восемь граней, и это кубы. Сможете найти все восемь? Тессеракт обладает четырьмя пространственными измерениями, а у его граней на одно измерение меньше — то есть три. У тессеракта и его граней общее временное измерение, не показанное на рисунке.

Зал, где оказывается Купер, — это одна из восьми кубических граней тессеракта — хотя, как я уже говорил, Крис и Пол хитроумно модифицировали его. Перед тем как рассказать о внесенных ими усовершенствованиях, я, чтобы дать свою интерпретацию самых первых сцен в тессеракте, воспользуюсь обычным тессерактом.

Купер путешествует в тессеракте



Поскольку Купер состоит из атомов, которые удерживаются вместе электрическими и ядерными силами и которые могут существовать только в трех пространственных измерениях и одном временном, он вынужден находиться лишь в одной из трехмерных граней тессеракта (в кубе). Купер не может ощутить четвертое пространственное измерение тессеракта. На рис. 29.3 показано, как он плавает внутри одной из граней тессеракта, границы которой я обвел фиолетовыми линиями.

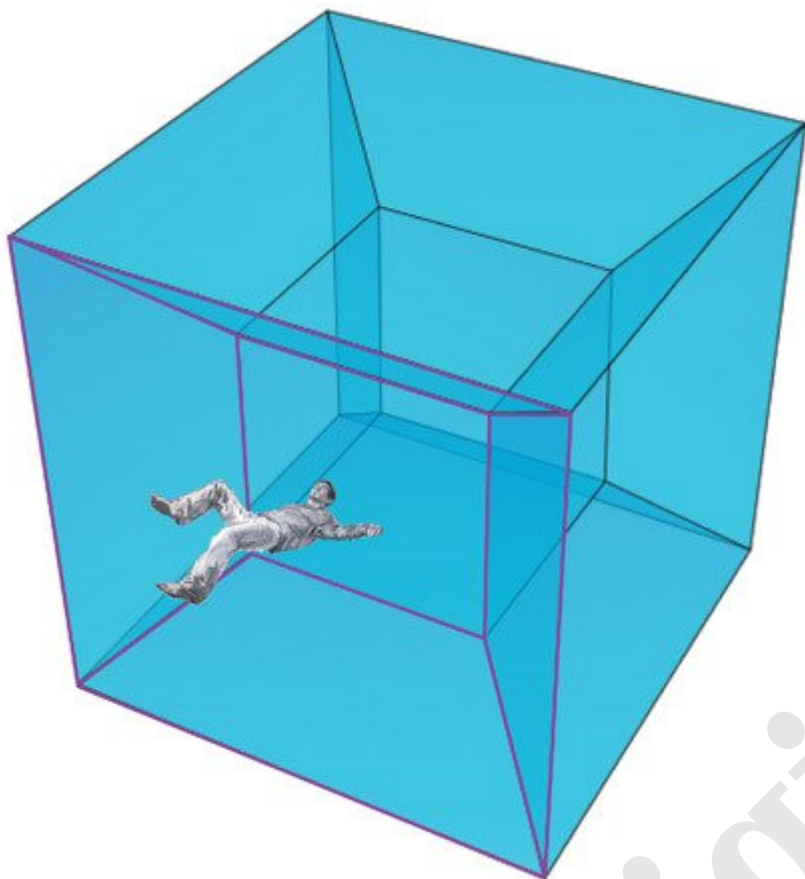


Рис. 29.3. Купер внутри трехмерной грани тессеракта

В Кип-версии тессеракт поднимается из сингулярности в балк. Будучи объектом с тем же количеством пространственных измерений (четыре), он чувствует себя в балке прекрасно. И переносит трехмерного Купера, расположившегося в одной из трехмерных граней, через балк.

Теперь вспомним, что расстояние от Гаргантюа до Земли равно примерно 10 миллиардам световых лет, если измерять его в нашей бране (нашей Вселенной с ее тремя измерениями). Однако если измерить это расстояние в балке, оно составит всего лишь около 1 а. е. (расстояние от Солнца до Земли), см. рис. 23.7. Поэтому, перемещаясь с помощью некоего двигателя, которым снабдили его сущности из балка, тессеракт, в Кип-версии, может быстро перевезти Купера с одного края нашей Вселенной на другой (на Землю) через балк.

На рис. 29.4 показан один из моментов этого путешествия. Одно пространственное измерение на рисунке опущено, и тессеракт здесь — трехмерный куб в трехмерном балке, а Купер — двумерный силуэт на двумерной грани куба,двигающегося параллельно нашей двумерной Вселенной (бране).

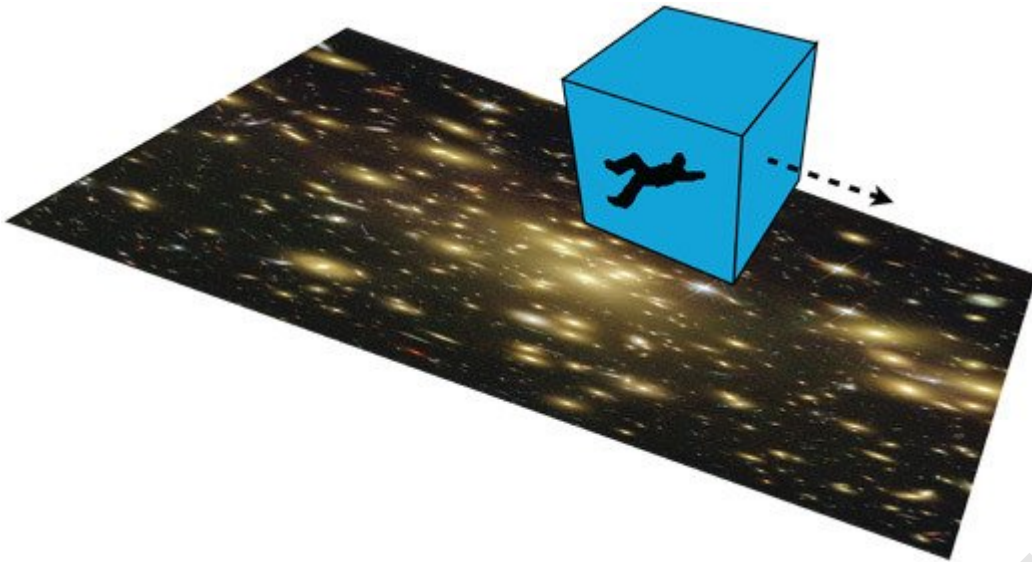


Рис. 29.4. Купер путешествует через балку, над нашей браной, в одной из граней тессеракта. Одно пространственное измерение опущено

Чтобы это соответствовало показанному на экране, я считаю путешествие очень быстрым, длительностью всего в несколько минут, в течение которых ошарашенный Купер все еще падает в тессеракте. Когда он, наконец, попадает в большой зал, тессеракт пристыковывается около спальни Мёрф.

Стыковка со спальней Мёрф



Как происходит стыковка? В моей интерпретации тессеракт, остановившись в балке около Земли, должен пройти через трехсантиметровый AdS-слой, в котором заключена наша брана (см. главу 23), чтобы приблизиться к спальне Мёрф. Вероятно, сущности из балка, которые построили тессеракт, снабдили его каким-то устройством для раздвигания AdS-слоя, чтобы расчистить путь к нашей бране.

На рис. 29.5 показан тессеракт, который уже прошел через AdS-слой и пристыковался возле спальни Мёрф в доме Купера. Как и прежде, здесь опущено одно пространственное измерение, поэтому тессеракт изображен как трехмерный куб, а дом и спальня Мёрф, равно как и Купер, — двумерные.

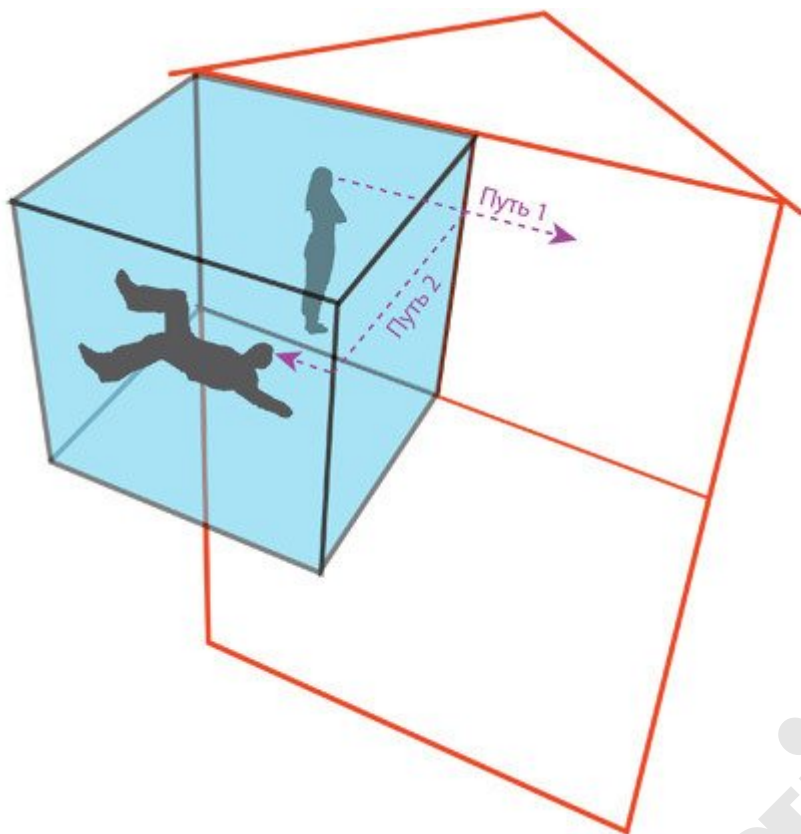


Рис. 29.5. Тессеракт, пристыкованный возле спальни Мёрф

Дальняя грань тессеракта совмещена со спальней Мёрф. Поясню подробнее. Дальняя грань — это трехмерное сечение тессеракта, которое находится в спальне Мёрф в том же смысле, в каком сфера на рис. 22.2 находится в двумерной бране, а сферическое сечение гиперсферы на рис. 22.3 находится в трехмерной бране. То есть все, что есть в спальне Мёрф, включая ее саму, тоже находится внутри дальней грани.

Когда идущий от Мёрф луч света достигает границы между спальней и тессерактом, он может пойти дальше двумя путями. Либо остаться в нашей бране, пойдя по пути 1 (рис. 29.5) — в стену или наружу в открытую дверь. Либо оказаться в тессеракте, пойдя по пути 2, к следующей грани тессеракта, а через нее — в глаза Купера. Некоторые фотоны луча отправятся по пути 1, остальные — по пути 2, формируя для Купера изображение Мёрф.

Теперь посмотрите на рис. 29.6, где я восстановил недостающее измерение. Когда Купер смотрит сквозь правую стену зала, он видит происходящее в спальне Мёрф через правую стену спальни (белый луч справа). Глядя через левую стену зала, Купер видит спальню через ее левую стену (белый луч слева). Глядя через заднюю стену зала, он видит спальню через ее заднюю стену. Глядя через переднюю стену зала (оранжевый луч), он видит спальню через ее переднюю стену (хоть из рис. 29.6 это и не очевидно, но можете объяснить, почему это так?). Глядя в направлении желтого луча, Купер видит спальню через ее потолок, а глядя в направлении красного луча — через пол. Куперу, когда он смотрит по сторонам, кажется, будто он летает вокруг спальни Мёрф (так описал это Крис, когда впервые показал мне свой усложненный тессеракт).

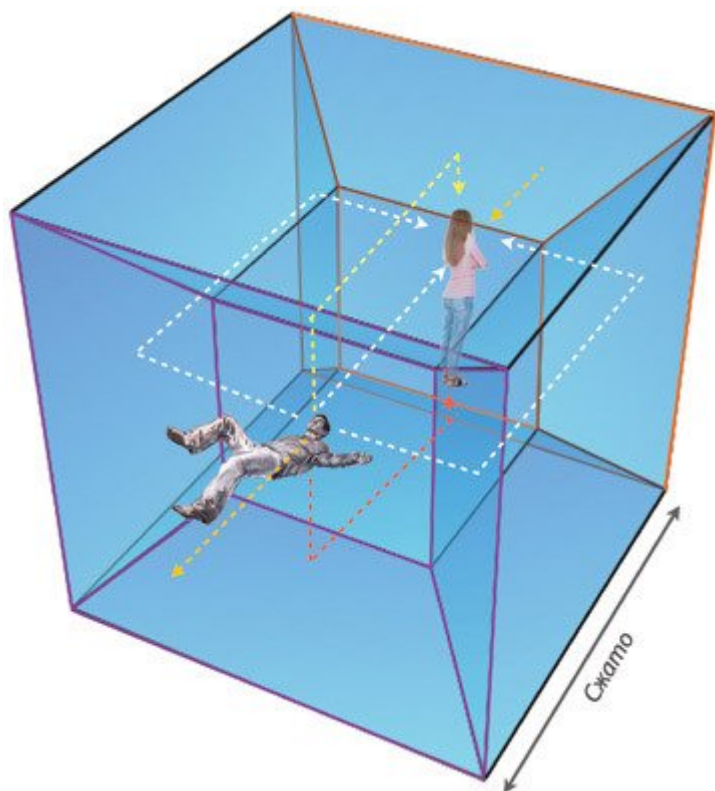


Рис. 29.6. Купер смотрит в спальню Мёрф (обведена оранжевым) через каждую из шести стен своей грани тессеракта (обведена фиолетовым). В спальне он видит саму Мёрф

На рис. 29.6 все шесть лучей должны пройти через промежуточные кубы (грани тессеракта), прежде чем попадут в спальню Мёрф. В фильме незаметно, чтобы между залом и спальней было какое-то расстояние, следовательно, Крис и Пол сжали тессеракт в одном из измерений — см. серую стрелку с пометкой «Сжато» на рис. 29.6.

После такого сжатия каждая грань зала будет сообщаться с соответствующей гранью спальни (стеной, полом или потолком) без промежуточного пространства, так что для Купера происходящее будет выглядеть как на рис. 29.7. Он видит шесть спален, каждая из которых сообщается с одной из граней зала, и все они одинаковые, меняется только ракурс. Они и вправду одинаковы — есть только одна спальня, хоть Куперу и кажется, что их шесть.

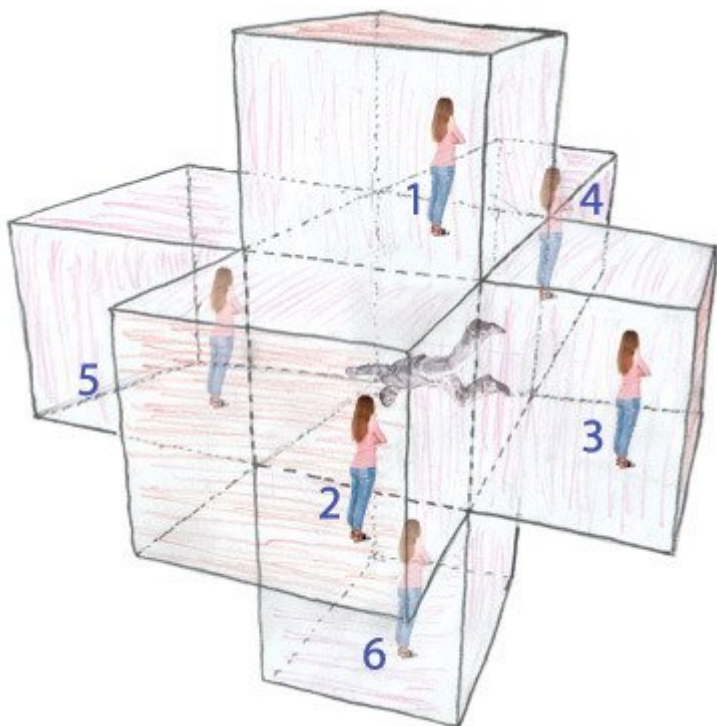


Рис. 29.7. Шесть видов спальни Мёрф, которые Купер наблюдает из своей грани тессеракта (Мой набросок от руки.)

#### Усложненный тессеракт Нолана



На рис. 29.8 показан кадр из фильма, где Купер плавает в зале тессеракта. Это совсем не похоже на рис. 29.7 — благодаря сложным модификациям, задуманным Крисом и воплощенным Полом и его командой.

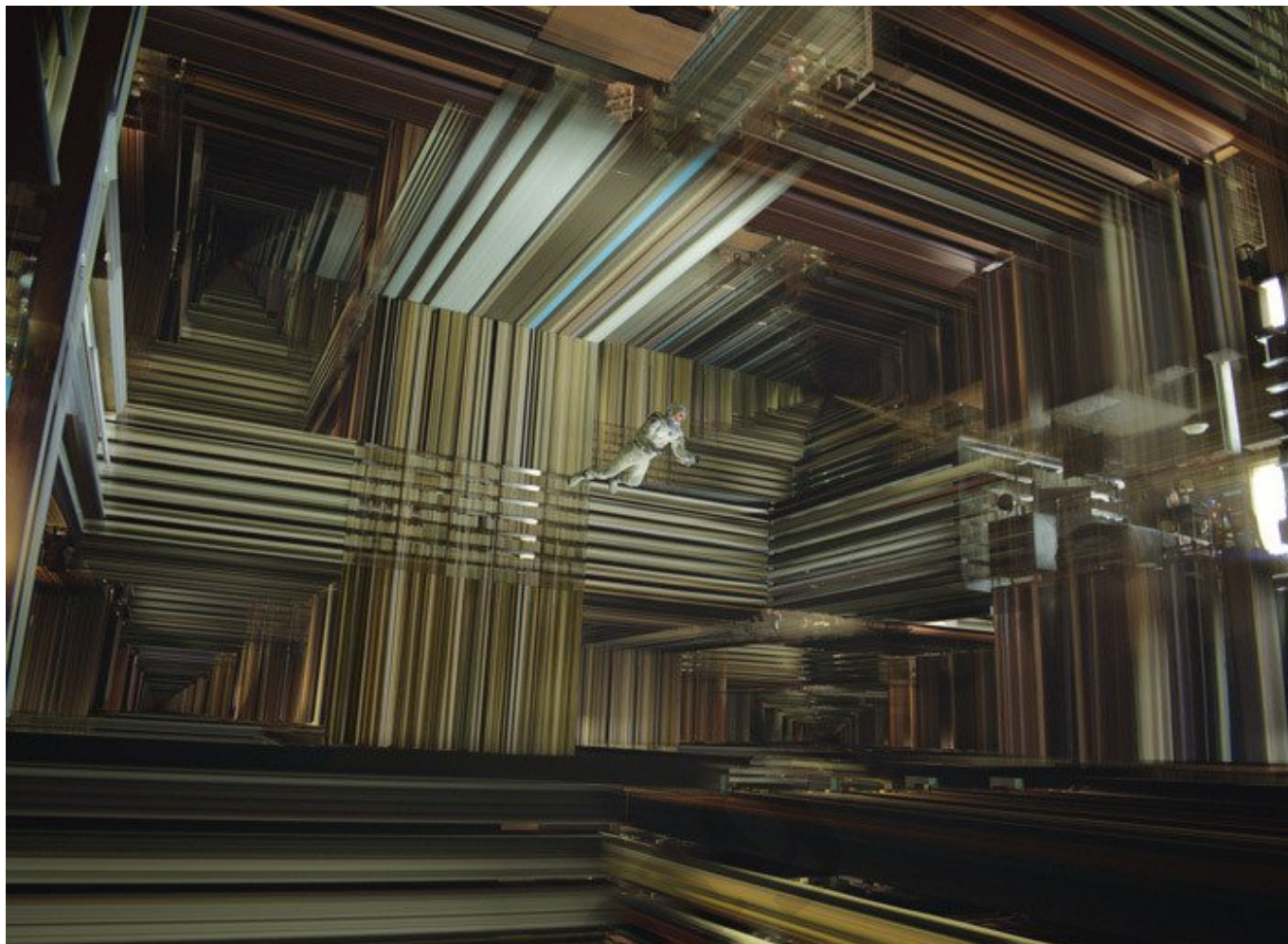


Рис. 29.8. Купер плавает в усложненном тессеракте Нолана (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Первое, на что я обратил внимание, когда увидел усложненный тессеракт Криса, — в три раза увеличенные размеры зала, из-за чего грань спальни, сообщаясь с центром грани зала, занимает лишь девятую ее часть. Я изобразил это на рис. 29.9, убрав для простоты несущественные детали (в частности, три дальние грани зала)<sup>91</sup>.

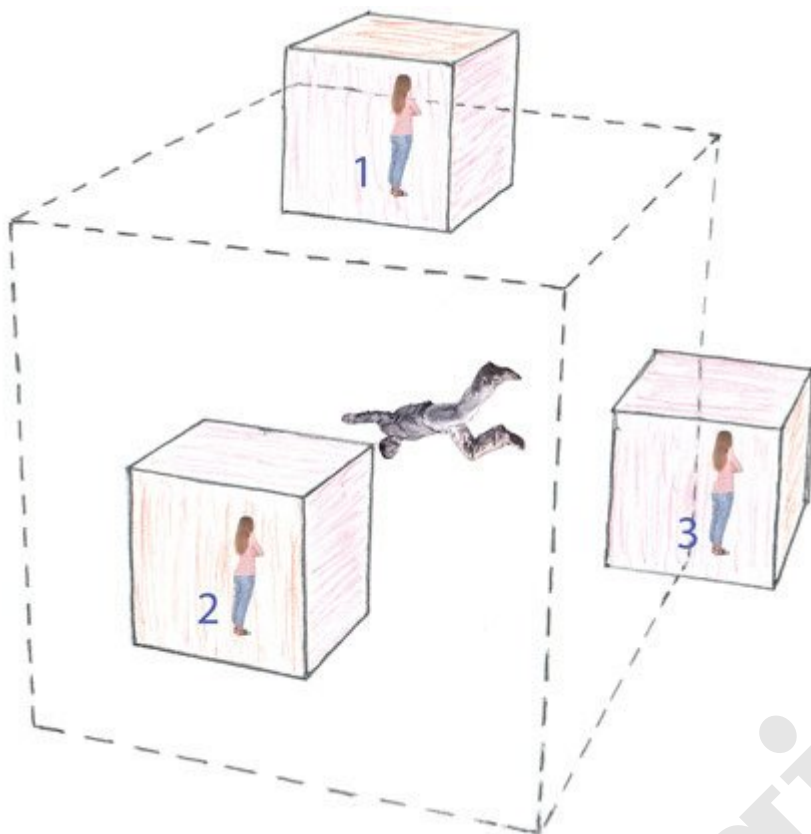


Рис. 29.9. Линейные размеры зала Купера втрое больше, чем у спальни, так что грань спальни занимает лишь девятую часть грани зала в центре (Мой рисунок от руки.)

Кроме того, я заметил, что через каждую спальню проходит по два будто бы смазанных стержня (рис. 29.10 и 29.11). Как объяснили мне Крис и Пол, везде, где такие стержни пересекаются, находится спальня — например, спальни 7-9, равно как и спальни 1-6.

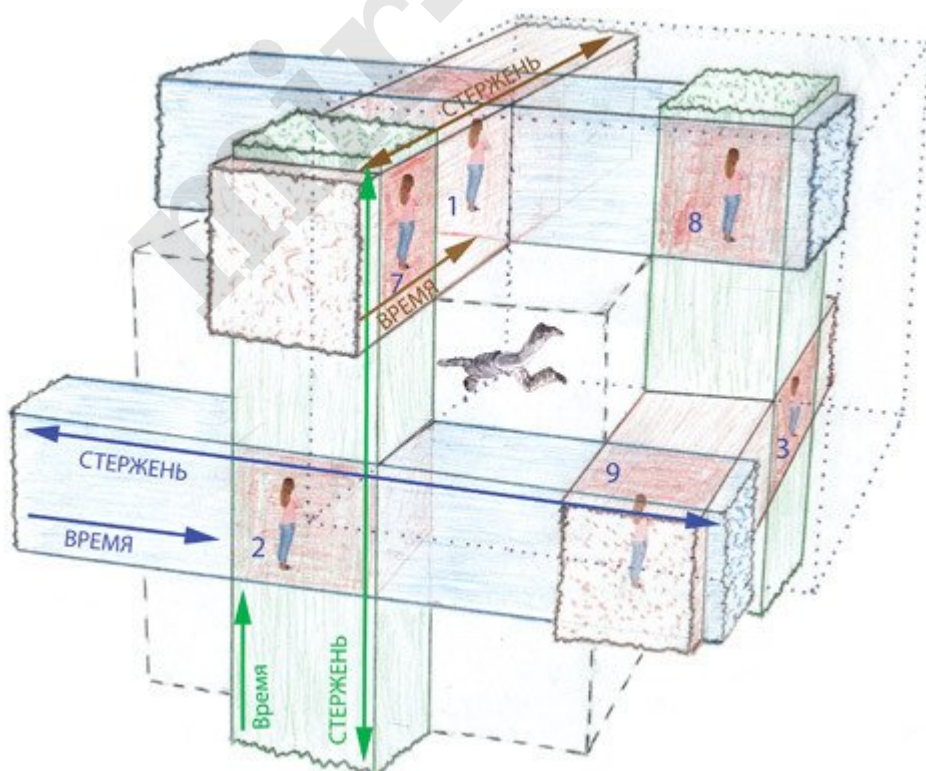


Рис. 29.10. Стержни проходят через все спальни; по стержням течет время (Мой набросок от руки.)

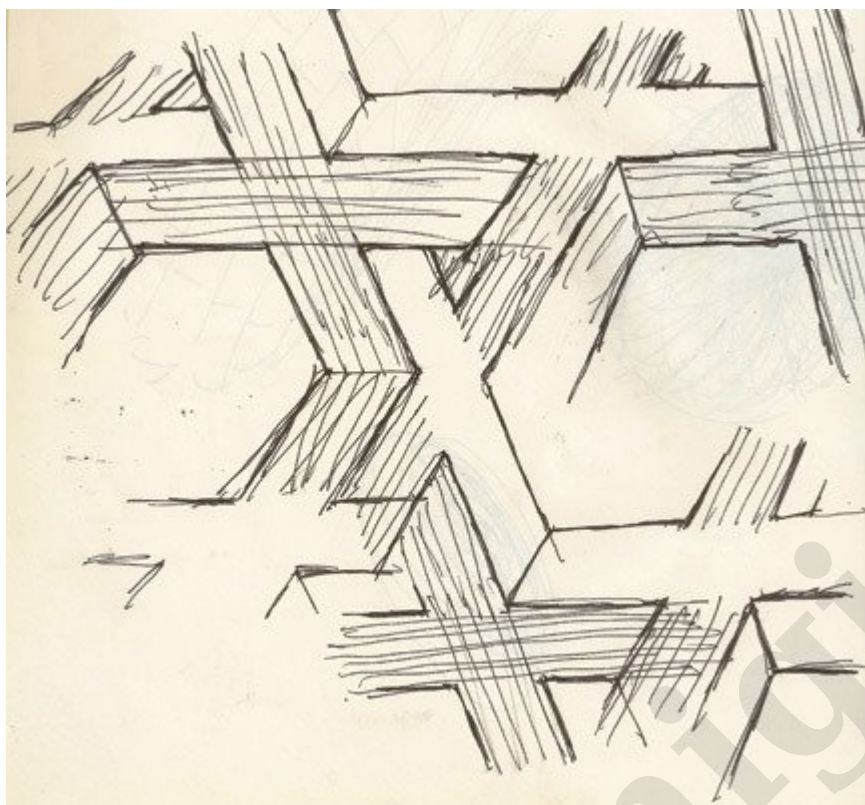


Рис. 29.11. Рабочий вариант усложненного тессеракта из блокнота Кристофера Нолана<sup>92</sup>

Эти стержни тянутся неограниченно, пересекаясь, они образуют бесконечную на вид решетку из спален и залов<sup>93</sup> вроде того, в котором очутился Купер (контур, обозначенный штриховым пунктиром, на рис. 29.10). Например, коричневые грани спален 7, 8 и 9 примыкают к залу, контур которого обозначен точечным пунктиром. Дальний левый нижний угол этого зала перекрывает ближний правый верхний угол зала Купера.

ТАРС подсказывает нам, что представляют собой эти стержни, спальни и залы, когда говорит: «Время здесь — это пространственное измерение».

Крис и Пол подробно разъяснили мне этот момент. Сущности из балка, сказали они, отображают время для синеватых стержней (рис. 29.10) как текущее в направлении синей стрелки, для зеленоватых стержней — в направлении зеленой стрелки и для коричневатых — в направлении коричневой стрелки.

Чтобы хорошенько в этом разобраться, давайте остановимся на паре стержней, которые пересекаются, образуя спальню 2 (см. рис. 29.12). На этом рисунке вертикальные сечения спальни движутся вместе с потоком времени вправо, вдоль синей стрелки, и порождают таким образом синеватый стержень. Аналогично горизонтальные сечения движутся со временем вверх, вдоль зеленой стрелки, порождая зеленоватый стержень. Там, где пересекаются два набора сечений — то есть где пересекаются стержни, — образуется спальня.

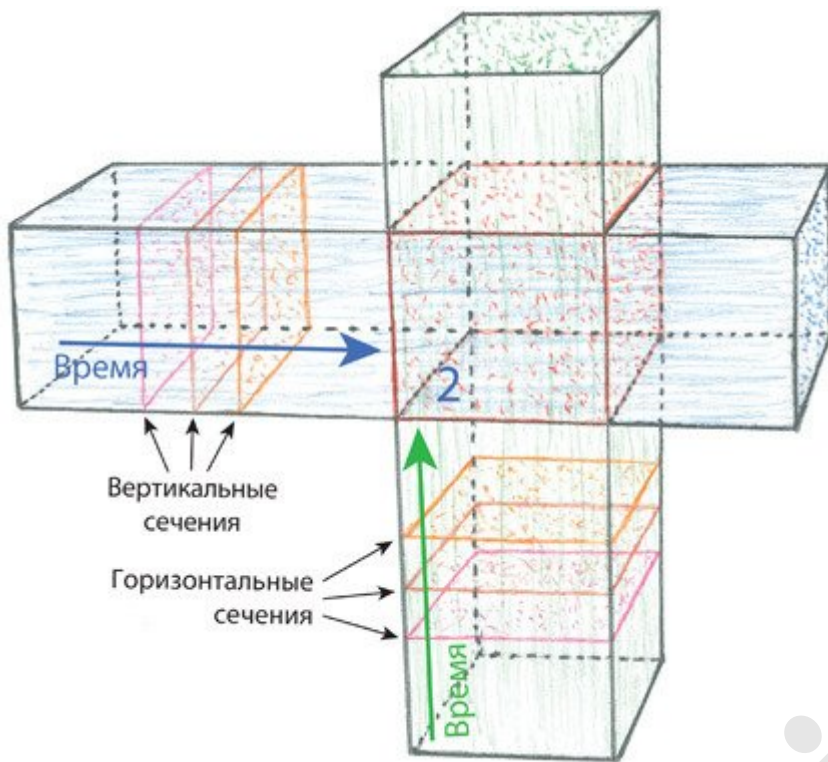


Рис. 29.12. Сечения спальни Мёрф движутся по двум стержням. Спальня 2 находится там, где пересекаются два набора сечений

То же верно и для остальных стержней: там, где два стержня пересекаются, сечения, из которых они состоят, образуют спальню.

Поскольку скорость движения сечений конечна, спальни не синхронизированы. Например, если сечения проходят от одной спальни к следующей за секунду, тогда все спальни, пронумерованные голубыми цифрами, на рис. 29.13 отстают от изображения спальни 0 на количество секунд, показанное черными цифрами. В частности, спальня 2 на секунду впереди спальни 0, спальня 9 на две секунды впереди спальни 0, а спальня 8 на четыре секунды впереди спальни 0. Можете объяснить почему?

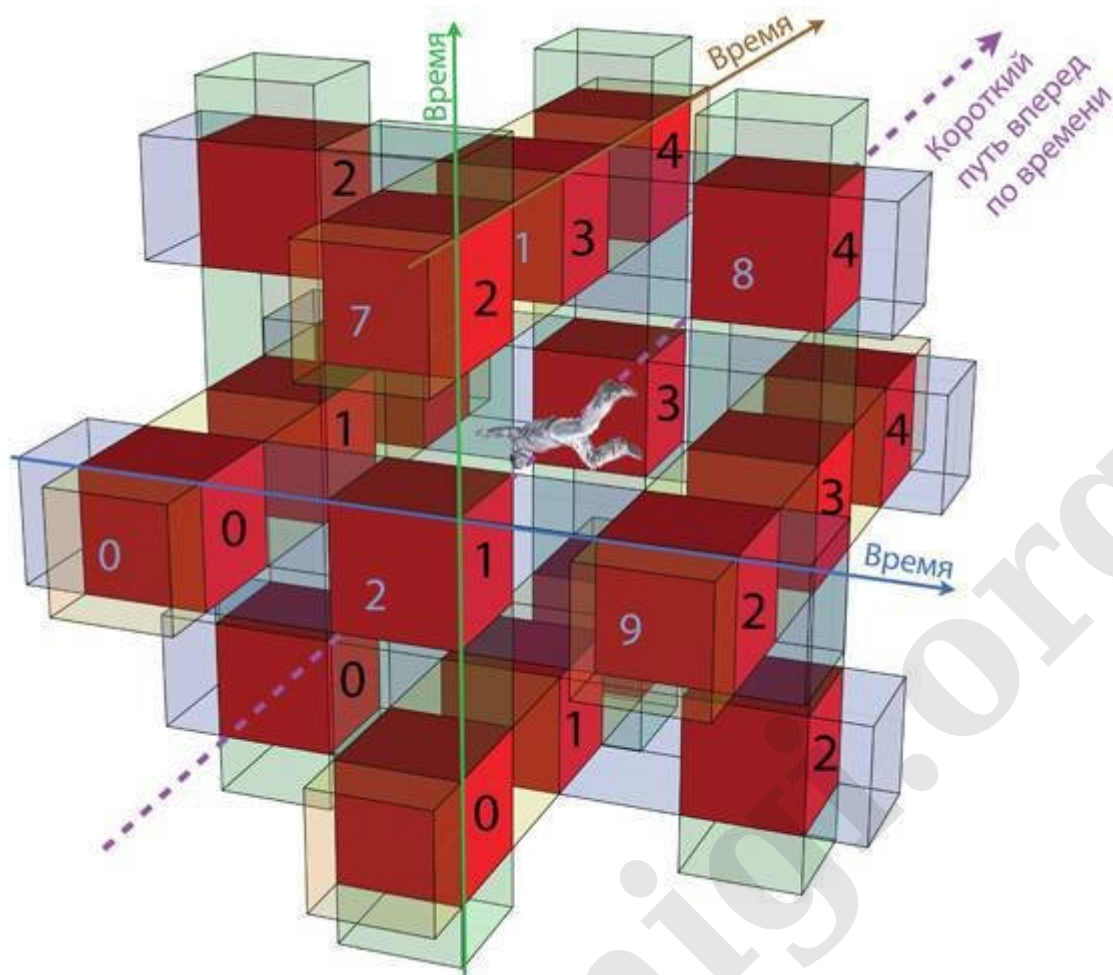


Рис. 29.13. Фрагмент решетки, образованной пересечениями движущихся по стержням сечений спальни. Голубыми числами обозначены спальни (сохраняется нумерация с предыдущих рисунков). Черные числа показывают количество секунд, на которое отстоит та или иная спальня от спальни 0. Пунктирная фиолетовая стрелка — направление, в котором Купер может быстрее всего продвинуться вперед по времени спальни

В фильме промежуток времени между соседними спальнями составляет около десятой доли секунды. Это можно определить, внимательно изучив кадры с соседними спальнями, где занавески развеваются на ветру.

Разумеется, каждая спальня в тессеракте — это реальная спальня Мёрф в конкретный момент времени (см. черные числа на рис. 29.13).

Купер может двигаться быстрее, чем течет время в стержнях спальни, поэтому он может легко переместиться по тессеракту в тот момент времени спальни, какой только пожелает!

Чтобы быстрее всего переместиться вперед по времени спальни Мёрф, Купер должен двигаться по диагонали зала в направлении суммарного вектора синего, зеленого и коричневого времен, по фиолетовой пунктирной линии на рис. 29.13. Такие диагонали свободны от стержней, это открытые проходы, по которым Купер может свободно перемещаться. В фильме мы видим, как он летит по такому диагональному проходу, чтобы попасть из времени, где падают книги, во время, где дергается стрелка наручных часов (рис. 29.14).

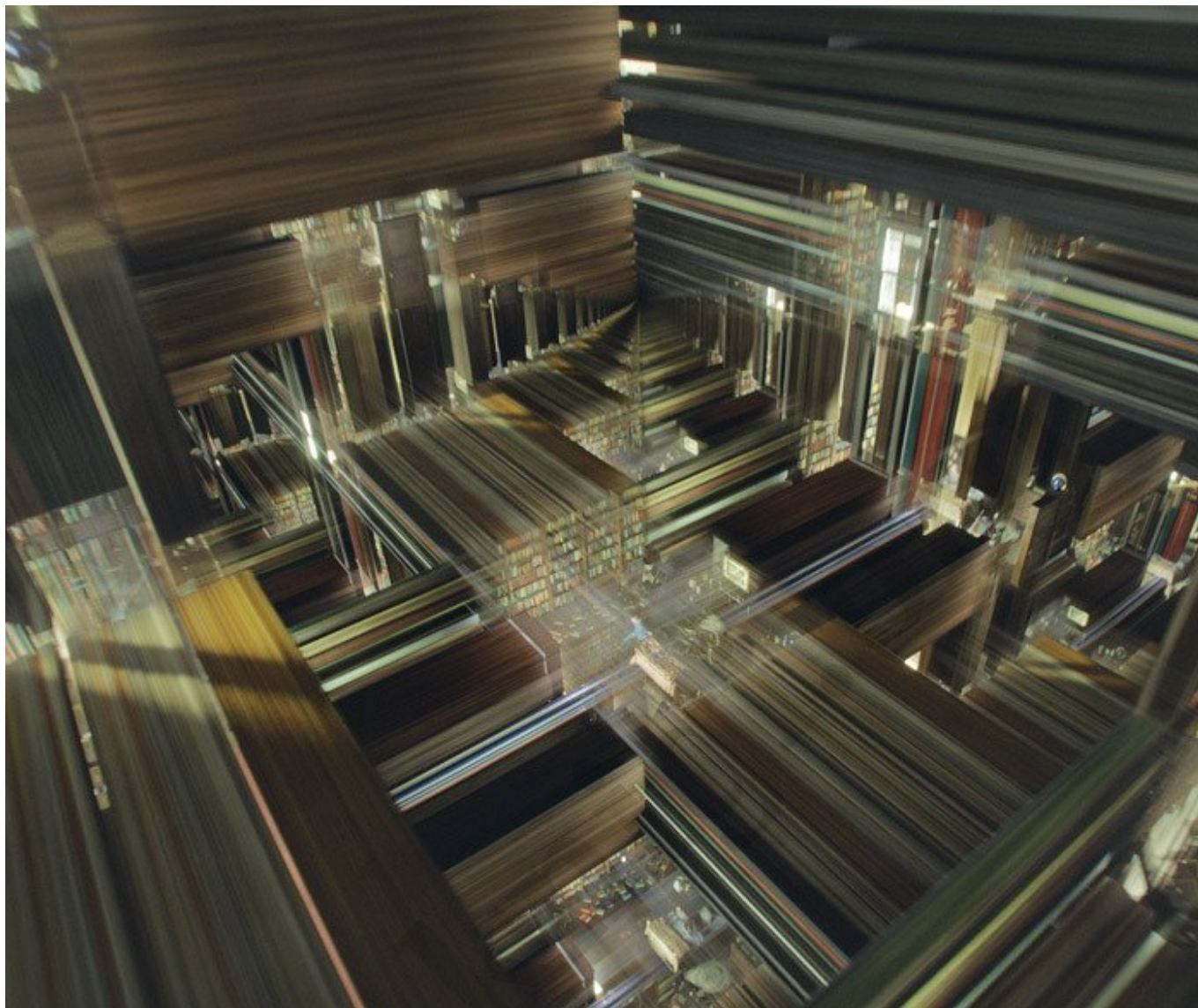


Рис. 29.14. То, что видит Купер, когда он быстро перемещается во времени спальни Мёрф, двигаясь через тессеракт коротким путем, по диагональному проходу. Диагональный проход — сверху посередине (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Действительно ли Купер, перемещаясь по тессеракту, путешествует вперед и назад во времени? Вперед и назад в том смысле, в котором Амелия Брэнд рассуждает о сущностях из балка: «Возможно, для Них время — просто еще одно физическое измерение. Для Них прошлое может быть каньоном, куда они могут спуститься, а будущее — горой, на которую можно взобраться. Но для нас это не так, понятно?»

Однако каким правилам подчиняются в «Интерстеллар» путешествия во времени?

30

Передача сообщений в прошлое

Набор правил для зрителя

Еще до того, как Кристофер Нолан стал режиссером «Интерстеллар» и переработал сценарий, его брат Джона рассказал мне про набор правил.

Чтобы поддерживать в научно-фантастическом фильме нужный уровень напряжения, сказал Джона, зрителям нужно разъяснить законы игры, дать им «набор правил» для фильма. Четко определить, что допустимо с точки зрения законов физики и уровня развития технологий во времена, когда происходит действие фильма, а что нет. Если правила не очевидны, зритель вправе ждать, что героя внезапно спасет какое-нибудь чудо, и грамотно нагнетать напряжение не удастся.

Разумеется, нельзя говорить прямо: «Вот набор правил для этого фильма...» Правила нужно сообщать ненавязчиво и естественно. Крис в этом мастер — он доносит правила через диалоги персонажей. Когда вы будете пересматривать «Интерстеллар» (разве вы сможете от этого удержаться?), обратите внимание на те диалоги, что как бы незначай очерчивают правила.

Правила Кристофера Нолана о путешествиях во времени



Как выясняется (см. ниже), путешествия назад во времени подчиняются законам квантовой гравитации, которые нам практически неизвестны, поэтому мы, физики, точно не знаем, что здесь допустимо, а что нет. Крис принял два решения относительно путешествий во времени; это и есть его набор правил:

**Правило-1.** Физические объекты и поля с тремя пространственными измерениями, такие как люди и лучи света, не могут перемещаться назад во времени из одного места нашей браны в другое, и то же касается информации, которую они переносят. Это недопустимо с точки зрения законов физики или действительного искривления пространства — времени — независимо от того, привязаны ли объекты к нашей бране или путешествуют в трехмерной грани тессеракта через балк с одного места нашей браны в другое. Так, в частности, Купер не может переместиться в собственное прошлое.

**Правило-2.** Силы гравитации способны передавать сообщения в прошлое нашей браны.

Правило 1 добавляет фильму драматичности. Пока Купер задерживается возле Гаргантюа, Мёрф становится все старше и старше. Поскольку возможности вернуться назад во времени нет, нарастает угроза, что Купер никогда уже не встретится с Мёрф.

Правило 2 дает Куперу надежду, что с помощью гравитации он сможет передать квантовые данные назад во времени — передать юной Мёрф, чтобы она решила уравнение профессора и эвакуировала человечество с Земли.

Как обыгрываются это правила в «Интерстеллар»?

Сообщения для Мёрф



В тессеракте Купер действительно путешествует назад относительно времени нашей браны: из времени, в котором Мёрф уже старая женщина, во время, когда ей всего десять лет. Он делает это в том смысле, что, глядя на одну из спален в тессеракте, видит Мёрф десятилетней. Также он может передвигаться вперед и назад относительно времени нашей браны (времени в спальне) — в том смысле, что он может наблюдать Мёрф в различные моменты времени в ее спальне, выбирая, в какую из спален заглянуть. Это не противоречит правилу 1, поскольку Купер не возвращается в нашу брану. Он остается снаружи ее, в трехмерной грани тессеракта, и видит Мёрф благодаря лучам света, которые движутся вперед во времени, от Мёрф к нему.

Но так же как он не может вернуться в нашу брану во времена десятилетней Мёрф, Купер не может посылать Мёрф лучи света — это нарушило бы правило 1. Свет может принести ей информацию из личного настоящего Купера, которое для нее является будущим, — информацию из времени, когда она уже старая женщина, информацию, которая в таком случае будет передана назад во времени из одного места нашей браны в другое. Поэтому между десятилетней Мёрф и Купером в тессеракте должен быть своего рода односторонний пространственно-временной барьер, подобный зеркалу Гезелла<sup>94</sup> или горизонту событий черной дыры: свет может идти от Мёрф к Куперу, но не от Купера к Мёрф.

В Кип-версии природа этого барьера проста: Купер в тессеракте всегда находится в будущем десятилетней Мёрф. Свет может путешествовать из прошлого в будущее, от Мёрф к нему, и не может путешествовать из будущего в прошлое, от него к Мёрф.

Однако Купер выясняет, что гравитация способна преодолеть этот односторонний барьер. Гравитационные сигналы могут путешествовать назад во времени, от Купера к Мёрф. Сначала мы видим, как Купер в отчаянии выталкивает книги с полки в спальне: см. рис. 30.1.

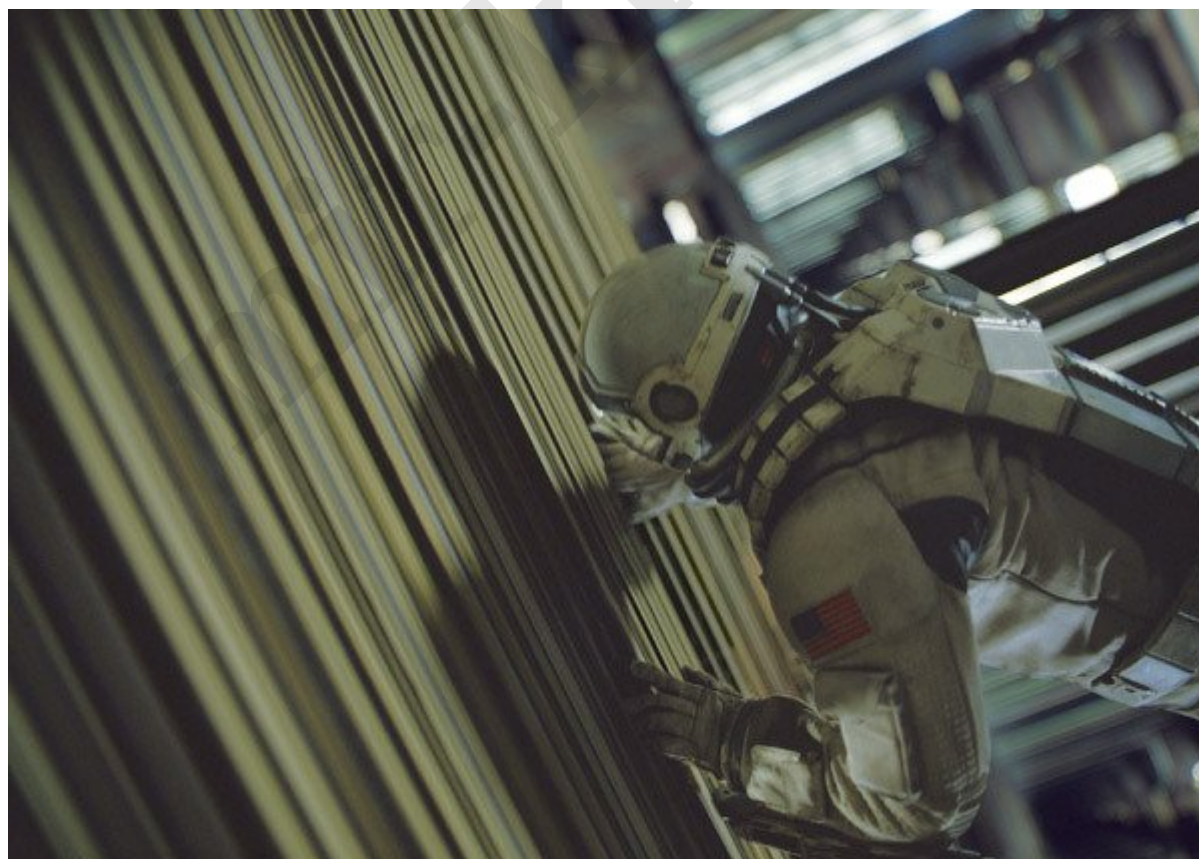


Рис. 30.1. Купер толкает мировую трубку книги (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения

«Уорнер Бразерс».)

Чтобы объяснить этот эпизод, нужно рассказать еще немного о стержнях спален, как описали мне их Крис и Пол. Давайте остановимся на ближнем синеватом стержне (рис. 29.10 и 29.12), который я воспроизвел, опустив лишние подробности, на рис. 30.2. Вспомните, что этот стержень — это набор вертикальных сечений спальни Мёрф, движущихся вперед во времени спальни по синей стрелке (направо).

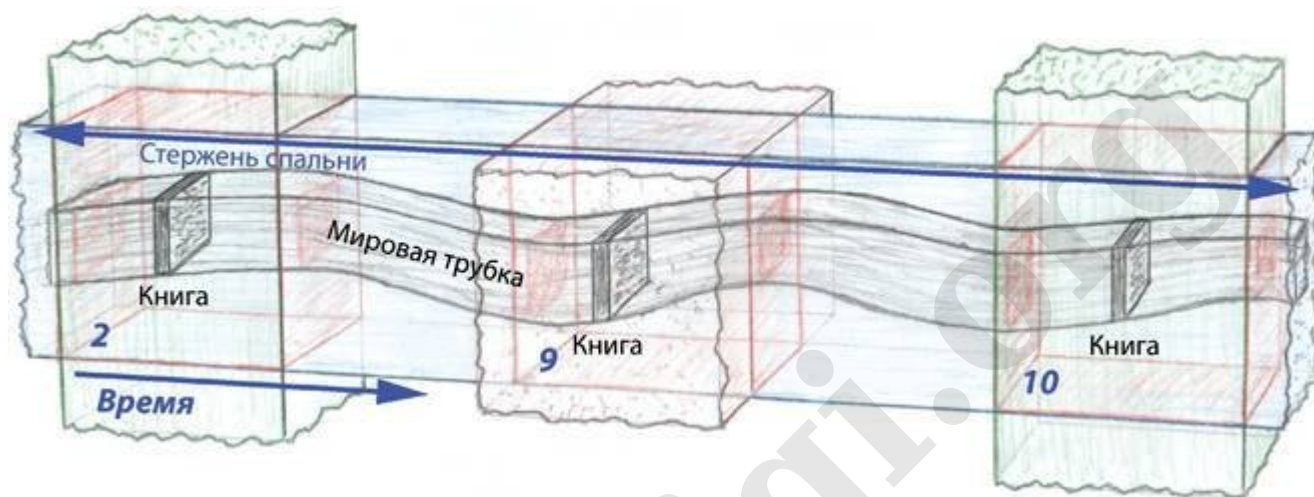


Рис. 30.2. Мировая трубка книги в стержне спальни Мёрф. Книга и мировая трубка на рисунке гораздо больше, чем должны быть в действительности (Мой набросок от руки.)

Каждый объект в комнате, например книга, — составляющая этого стержня. В сущности, у книги есть собственный стержень,двигающийся вперед во времени по синей стрелке — как составная часть стержня целой комнаты. На сленге физиков такой стержень называется мировой трубкой книги. А стержень каждой частицы вещества книги физики называют мировой линией этой частицы. Посему мировая трубка книги — это пучок мировых линий всех частиц, из которых книга состоит. Крис и Пол тоже взяли на вооружение эту терминологию. Тонкие линии, которые в фильме идут вдоль стержней, — это мировые линии частиц вещества в спальне Мёрф.

На рис. 30.1 Купер снова и снова бьет кулаком по мировой трубке книги, порождая гравитационную силу, которая путешествует назад во времени, к тому моменту в спальне Мёрф, который Купер видит перед собой, и именно в тот момент гравитация толкает мировую трубку. В результате мировая трубка сдвигается — Купер воспринимает это движение как мгновенный отклик на свои действия. Движение становится волной, которая распространяется влево и вниз по трубке (рис. 30.2)<sup>95</sup>. Когда это движение достигает достаточной силы, книга падает с полки.

Когда Купер получает от ТАРСа квантовые данные, он уже осваивает новый способ передачи сообщений. Мы видим, как он сдвигает пальцем мировую трубку секундной стрелки часов. Эти движения порождают в прошлом гравитационную силу, которая заставляет стрелку часов подрагивать, передавая квантовые данные азбукой Морзе. Тессеракт сохраняет характер движений стрелки в балке, так что они повторяются снова и снова. Когда сорокалетняя Мёрф возвращается в свою спальню через три десятка лет, она видит, что секундная стрелка все еще вздрагивает, снова и снова воспроизводя закодированные квантовые данные, которые Купер с таким трудом ей передал.

Как действует эта «гравитация в прошлое»? Я дам свою интерпретацию после того, как расскажу, что я знаю (или думаю, что знаю) о путешествиях назад во времени.

Путешествие во времени без балка: что я об этом (кажется) знаю



В 1987 году я с подачи Карла Сагана (см. главу 14) понял кое-что потрясающее о червоточинах. Если законы физики допускают существование червоточин, тогда теория относительности допускает их преобразование в машины времени. Отличный пример этого был открыт год спустя моим близким другом Игорем Новиковым из Москвы. Пример Игоря (рис. 30.3) показывает, что червоточина может превратиться в машину времени естественным путем, без помощи разумных существ.



Рис. 30.3. Червоточина как машина времени

На рис. 30.3 нижнее устье червоточины находится на орбите вокруг черной дыры, а верхнее — вдалеке от нее.

Поскольку черная дыра обладает сильным гравитационным притяжением, эйнштейновский закон искривления времени утверждает, что у нижнего устья червоточины время течет медленнее, чем у верхнего. Медленнее — относительно пути интенсивного гравитационного притяжения, который проходит через внешнюю Вселенную (фиолетовый пунктир). Будем считать, что это дало отставание в один час, то есть если сравнить показания часов во внешней Вселенной, то часы у нижнего устья будут показывать на час меньше, чем часы у верхнего. И дальше это отставание будет расти.

Поскольку внутри червоточины гравитационное притяжение крайне невелико, то, согласно эйнштейновскому закону искривления, время в верхнем устье червоточины течет с той же скоростью, что и в нижнем. Поэтому если сравнивать показания часов для пути сквозь червоточину, отставания не будет — часы будут синхронизированы.

Предположим, расстояние от устья до устья во внешней Вселенной мало настолько, что вы можете пройти его за пять минут по показаниям часов, ну а путь сквозь червоточину займет у вас минуту. В таком случае червоточина уже является машиной времени: вы покидаете

верхнее устье по показаниям верхних часов в 2:00 и через внешнюю Вселенную движетесь к нижнему устью, прибыв туда в 2:05 по верхним часам и в 1:05 по нижним. Затем вы за одну минуту добираетесь по червоточине от нижнего ее устья до верхнего. Поскольку относительно пути сквозь червоточину часы сверху и снизу синхронизированы, вы прибудете к верхнему устью в 1:06 по показаниям и тех и других часов. Вы оказались в начальной точке своего путешествия на 54 минуты раньше своего же отбытия в 2:00 и встретили младшую версию самого себя.

Ранее, когда разница по времени между устьями была гораздо меньше, червоточина еще не была машиной времени. Но она стала ею в тот момент, когда нечто, двигаясь с максимальной возможной скоростью — скоростью света, — смогло пройти ваш путь и вернуться назад к верхнему устью точно в момент своего отправления.

Если это нечто — квант света (фотон), то выходит, что мы начали с одного фотона, а теперь в начальном месте и в начальное время их уже два. После того как эти два фотона пройдут тот же путь, мы получим в том же месте и в то же время уже четыре фотона, затем восемь, затем шестнадцать!.. Сквозь червоточину течет крещендо энергии, и, возможно, гравитация этой энергии уничтожит червоточину в тот самый момент, когда она станет машиной времени.

Казалось бы, это несложно предотвратить, просто оградив червоточину от фотонов. Однако кое от чего отгородиться не выйдет — от сверхвысокочастотных квантовых флуктуаций света, флуктуаций, которые неизбежно существуют, согласно законам квантовой физики (см. главу 26). В 1990 году Сунг Вон Ким (постдокторант из моей исследовательской группы) и я использовали законы квантовой физики, чтобы рассчитать, во что выльются эти флуктуации. Результатом оказался нарастающий взрыв (рис. 30.4). Сначала мы подумали, что силы такого взрыва недостаточно, чтобы уничтожить червоточину, и она станет машиной времени, несмотря на взрыв. Стивен Хокинг настаивал на обратном. Исход взрыва, сказал он, подчиняется законам квантовой гравитации. Только когда эти законы будут изучены, мы узнаем наверняка, возможны ли путешествия назад во времени.

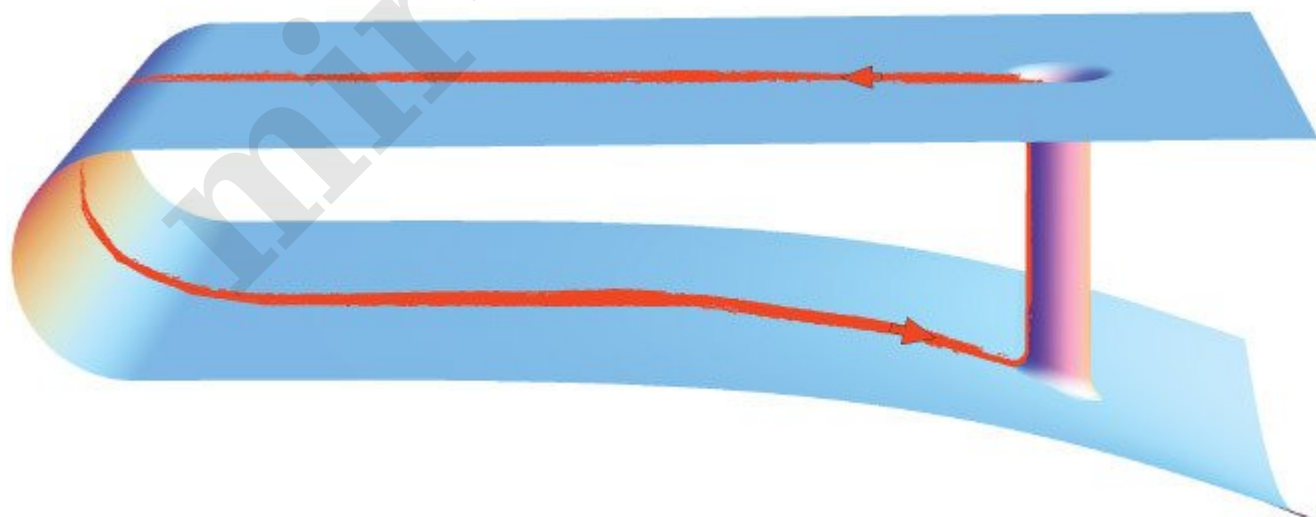


Рис. 30.4. Квантовые флуктуации света, путешествуя по красному пути, нарастают, приводя к взрыву в тот момент, когда червоточина становится машиной времени

Стивен, однако, был настолько уверен, что недопустимость машины времени в конце концов будет доказана, что сформулировал «гипотезу защиты хронологии». Она гласит, что законы физики всегда будут препятствовать путешествию назад во времени, «оставляя Вселенную

безопасной территорией для историков».

Многие исследователи в течение последних двадцати лет старались найти доказательство или опровержение этой гипотезы Хокинга. Итог, на мой взгляд, остается тем же, что и в начале девяностых, когда мы со Стивеном обсуждали этот вопрос: нас рассудят только законы квантовой гравитации.

## Путешествие во времени через балк



Все эти исследования и выводы — обоснованные предположения — базируются на законах физики, которые преобладают вне балка с «большим» (то есть несвернутым) пятым измерением. Что же будет с путешествиями во времени, если принять существование «большого» балка, как в «Интерстеллар»?

Нам, физикам, законы теории относительности кажутся столь универсальными, что мы предполагаем, что они справедливы для балка не меньше, чем для нашей браны. Поэтому Лиза Рэндалл, Раман СанDRAM и другие распространили законы Эйнштейна на балк нехитрым способом — добавив пространству одно измерение. Математически такое расширение выглядит просто и изящно, будто намекая, что физики на верном пути. В Кип-версии такое расширение служит исходным пунктом в вычислениях профессора Брэнда и в его попытках разобраться с гравитационными аномалиями (см. главу 25).

Если такое умозрительное расширение корректно, тогда в балке время ведет себя в целом так же, как и в нашей бране. В частности, объекты и сигналы в балке, так же как и в бране, могут двигаться в локально замеренном времени (локальном времени балка) лишь в одном направлении — от прошлого к будущему. Они не могут двигаться во времени назад, оставаясь в тех же пространственных координатах. Если в балке путешествие назад во времени допустимо, этого можно достичь, лишь перемещаясь в пространстве балка и вернувшись до начала путешествия, но при этом всегда двигаясь вперед в локальном времени балка. Это аналог путешествия туда-обратно на рис. 30.3 для балка.

## Сообщения для Мёрф: интерпретация физика



Такое понимание времени лежит в основе Кип-интерпретации для передачи сообщений от Купера к Мёрф.

Вспомните, что тессеракт — это объект, грани которого обладают тремя пространственными измерениями, а его внутренняя часть — четырьмя. Эта внутренняя часть относится к балку. Все, что мы видим в сценах с тессерактом, происходит в его гранях: Купер, Мёрф, спальня Мёрф, стержни спальни, мировые трубки книг и часов — все это располагается в гранях тессеракта. Нам не показывают внутреннюю часть тессеракта, да мы и не сможем ее увидеть, поскольку свет распространяется лишь в трех измерениях, а не в четырех. Однако четвертое измерение доступно гравитации.

В Кип-версии, когда Купер видит книгу в спальне Мёрф, это происходит благодаря лучам света, которые путешествуют по граням тессеракта (например, красный пунктирный луч на

рис. 30.5). А когда Купер сдвигает мировую трубку книги или мировую трубку секундной стрелки, он порождает гравитационный сигнал (гравитационную волну в балке), которая по спирали уходит во внутреннюю, принадлежащую балку часть тессеракта (фиолетовая кривая на рис. 30.5). Сигнал распространяется вперед в локальном времени балка, но назад относительно времени спальни, прибывая раньше своего отправления<sup>96</sup>. Этот сигнал и выталкивает книгу с полки или двигает секундную стрелку часов.

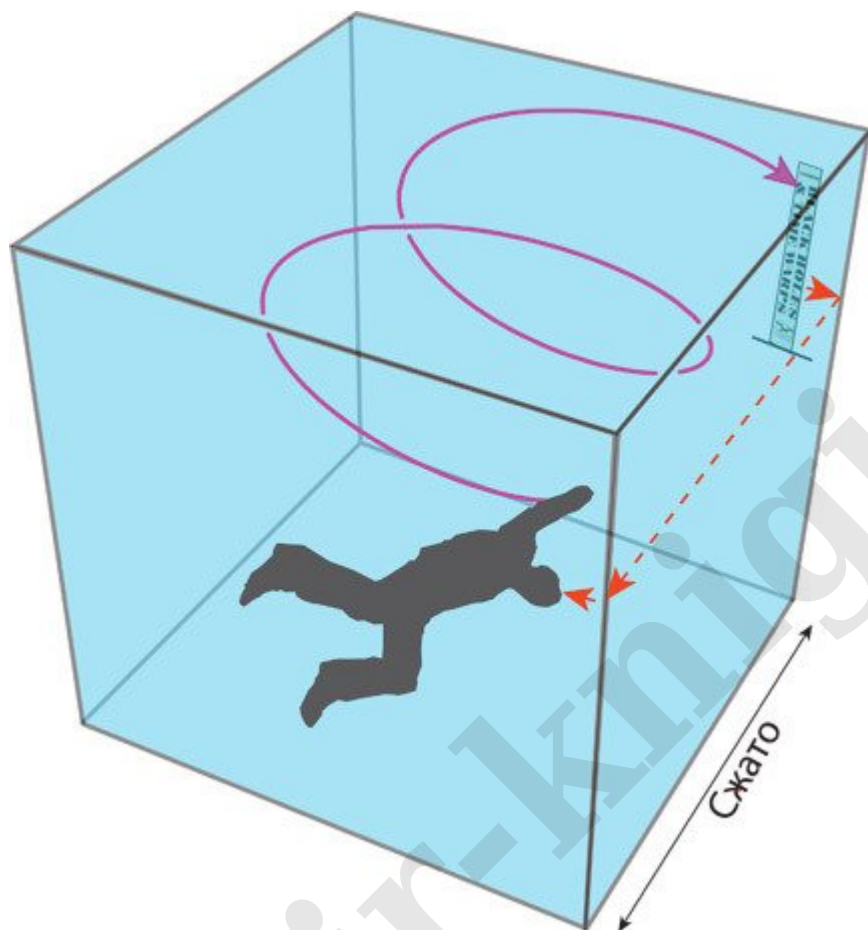


Рис. 30.5. Купер видит книгу, в частности, благодаря лучу света (красный пунктир) и воздействует на книгу с помощью гравитационного сигнала, который распространяется вдоль фиолетовой кривой. Одно из пространственных измерений браны здесь опущено

Это напоминает одну из моих любимых картин Эшера «Водопад» (рис. 30.6). Направление вниз на картине соответствует течению вперед времени в спальне, а текущая по акведуку вода соответствует течению вперед локального времени балка. Если на воду упадет листик, он будет двигаться по течению так же, как сигналы в балке распространяются вперед в локальном времени.

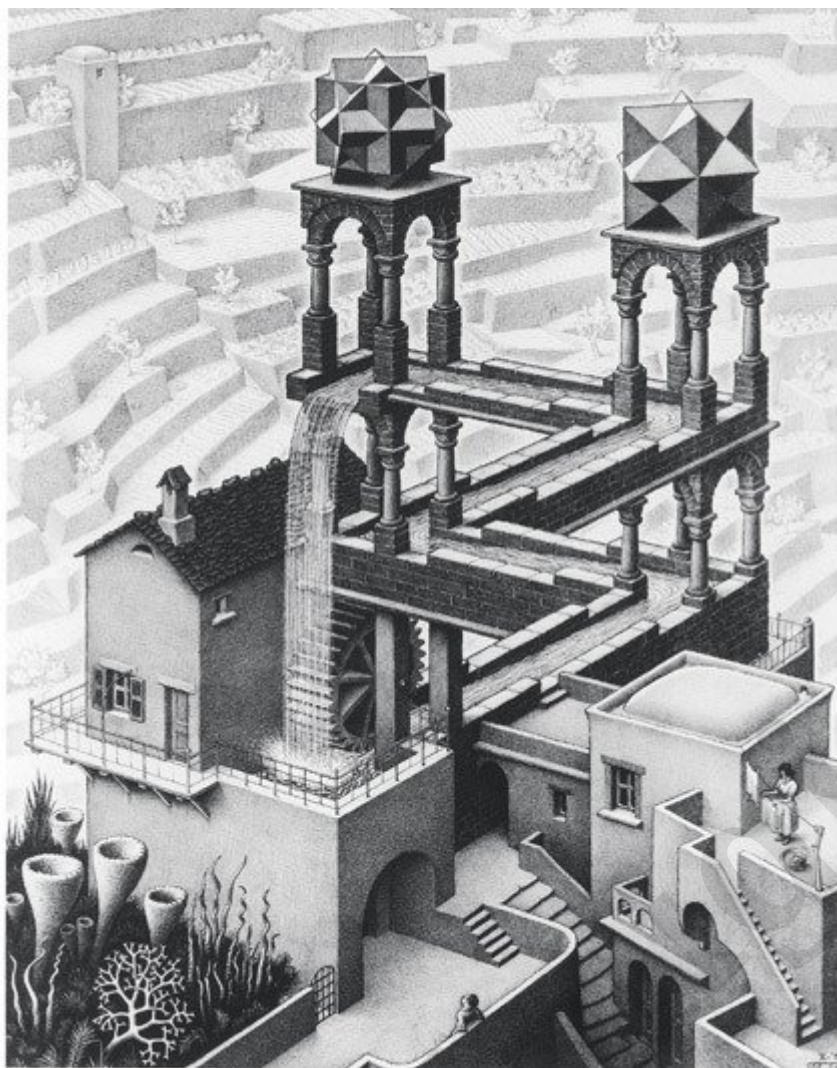


Рис. 30.6. Водопад (Литография Маурица Эшера.)

Когда листик станет двигаться вниз по водопаду, он будет похож на луч света, идущий от книги к Куперу, — он движется не только вперед в локальном времени, но и вниз (вперед во времени спальни). Листик, влекомый течением по акведуку, похож на гравитационный сигнал, идущий от Купера к книге: он движется вперед в локальном времени, но также вверх<sup>97</sup> (то есть назад относительно времени спальни).

Как я в этой интерпретации объясняю слова Амелии Брэнд о времени, каким его видят сущности из балка? «Возможно, для Них время — просто еще одно физическое измерение. Для Них прошлое может быть каньоном, куда они могут спуститься, а будущее — горой, на которую можно взобраться».

Законы теории относительности, распространенные на балк, говорят нам, что локальное время так себя вести не может. Ничто в балке не способно вернуться назад в локальном времени балка. Однако время спальни, которую наблюдает из балка Купер (и, по-видимому, пятимерные сущности), вполне соответствует описанию Брэнд. Если смотреть из балка, то время нашей браны выглядит как «просто еще одно физическое измерение». Прошлое нашей браны — «каньон», куда Купер может «спуститься» (двигаясь вниз по диагональному проходу тессеракта), а будущее нашей браны — «гора», на которую Купер может «взобраться» (двигаясь вверх по диагональному проходу тессеракта); см. рис. 29.14.

Это моя интерпретация слов Брэнд. И Крис понимает их так же.



В «Интерстеллар», когда квантовые данные уже переданы Мёрф, миссия Купера завершена. Тессеракт, перенося его через балк, начинает закрываться.

Пока он закрывается, Купер видит червоточину. А в червоточине он видит «Эндюранс» во время путешествия к Гаргантюа. Пронесясь мимо «Эндюранс», Купер протягивает руку и с помощью гравитации, через четырехмерное пространство прикасается к Амелии Брэнд. Она думает, что к ней прикоснулась сущность из балка. Так и есть... Сущность, путешествующая через балк в тессеракте, который стремительно закрывается. Многое переживший Купер из будущего.



#### Эвакуация колоний с Земли



В начале фильма, когда Купер впервые оказывается на секретном объекте NASA, ему показывают гигантскую цилиндрическую станцию, построенную, чтобы доставить тысячи людей в космос и стать домом для многих поколений: космическую колонию. Ему сообщают, что похожие корабли строятся и в других местах.

«Как вы запустите ее с Земли?» — спрашивает Купер профессора. «Те первые гравитационные аномалии изменили все, — отвечает профессор. — Мы вдруг поняли, что гравитацию возможно укротить. Тогда я начал разрабатывать теорию — и мы приступили к постройке этой станции».

В конце фильма мы видим, как повседневная жизнь вернулась на круги своя — внутри космического корабля-колонии (рис. 31.1).



Рис. 31.1. Купер видит из окна, как дети играют в бейсбол внутри космической колонии (Кадр из «Интерстеллар», с разрешения «Уорнер Бразерс».)

Как эту станцию запустили в космос? Ключевым элементом здесь, разумеется, являются квантовые данные (в Кип-версии — законы квантовой гравитации), которые ТАРС извлек из сингулярности Гаргантюа (см. главу 26 и главу 28), а Купер передал Мёрф (см. главу 30).

В Кип-версии Мёрф, исключив из этих законов квантовые флуктуации (см. главу 26), узнала неклассические законы, которым подчиняются гравитационные аномалии. А с помощью этих законов она разобралась, как аномалиями управлять.

Я как физик хотел бы узнать об этом подробнее. Был ли профессор Брэнд на верном пути, когда работал с уравнениями на досках в кабинете (см. главу 25 и сайт этой книги в интернете: [Interstellar.withgoogle.com](http://Interstellar.withgoogle.com))? Действительно ли у него была половина ответа, как утверждала Мёрф, прежде чем получила квантовые данные? Или профессор заблуждался? Быть может, тайна аномалий и управление гравитацией — это совершенно разные вещи?

Возможно, на эти вопросы ответит продолжение фильма. Кристофер Нолан мастер сиквелов — посмотрите его трилогию о Бэтмене.

Одно представляется очевидным: Мёрф, должно быть, разобралась, как уменьшить ньютоновскую гравитационную постоянную  $G$  внутри Земли. Вспомните (см. главу 25), что гравитационное притяжение Земли определяется законом обратных квадратов Ньютона:  $g = Gm/r^2$ , где  $r^2$  — квадрат расстояния до центра Земли,  $m$  — масса Земли, а  $G$  — гравитационная постоянная Ньютона. Уменьшите  $G$  вдвое, и притяжение Земли станет в два раза слабее. Уменьшите  $G$  в тысячу раз, и в тысячу раз уменьшится земное притяжение.

В Кип-версии, если ньютоновская  $G$  внутри Земли станет в тысячу раз меньше своего нормального значения — пусть всего на один час, — то ракетные двигатели смогут вывести в

космос огромные колонии.

Побочным эффектом в Кип-версии явится то, что земное ядро, освобожденное от тяжелого гнета верхних слоев, расширится, вздыбливая поверхность Земли. Пока колонии будут подниматься в космос, повсюду пройдут мощнейшие землетрясения и цунами, сея на планете хаос, — ужасная цена для Земли, которая и без того измучена катастрофами, связанными с болезнью растений. Когда же ньютоновская  $G$  вернется к прежнему значению, Земля сожмется до своего обычного размера, что вызовет новые землетрясения и цунами.

Однако человечество спасено, а Купер и 95-летняя Мёрф воссоединяются. А затем Купер отправляется на задворки Вселенной, чтобы найти Амелию Брэнд.

Некоторые мысли на прощание



Каждый раз, пересматривая «Интерстеллар» или пролистывая рукопись этой книги, я поражаюсь огромному разнообразию и красоте научных концепций, которые в них содержатся.

И больше всего волнует меня оптимистичный посыл, заложенный в «Интерстеллар». Мы живем во Вселенной, которой управляют законы физики. Законы, которые мы можем открывать, осмыслять, осваивать и использовать, чтобы управлять своей судьбой. Даже без помощи сущностей из балка мы, люди, можем справиться с любой катастрофой, которую устроит нам Вселенная, и даже с катастрофами, которые мы устраиваем себе сами, — от перемены климата до биологических и ядерных катастроф.

Но для того чтобы человечество могло управлять собственной судьбой, люди — большой их процент — должны понимать и ценить науку. Понимать, как она работает. Какие знания о Вселенной, Земле и жизни она нам несет. Чего можно с ее помощью добиться. Как ограничены ее возможности, связанные с нехваткой знаний или несовершенством технологий, и как преодолевать эти ограничения. Как двигаться от домыслов к обоснованным предположениям, а от них — к истине. Как невероятно редки революции, изменяющие наши понятия об истине, и насколько они из-за этого важны.

Я надеюсь, что эта книга поспособствует такому пониманию.

ГДЕ УЗНАТЬ БОЛЬШЕ?

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

Читателям, которые интересуются культурой Голливуда и зыбучими песками кинобизнеса, я крайне рекомендую две книги Линды Обст: *Hello, He Lied: & Other Truths from the Hollywood Trenches* [Obst 1996], а также *Sleepless in Hollywood: Tales from the New Abnormal in the Movie Business* [Obst 2013].

Глава 2. Вкратце о Вселенной

Обзорная информация о нашей Вселенной, со множеством иллюстраций и сведений об объектах, которые можно разглядеть на ночном небе невооруженным глазом, с помощью

бинокля и через телескоп: Universe: The Definitive Visual Guide [Rees 2005]. Много хороших книг написано о том, что происходило в ранний период существования Вселенной, о Большом взрыве и его возможных причинах. Я особенно рекомендую The Inflationary Universe [Guth 1997]; Big Bang: The Origin of the Universe [Singh 2004]; Many Worlds in One: The Search for Other Universes [Vilenkin 2006]; The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos [Barrow 2011]; а также главы 3, 14 и 16 из From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time [Carroll 2011]. По поводу актуальных исследований феномена Большого взрыва см. блог Шона Кэрролла Preposterous Universe [Carroll 2014] по адресу [preposterousuniverse.com/blog/](http://preposterousuniverse.com/blog/).

### Глава 3. Законы, управляющие Вселенной

Ричард Фейнман, один из величайших физиков XX столетия, в 1964 году провел цикл публичных лекций, где подробно рассмотрел природу законов, управляющих нашей Вселенной. Эти лекции вошли в одну из моих любимейших книг: «Характер физических законов» [Фейнман 2011]. Более подробная, более современная и гораздо более объемная книга на эту тему: «Ткань космоса: пространство, время и текстура реальности» [Грин 2015]. Более легкая и занимательная, но не менее глубокая книга: «Высший замысел» [Хокинг, Млодинов 2012].

### Глава 4. Искривления пространства и времени, приливная гравитация

Об истории эйнштейновских концепций искривления времени и пространства и их связи с приливной гравитацией и законами теории относительности можно прочитать в первых двух главах моей книги «Черные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна» [Торн 2009]. Описания экспериментов, подтверждающих правоту Эйнштейна, см. в книге Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test [Will 1993]. Биография Эйнштейна, подробно повествующая о его вкладе в науку (эта книга гораздо сложнее, чем две предыдущие): «Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна» [Пайс 1989]. Есть и другие, более обширные биографии Эйнштейна, особенно мне нравится книга Einstein: His Life and Universe [Isaacson 2007]. Однако ни в одной из них научные изыскания Эйнштейна не описаны столь точно и обстоятельно, как в книге Пайса.

Подробно о гравитации (как ньютоновской, так и эйнштейновской) и ее роли в нашей Вселенной рассказывается в научно-популярной книге Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity [Schutz 2003]. Сведения о том же, но на более глубоком научном уровне см. в книгах Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity [Hartle 2003] и A First Course in General Relativity [Schutz 2009].

### Глава 5. Черные дыры

Больше о черных дырах и о том, как мы узнали о них то, что, как нам кажется, мы знаем: «Черные дыры и складки времени» [Торн 2009], Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe [Begelman, Rees 2009], а также лекция, которую я прочитал в 2012 году на вечере в честь семидесятилетия Стивена Хокинга: [ctc.cam.ac.uk/hawking70/multimedia\\_kt.html](http://ctc.cam.ac.uk/hawking70/multimedia_kt.html). Андреа Гез об удивительных открытиях ее научной группы по поводу черной дыры в центре Млечного Пути: [ted.com/speakers/andrea\\_ghez](http://ted.com/speakers/andrea_ghez) и [galacticcenter.astro.ucla.edu](http://galacticcenter.astro.ucla.edu).

### Глава 6. Анатомия Гаргантюа

Об описанных в этой главе свойствах черных дыр см. главу 7 книги «Черные дыры и складки

времени» [Торн 2009], а на более сложном уровне, с уравнениями — Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity [Hartle 2003]. Также см. приложение «Некоторые технические примечания» в этой книге. Об огненной оболочке и орбитах заключенных в ней фотонов см. технический документ Эдварда Тео [Тео 2003].

## Глава 7. Гравитационные пращи

О гравитационных пращах на более сложном уровне, чем в этой книге, см. статью в «Википедии» [en.wikipedia.org/wiki/Gravity\\_assist](http://en.wikipedia.org/wiki/Gravity_assist), однако не верьте тому, что там говорится о пращах вокруг черных дыр: утверждение (по состоянию на 4 июля 2014 года): «Если космолет приближается к радиусу Шварцшильда [горизонту. — К. Т.] черной дыры, пространство становится настолько искривлено, что уход с орбиты гравитационной пращи потребует больше энергии, чем можно получить от черной дыры» — в корне неверно. Статьи из «Википедии» всегда стоит читать с некоторой долей скептицизма: по моим оценкам, около 10 процентов утверждений из «Википедии», относящихся к областям знаний, в которых специализируюсь я, неверны или вводят в заблуждение.

Более надежная, чем в «Википедии», но менее полная информация о гравитационных пращах: [www2.jpl.nasa.gov/basics/grav/primer.php](http://www2.jpl.nasa.gov/basics/grav/primer.php). Компьютерная игра по мотивам «Интерстеллар» на тему гравитационных маневров: [Game.InterstellarMovie.com](http://Game.InterstellarMovie.com).

В меру сложно о черных дырах средней массы, которые в Кип-версии требуются для гравитационных пращей, написано в главе 4 книги Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm [Meier 2012].

Программа Дэвида Сароффа для генерации и исследования сложных орбит вокруг быстровращающихся черных дыр (как на рис. 7.6): [demonstrations.wolfram.com/3DKerrBlackHoleOrbits](http://demonstrations.wolfram.com/3DKerrBlackHoleOrbits).

## Глава 8. Внешний вид Гаргантюа

Многие физики моделировали гравитационное линзирование звездного поля черными дырами, как это делалось для «Интерстеллар»; информацию об этом можно найти в интернете. Особенно впечатляют работы Алена Риасуэло, см.: [www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar](http://www2.iap.fr/users/riazuelo/interstellar). Также см. примечания к главе 28 ниже.

Мы с командой Пола Франклина планируем написать несколько научных статей о моделировании, выполненном с помощью моих уравнений для создания изображений Гаргантюа, ее диска и червоточины, а также о некоторых дополнительных расчетах, показавших любопытные результаты. Эти статьи можно будет найти по адресу: [arxiv.org/find/gr-qc](http://arxiv.org/find/gr-qc).

## Глава 9. Диски и джеты

Подробная информация о квазарах, аккреционных дисках и джетах: Gravity's Fatal Attraction [Begelman, Rees 2009], глава 9 в книге «Черные дыры и складки времени» [Торн 2009], а также (более сложный текст) Black Hole Astrophysics [Meier 2012]. О приливном разрушении звезд черными дырами и о формировании аккреционных дисков см. сайт Джеймса Гиллокона (результаты моделирования, выполненного им и его коллегами, использованы для рис. 9.5 и 9.6): [astrocrash.net/projects/tidal-disruption-of-stars/](http://astrocrash.net/projects/tidal-disruption-of-stars/). Из реалистичных (с точки зрения

астрофизики) видеороликов об аккреционных дисках и джетах я рекомендую работы Ральфа Келера (Стэнфордский университет), которые основаны на моделированиях Джонатана Маккини, Александра Чеховского и Роджера Блэндфорда [McKinney, Tchekhovskoy, Blandford 2012]: [slac.stanford.edu/~kaehler/homepage/visualizations/black-holes.html](http://slac.stanford.edu/~kaehler/homepage/visualizations/black-holes.html). Изображения аккреционного диска с эффектом Доплера и с гравитационным линзированием см. на сайте астрофизика Эвери Бродерика: [science.uwaterloo.ca/~abroderi/Press/](http://science.uwaterloo.ca/~abroderi/Press/). О моделировании, благодаря которому в «Интерстеллар» изображен аккреционный диск (например, рис. 9.9), будет рассказано в одной или нескольких статьях, которые появятся на [arxiv.org/find/gr-qc](http://arxiv.org/find/gr-qc).

## Глава 10. Случай — краеугольный камень эволюции

Мне не встречалась информация нетехнического плана о результатах моделирования, которые показывают увеличение (а не уменьшение) звездной плотности вблизи массивной черной дыры. Технические рассуждения и анализ см. в главе 7 книги *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei* [Merritt 2013], особенно рис. 7.4.

## Глава 11. Болезнь растений

Если вы смотрите новости науки по телевизору или просто интересуетесь окружающим миром, вам известны примеры сценариев, описанных в этой главе моими коллегами-биологами — к счастью, примеры небольших масштабов, а не глобальные катастрофы. Недавний случай: вирус, убивающий растения, переметнулся на пчел, [blogs.scientificamerican.com/artful-amoeba/2014/01/31/suspicious-virus-makes-rare-cross-kingdom-leap-from-plants-to-honeybees](http://blogs.scientificamerican.com/artful-amoeba/2014/01/31/suspicious-virus-makes-rare-cross-kingdom-leap-from-plants-to-honeybees). Это впечатляет куда больше, чем переход заболевания от окры к кукурузе, как это происходит в «Интерстеллар», хоть в случае с пчелами патоген и гораздо менее летален. Еще пример — стремительное вымирание некоторых видов деревьев в Америке. Это не только американский каштан, о котором говорил в главе 11 Мееровиц, но и американский вяз ([andscaping.about.com/cs/treesshrubs/a/american\\_elms.htm](http://andscaping.about.com/cs/treesshrubs/a/american_elms.htm)), а также ели рядом с моей хижинкой на горе Паломар, недалеко от 200-дюймового телескопа.

## Глава 12. Задыхаясь без кислорода

Круговорот кислорода между пригодными для дыхания молекулами  $O_2$ , диоксидом углерода  $CO_2$ , а также другими соединениями кислорода (менее высокими темпами) называется «кислородным циклом» Земли. Круговорот углерода между атмосферным  $CO_2$ , растениями (мертвыми и живыми) и (гораздо медленнее) другими его формами, такими как уголь, нефть и керогены, называется «углеродным циклом». Очевидно, что эти циклы взаимосвязаны. Из-за проблем с этими циклами и возникает необходимость эвакуировать людей с Земли.

## Глава 13. Межзвездный перелет

Люди стремительно открывают всё новые и новые экзопланеты (планеты за пределами Солнечной системы). Ежедневно обновляемые каталоги можно посмотреть по адресам [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu) и [exoplanets.org](http://exoplanets.org). Каталог экзопланет, которые могут быть обитаемы: [phl.upr.edu/hec](http://phl.upr.edu/hec). О поиске экзопланет и жизни за пределами Солнечной системы см. *Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin* [Lemonick 2012] и *Five Billion Years of Solitude: The Search for Life Among the Stars* [Billings 2013]. Технические и научные подробности см. в *The Exoplanet Handbook* [Perryman 2011]. Замечательный рассказ о поиске внеземных цивилизаций (SETI) с помощью радиосигналов, а также другими способами: *Confessions of an Alien Hunter: A*

Scientist's Search for Extraterrestrial Intelligence [Shostak 2009].

О перспективных технологиях для межзвездных путешествий см. [en.wikipedia.org/wiki/Interstellar\\_travel](http://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar_travel) и [fourthmillenniumfoundation.org](http://fourthmillenniumfoundation.org). Астронавт Мэй Джемисон возглавляет проект, цель которого — выход человечества за пределы Солнечной системы в следующем столетии, см. [100yss.org](http://100yss.org). О межзвездных путешествиях посредством варп-двигателей и червоточин написано много чепухи. Технологии этого столетия, а скорее всего, и нескольких последующих не позволят добиться серьезных результатов на этом поприще, если только нам не поможет какая-нибудь сверхразвитая цивилизация, как это произошло в «Интерстеллар». Поэтому не стоит тратить время на чтение статей, утверждающих, что двигатели для межзвездных перелетов появятся уже при вашей жизни или даже при жизни ваших правнуков.

## Глава 14. Червоточины

Подробные сведения о червоточинах см. в книге Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking [Visser 1995], которую я крайне рекомендую, несмотря на ее почти двадцатилетнюю давность. Также советую последнюю главу книги «Черные дыры и складки времени» [Торн 2009], главу 9 из Time Travel and Warp Drives [Everett, Roman 2012] и главу 8 из Black Holes, Wormholes, and Time Machines [Al-Khalili 2012]. Актуальные сведения об экзотической материи, посредством которой можно удерживать червоточину открытой, см. в главе 11 из [Everett, Roman 2012].

## Глава 15. Внешний вид червоточины в «Интерстеллар»

Мы с командой Пола Франклина подробно расскажем о нашей работе над визуализацией червоточины в одной или нескольких статьях, которые планируем выложить по адресу [arxiv.org/find/gr-qc](http://arxiv.org/find/gr-qc).

## Глава 16. Обнаружение червоточины: гравитационные волны

Свежая информация о проекте ЛИГО и поиске гравитационных волн — на сайте научного коллектива ЛИГО [ligo.org](http://ligo.org) (в особенности см. разделы News и Magazine) и на сайте лаборатории ЛИГО [ligo.caltech.edu](http://ligo.caltech.edu); также см. фильм Кая Стаатса 2014 года: [space.com/25489-ligo-a-passion-for-understanding-complete-film.html](http://space.com/25489-ligo-a-passion-for-understanding-complete-film.html). В интернете можно найти мои лекции о гравитационных волнах и искривленной стороне Вселенной, например три лекции по адресу [multimedia.ethz.ch/speakers/pauli/2011](http://multimedia.ethz.ch/speakers/pauli/2011), которые нужно просматривать не в том порядке, как они показаны на странице, а наоборот — от нижней лекции в списке к верхней. Также лекция среднего технического уровня: [youtube.com/watch?v=Lzrlr3b5aO8](http://youtube.com/watch?v=Lzrlr3b5aO8). Видеоролики о столкновении черных дыр и о порождаемых ими гравитационных волнах, основанные на моделировании команды SXS: [blackholes.org/explore2.html](http://blackholes.org/explore2.html).

Актуальных книг о гравитационных волнах нет, но я рекомендую книгу Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time [Bartusiak 2000], информация в которой не особенно устарела. Про историю исследования гравитационных волн, от Эйнштейна и далее, см. Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves [Kennefick 2007].

## Глава 17. Планета Миллер

В этой главе я делаю много утверждений о планете Миллер: ее орбите, ее вращении (она всегда обращена одной и той же стороной к Гаргантюа, если не считать раскачивания), о приливных силах Гаргантюа, которые деформируют планету и заставляют ее раскачиваться; о пространственном вихре Гаргантюа, действующем на планету, и о влиянии вихря на ее инерцию, центробежные силы и ограничение скорости до световой. Эти утверждения основаны на общей теории относительности Эйнштейна. Мне неизвестны другие книги или статьи для неспециалистов, где рассматриваются эти свойства планеты, вращающейся вокруг черной дыры. Читатели с образованием университетского уровня могут проверить мои утверждения, воспользовавшись концепциями и уравнениями из учебника *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* [Hartle 2003].

Вопросы, которые я поднимаю в параграфе «Прошлое планеты Миллер», не требуют особых познаний в теории относительности — на них можно ответить, пользуясь в основном законами Ньютона. Необходимую информацию можно найти в книгах и на сайтах по геофизике или физике планет и их спутников.

## Глава 18. Вибрации Гаргантюа

Об открытии Билла Пресса касательно вибрации черных дыр и о выведенных Саулом Теукольским уравнениях, описывающих эти вибрации, см. [Торн 2009. С. 293–297]. Также см. научную статью [Yang et al. 2013] о вибрациях черных дыр и их особенностях, отображенных на рис. 18.1 и в данных Ромилли.

## Глава 21. Четвертое и пятое измерения

Подробнее об унификации пространства и времени см. [Торн 2009]. О «суперструнной революции» Джона Шварца и Майкла Грина и о том, как физики приняли концепцию многомерного балка, см. «Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории» [Грин 2011].

## Глава 22. Сущности из балка

По «Флатландии» Эдвина Эбботта снят анимационный фильм «Плоский мир» (режиссер Лэдд Элинггер, 2007), получивший высокие оценки. Подробный рассказ о математических основах «Флатландии» и о связи сюжета романа с обычаями английского общества XIX века см. *The Annotated Flatland: A Romance of Many Dimensions* [Stewart 2002]. Относительно визуального представления четвертого измерения см. *The Visual Guide to Extra Dimensions, Volume 1: Visualizing the Fourth Dimension, Higher-Dimensional Polytopes, and Curved Hypersurfaces* [McMullen 2008].

## Глава 23. Ограничение гравитации

К этой главе я рекомендую книгу «Закрученные пассажи. Проникая в тайны скрытых размерностей пространства» [Рэндалл 2011]. Это исчерпывающий рассказ об идеях и прогнозах современных физиков относительно балка и его дополнительных измерений. Автор книги — Лиза Рэндалл, которая вместе с Раманом Сандрамом обнаружила, что AdS-искривление может удерживать гравитацию вблизи нашей браны (рис. 23.4 и 23.6). Заново открытая мной идея AdS-бутерброда была впервые предложена и рассмотрена в техническом документе [Gregory, Rubakov, Sibiryakov 2000], а о нестабильности AdS-бутерброда говорится в

техническом документе [Witten 2000].

## Глава 24. Гравитационные аномалии

Подробную историю об открытии аномальной прецессии Меркурия и о поисках планеты Вулкан можно узнать из трактата историка науки Н. Т. Роузвера «Перигелий Меркурия. От Леверье до Эйнштейна» [Роузвер 1985], а также из более простого для чтения, но менее полного отчета астрономов Ричарда Баума и Уильяма Шихана *In Search of Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe* [Baum, Sheehan 1997].

Что касается свидетельств существования темной материи в нашей Вселенной и поисков темной материи, рекомендую увлекательнейшую книгу Кэтрин Фриз (одного из ведущих исследователей в этой области) *The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter* [Freeze 2014].

Касательно аномального ускорения расширения Вселенной и темной энергии, которая предположительно является его причиной, рекомендую последнюю главу *The Cosmic Cocktail* [Freeze 2014], а также *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* [Panek, 2011].

## Глава 25. Уравнение профессора

Идеи об изменении ньютоновской гравитационной константы  $G$  в зависимости от места и времени, а также о том, что этими изменениями можно управлять с помощью некоего негравитационного поля, были очень популярны на физическом факультете Принстонского университета, когда я в начале шестидесятых учился там на доктора наук. Эта концепция была предложена профессором Робертом Г. Дикке и его учеником Карлом Брансом в соответствии с их «теорией гравитации Бранса — Дикке» (см. главу 8 *Was Einstein Right?* в [Will 1993]) — интересной альтернативой общей теории относительности. Эти идеи и эксперименты легли в основу моей интерпретации некоторых аномалий в «Интерстеллар» и способа управления ими: поля балка управляют величиной  $G$ , заставляя ее меняться.

Уравнение профессора, записанное на доске (рис. 25.6), также основано на этих идеях и на законах общей теории относительности, расширенных до пятого измерения балка (см. технический обзор Роя Маартенса и Коямы Казуи [Maartens, Kazuya 2010]). Кроме того, в уравнении использованы элементы вариационного исчисления (см. [ru.wikipedia.org/wiki/Вариационное\\_исчисление](http://ru.wikipedia.org/wiki/Вариационное_исчисление)). Подробности по поводу уравнения профессора см. в приложении «Некоторые технические примечания».

## Глава 26. Сингулярности и квантовая гравитация

Для первого знакомства с квантовыми флуктуациями и вообще квантовой физикой я рекомендую книгу *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics* [Davies, Brown 1986]. Я не знаю книг или статей для неспециалистов о квантовом поведении объектов человеческого масштаба, таких как зеркала ЛИГО; на техническом же уровне я рассказываю об этом во второй части третьей лекции (первой в списке) по адресу [multimedia.ethz.ch/speakers/pauli/2011](http://multimedia.ethz.ch/speakers/pauli/2011). Джон Уилер в автобиографии рассказывает, как он пришел к идее квантовой пены, — см. главу 11 в книге *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* [Wheeler, Ford 1998].

В главе 11 книги «Черные дыры и складки времени» [Торн 2009] я рассказываю, что нам

известно (по состоянию на 1994 год) о внутреннем строении черных дыр и как мы получили эти знания — в частности, о БХЛ-сингулярностях и их динамике, о квантовой гравитации применительно к сингулярности, о том, как все это связано с квантовой пеной, а также о падающей сингулярности (сингулярности инфляции массы), которую относительно недавно открыли Эрик Пуассон и Вернер Израэль [Poisson, Israel 1990] и которая до сих пор мало изучена. Вылетающая сингулярность была обнаружена настолько недавно, что об этом нет никаких материалов для неспециалистов; см. академическую статью Дональда Марольфа и Амоса Ори с описанием этого открытия [Marolf, Ori 2013]. Открытие Чоптюка о возможности существования крохотных, недолговечных голых сингулярностей описано в его статье [Choptuik, 1993].

## Глава 27. Кромка кратера

Вулканоподобную поверхность, о которой идет речь в этой главе (рис. 27.3, 27.5, 27.9), можно описать с помощью уравнений элементарной физики — равно как и траекторию «Эндюранс», ее нестабильность на кромке и запуск «Эндюранс» к планете: см. приложение «Некоторые технические примечания».

## Глава 28. Внутри Гаргантюа

В прологе книги «Черные дыры и складки времени» [Торн 2009] я значительно подробнее описываю, как бы выглядело и ощущалось падение сквозь горизонт событий — как для самого падающего, так и для наблюдателя, который находится снаружи черной дыры. Также я рассказываю, какое влияние на это оказывают масса и скорость вращения черной дыры.

Эндрю Гамильтон создал «симулятор полета в черную дыру», который рассчитывает изображение для падения в невращающуюся черную дыру. Эти расчеты похожи на те, что выполняла для «Интерстеллар» команда Пола Франклина (см. главу 8, главу 9 и главу 15), но они появились на много лет раньше «Интерстеллар». Эндрю использовал свой симулятор для создания замечательных видеороликов, которые можно найти на его сайте, [jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh](http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh), кроме того, их показывают в планетариях по всему миру (см. [spitzinc.com/-fulldome\\_shows/show\\_blackholes](http://spitzinc.com/-fulldome_shows/show_blackholes)).

Клипы Эндрю отличаются от графики в «Интерстеллар» несколькими моментами: во-первых, в учебных целях Эндрю порой изображает на горизонте черной дыры сетку из линий (такой сетки нет у настоящих черных дыр, нет ее и в «Интерстеллар»), а также заменяет звезду, которая коллапсировала с образованием черной дыры, «горизонтом прошлого»<sup>98</sup>. Во-вторых, в своем «путешествии в реалистичную черную дыру» ([jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh-realistic.html](http://jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh-realistic.html)) Эндрю наделяет дыру джетом и аккреционным диском. Газ из диска падает к горизонту и сквозь него, и этот падающий газ преобладает на изображениях того, что камера видит на горизонте и за ним. В «Интерстеллар» же, напротив, у черной дыры нет джета, а аккреционный диск столь слаб и тонок, что в фильме газ из него не падает к горизонту, и дыра изнутри выглядит довольно темной. Однако в «Интерстеллар» Купер во время падения встречается с тусклым светящимся туманом и с белыми хлопьями вещества, которое упало в дыру прежде него. Эти явления не относятся к результатам моделирования, их вручную добавила к изображению команда студии Double Negative.

## Глава 29. Тессеракт

Когда Кристофер Нолан сказал мне, что собирается ввести в сюжет «Интерстеллар» тессеракт,

меня это очень порадовало. В свои тринадцать лет я узнал о тессерактах из главы 4 изумительной книги Джорджа Гамова One, Two, Three, ... Infinity [Gamow 1947], и это во многом определило мое желание стать физиком-теоретиком. Вы можете найти подробные сведения о тессерактах в книге The Visual Guide to Extra Dimensions (McMullen 2008). Усложненный тессеракт Кристофера Нолана не имеет аналогов и не описан нигде, кроме этой книги и других материалов, относящихся к «Интерстеллар».

В классическом научно-фантастическом романе Мадлен Ленгль «Трещина во времени» [Л'Энгл 2013] дети, разыскивающие своего отца, путешествуют с помощью тессеракта. Я интерпретирую их путешествие так же, как путешествие Купера из недр Гаргантюа к спальне Мёрф, см. рис. 29.4.

## Глава 30. Передача сообщений в прошлое

Относительно того, как современные физики представляют себе путешествие назад во времени в четырех пространственно-временных измерениях без балка, см. последнюю главу книги «Черные дыры и складки времени» [Торн 2009], главы, написанные Хокингом, Новиковым и мной, из книги «Будущее пространства — времени» [Прайс и др. 2013], а также Time Travel and Warp Drives [Everett, Roman 2012]. Все эти книги написаны физиками, сделавшими серьезный вклад в развитие теории путешествий во времени. Об истории современных исследований путешествий во времени см. The New Time Travelers: A Journey to the Frontiers of Physics [Toomey 2007]. Обширные сведения о путешествиях во времени с точки зрения физики, метафизики и научной фантастики см. в книге Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction [Nahin 1999]. Превосходная книга, охватывающая почти все, что физики знают о природе времени, включая различные догадки на этот счет: From Eternity to Here: The Quest for The Ultimate Theory of Time [Carroll 2011].

Я не знаю хороших книг или статей о путешествии во времени для случая, если наша Вселенная — это брана в многомерном балке. Однако, как я писал в главе 30, законы Эйнштейна, расширенные в высшие измерения, дают практически те же прогнозы, что и без балка. Подробности о том, как Купер посылает сообщения в прошлое Мёрф, см. в приложении «Некоторые технические примечания».

## Глава 31. Эвакуация колоний с Земли

Относительно способа, которым Мёрф эвакуирует колонии с Земли (уменьшение  $G$ ) в Кип-версии, см. мои комментарии к главе 25 выше в этом разделе.

В начале шестидесятых, когда я учился на доктора наук в Принстонском университете, один из наших профессоров-физиков, Джерард К. О'Нил, исследовал перспективы создания космических колоний в духе той, что мы видим в конце «Интерстеллар». Эти исследования, дополненные исследованиями О'Нила в NASA, вылились в замечательную книгу The High Frontier: Human Colonies in Space [O'Neill 1978], которую я вам горячо рекомендую. Обратите внимание на предисловие Фримана Дайсона, где он рассказывает, почему мечта О'Нила о космических колониях потерпела крах при его жизни, однако может воплотиться в отдаленном будущем.

## НЕКОТОРЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕЧАНИЯ

Законы физики, которые управляют нашей Вселенной, записываются языком математики. Для тех, кто в ладах с математикой, я дам несколько относящихся к законам физики формул и

покажу, как я их использовал, чтобы получить некоторые значения для этой книги. В моих формулах часто фигурируют два числа — это скорость света  $c = 3,00 \cdot 10^8$  м/с и ньютоновская гравитационная постоянная  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/(кг · с<sup>2</sup>). Я использую экспоненциальное представление чисел, так что  $10^8$  означает 1 с восемью нулями — 100 000 000, или сто миллионов, а  $10^{-11}$  означает 0,00000000001. Я не стремлюсь к точности более одного процента, поэтому указываю в числах только два или три знака после запятой либо всего один, если число малоизвестно.

#### Глава 4. Искривления пространства и времени, приливная гравитация

Простейшее количественное представление эйнштейновского закона искривления времени: положите рядом две пары одинаковых часов, чтобы они находились в покое друг относительно друга и находились на разных расстояниях от действующего на них гравитационного притяжения. Пусть  $R$  — это дробная разница скорости хода часов,  $D$  — расстояние между ними, а  $g$  — действующее на них гравитационное ускорение (направленное от часов, которые идут быстрее, к часам, которые идут медленнее). Тогда закон Эйнштейна утверждает, что  $g = Rc^2/D$ . В случае эксперимента Паунда — Ребки в гарвардской башне  $R$  равнялось 210 пикосекундам в день:  $2,43 \cdot 10^{-15}$ , а высота башни  $D$  равнялась 73 футам (22,3 метра). Подставляя эти значения в формулу для закона искривления времени, получим  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup>, что действительно равняется гравитационному ускорению (ускорению свободного падения) на Земле.

#### Глава 6. Анатомия Гаргантюа

Для черной дыры, которая, как Гаргантюа, вращается очень быстро, окружность горизонта  $C$  в экваториальной плоскости выражается формулой  $C = 2\pi GM/c^2 = 9,3M/M_\odot$  км. Здесь  $M$  — это масса дыры, а  $M_\odot = 1,99 \cdot 10^{30}$  — это солнечная масса. У очень медленно вращающейся дыры окружность горизонта вдвое больше. Радиус горизонта равен его окружности, деленной на  $2\pi$ :  $R = GM/c^2 = 1,48 \cdot 10^8$  в случае Гаргантюа, что практически равно радиусу орбиты Земли вокруг Солнца.

Массу Гаргантюа я выбрал исходя из следующих рассуждений: масса планеты Миллер  $m$  вызывает направленное внутрь гравитационное ускорение  $g$  на поверхности планеты в соответствии с ньютоновским законом обратных квадратов  $g = Gm/r^2$ , где  $r$  — это радиус планеты. На стороне планеты, которая обращена к Гаргантюа, и на стороне, которая противостоит дыре, приливная гравитация Гаргантюа вызывает растягивающее ускорение  $gt$  (разница силы притяжения Гаргантюа между поверхностью планеты и ее центром, на расстоянии  $r$ ),  $gt = (2GM/R)r^3$ . Здесь  $R$  — это радиус орбиты планеты Миллер вокруг Гаргантюа, который практически соответствует радиусу горизонта черной дыры. Если приливное ускорение превысит собственное гравитационное ускорение планеты, ее разорвет на части, поэтому  $gt$  должно быть меньше  $g$ :  $gt < g$ . Подставляя формулы для  $g$ ,  $gt$  и  $R$ , выразив массу планеты через ее плотность  $\rho$  как  $m = (4\pi/3)r^3\rho$  и произведя некоторые вычисления, получим:

$$M = \sqrt{3}c^3 / \sqrt{2\pi G^3 \rho}$$

. Я оцениваю плотность планеты Миллер как  $\rho = 10\,000$  кг/м<sup>3</sup> (что приблизительно соответствует плотности сжатых горных пород), откуда получаю выражение для массы Гаргантюа:  $M < 3,4 \cdot 10^{38}$  кг — это примерно 200 миллионов солнечных масс, что я, в свою очередь, аппроксимирую до 100 миллионов солнечных масс. Используя уравнения теории относительности, я получил формулу, которая связывает замедление времени на планете Миллер,  $S$  (один час за семь лет)  $= 1,63 \cdot 10^{25}$ , с долей  $\gamma$ , на которую скорость вращения

Гаргантюа меньше максимально возможной:

$$16S^3/(3\sqrt{3})$$

. Эта формула верна только для очень высоких скоростей вращения. Подставляя значение  $S$ , получим  $\omega = 1,3 \cdot 10^{14}$ , то есть скорость вращения Гаргантюа меньше предельной приблизительно на одну стотриллионную долю.

## Глава 8. Внешний вид Гаргантюа

Уравнения для орбитального движения лучей света вокруг Гаргантюа, которые я предоставил Оливеру Джеймсу из Double Negative, — вариант уравнений из приложения А в [Levin, Perez-Giz 2008]. Уравнения для изменения сечения пучков света — вариант уравнений из [Pineult, Roeder 1977a] и [Pineult, Roder 1977b]. В нескольких статьях, которые будут выложены по адресу [arxiv.org/find/gr-qc](http://arxiv.org/find/gr-qc), мы с командой Пола Франклина дадим конкретные формы наших уравнений и расскажем о подробностях их реализации и полученных в ходе моделирования результатах.

## Глава 12. Задыхаясь без кислорода

Вот расчеты, лежащие в основе заявлений, которые я делаю в главе 13. Это неплохой пример того, как ученый производит оценки. Цифры здесь весьма приблизительны; я указываю их точность лишь до одного знака после запятой.

Масса земной атмосферы  $5 \cdot 10^{18}$  кг, из которых около 80 процентов — это азот, а 20 процентов — молекулярный кислород,  $O_2$ ; тогда выходит, что в атмосфере  $10^{18}$  кг  $O_2$ . Количество углерода в неперегнивших растениях (геофизики называют его «органическим углеродом») составляет около  $3 \cdot 10^{15}$  кг — приблизительно половина находится в поверхностных слоях мирового океана, и половина — на суше (таблица 1 из [Hedges, Keil 1995]). Обе эти части окисляются (преобразуются в  $CO_2$ ) в течение примерно 30 лет. Поскольку молекула  $CO_2$  состоит из двух атомов кислорода (полученного из атмосферы) и лишь одного атома углерода, а масса атома кислорода составляет 16/12 от массы атома углерода, после того как все растения на Земле погибнут, на окисление органического углерода будет затрачено  $2 \cdot 16/12 \cdot (3 \cdot 10^{15} \text{ кг}) = 10^{16}$  кг  $O_2$  — один процент всего атмосферного кислорода.

Относительно подтверждений внезапного перемешивания океанов и теории, объясняющей причины этого явления, см. [Adkins, Ingersoll, Pasquero 2005]. Стандартная оценка количества органического углерода в океанских придонных отложениях, которые могут оказаться на поверхности в результате перемешивания океанов, принимает во внимание главным образом верхний слой отложений, содержимое которого, в свою очередь, перемешивается за счет океанских течений и активности живых существ. Углерод в этом слое скапливается по мере его осаждения с оценочной скоростью около  $10^{11}$  кг в год, а среднее время, которое требуется, чтобы этот углерод соединился с кислородом из океанской воды, составляет 1000 лет. Всего получается около  $1,5 \cdot 10^{14}$  кг — одна двадцатая от общего количества углерода на суше и в поверхностных слоях океана [Emerson, Hedges 1988, Hedges, Keil 1995]. Однако: 1) оценочная величина скорости осаждения может намного отличаться от действительной скорости осаждения; например Энн Баумгарт и другие [Baumgart et al. 2009], руководствуясь тщательными измерениями, оценили скорость осаждения углерода в Индийском океане около Явы и Суматры с фактором неопределенности, равным 50. При экстраполяции на весь Мировой океан это может дать до  $3 \cdot 10^{15}$  кг в верхнем слое отложений (столько же, сколько на суше и в поверхностных слоях океана); 2) изрядная часть осажденного углерода может попасть в нижний слой отложений, который не смешивается с водой и потому не окисляется, за исключением внезапных перемешиваний океана. Считается, что последний раз такое

перемешивание происходило во время последнего ледникового периода, около 20 000 лет назад — этот срок в двадцать раз превышает время окисления углерода в верхнем слое отложений. Так что в нижнем слое может быть в двадцать раз больше органического углерода, чем в верхнем, а значит, и в двадцать раз больше, чем на суше и на поверхности океана. Если новое перемешивание океана выбросит этот углерод на поверхность, где он окислится, этого будет достаточно, чтобы вынудить всех людей на планете задыхаться от нехватки кислорода и умирать от отравления  $\text{CO}_2$ ; см. конец главы 12. Поэтому такой сценарий возможен, хоть и крайне маловероятен.

## Глава 15. Внешний вид червоточины в «Интерстеллар»

По решению Кристофера Нолана червоточина в «Интерстеллар» имеет диаметр в несколько километров. Угловой диаметр червоточины (в радианах) при наблюдении с Земли равен ее диаметру, деленному на расстояние от Земли, которое составляет около девяти астрономических единиц, или  $1,4 \cdot 10^9$  км (радиус орбиты Сатурна). Отсюда угловой диаметр червоточины — примерно  $2 \text{ км} / (1,4 \cdot 10^9 \text{ км}) = 1,4 \cdot 10^{-9}$  радиан, или 0,0003 секунды дуги. Радиотелескопы планомерно достигают такого углового разрешения с помощью интерферометрии. Наземным оптическим телескопам, использующим технологию под названием «адаптивная оптика», а также космическому телескопу «Хаббл» (по состоянию на 2014 год) доступны лишь угловые разрешения в сто раз слабее. Двойные телескопы в обсерватории Кека на Гавайях с помощью интерферометрии достигают угловых разрешений, которые в десять раз слабее, чем угловой диаметр червоточины, и вполне вероятно, что в эпоху «Интерстеллар» оптическая интерферометрия между более удаленными один от другого телескопами позволит достичь лучших разрешений, чем 0,0003 секунды дуги.

## Глава 17. Планета Миллер

Если вы знакомы с математической записью ньютоновских законов тяготения, вас может заинтересовать их модификация, предложенная астрофизиками Богданом Пачинским и Полом Виита [Paczynski and Wiita 1980]. В этой модификации гравитационное ускорение невращающейся черной дыры вместо ньютоновского закона обратных квадратов,  $g = GM/r^2$  выражается как  $g = GM / (r - r_h)^2$ . Здесь  $M$  — это масса дыры,  $r$  — радиус снаружи дыры, на котором ощущается ускорение  $g$ , а  $r_h = 2GM/c^2$  — радиус горизонта невращающейся дыры. Это на удивление хорошее приближение к гравитационному ускорению, которое прогнозирует общая теория относительности<sup>99</sup>. Попробуйте с помощью этой модифицированной формулы сделать количественный вариант рис. 17.2100 и определить радиус планеты Миллер. Результат будет верен лишь приблизительно, поскольку описание гравитации Гаргантюа по Пачинскому — Виита не учитывает вовлечение пространства в вихревое движение из-за вращения черной дыры.

## Глава 25. Уравнение профессора

Смысл различных математических символов, входящих в уравнение профессора (рис. 25.7), раскрыт на остальных пятнадцати досках, фотографии которых можно найти на сайте [Interstellar.withgoogle.com](http://Interstellar.withgoogle.com) в разделе, посвященном этой книге. Уравнение выражает «действие»  $S$  (классический предел «квантового эффективного действия») в виде интеграла лагранжевых функций  $L$ . Эти функции связаны с геометрическими свойствами пространства — времени («метриками») пятимерного балка и нашей четырехмерной браны, с набором полей, действующих в балке (которые обозначены как  $Q$ ,  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $\chi$  и  $\eta$ ), а также с «полями стандартной

модели», действующими в нашей бране (включая электрические и магнитные поля). Поля и пространственно-временные метрики варьируются, чтобы найти экстремум (максимум, минимум или седловую точку) действия  $S$ . Условия экстремума представляют собой систему уравнений Эйлера — Лагранжа, которые определяют эволюции полей; это стандартная процедура вариационного исчисления. Профессор и Мёрф делают предположения относительно полей балка  $Q^i$ , неизвестных функций  $U(Q)$ ,  $H_{ij}(Q^2)$ ,  $M$  (поля стандартной модели) а также неизвестных констант  $W_{ij}$ , которые входят в лагранжевы функции. На рис. 25.8 я записываю на доске список этих предположений. Затем для каждого набора предположений профессор и Мёрф варьируют поля и метрики пространства — времени, выводят уравнения Эйлера — Лагранжа, а затем выполняют компьютерное моделирование, исследуя прогнозы этих уравнений относительно гравитационных аномалий.

## Глава 27. Кромка кратера

Это примечание — для читателей, которые хорошо знакомы с математической записью ньютоновского закона тяготения и законов сохранения энергии и углового момента. Я предлагаю вам самостоятельно вывести нижеследующую формулу для вулканоподобной поверхности, исходя из 1) приблизительной формулы Пачинского — Виита для гравитационного ускорения Гаргантюа,  $g = GM / (r - r_h)^2$  (см. техническое примечание к главе 17 выше) и 2) законов сохранения энергии и углового момента. Собственно формула в системе обозначений из примечания к главе 17 с добавлением величины  $L$  — углового момента «Эндюранс» выглядит так:

$$V(r) = -GM / (r - r_h) + L^2 / (2r^2).$$

Первое слагаемое здесь соответствует гравитационной энергии «Эндюранс» (на единицу массы), второе — его окружной кинетической энергии, а сумма  $V(r)$  и радиальной кинетической энергии  $v^2/2$  (где  $r$  — радиальная скорость) будет равняться полной энергии «Эндюранс» (на единицу массы). Кромка кратера соответствует такому радиусу  $r$ , где  $V(r)$  достигает максимума. Предлагаю вам с помощью этих идей и уравнений доказать мои утверждения из главы 27 — утверждения о траектории «Эндюранс», нестабильности траектории на кромке кратере и о старте к планете Эдмундс.

## Глава 30. Передача сообщений в прошлое

В балке, так же как и в нашей бране, положения в пространстве — времени, в которые можно передавать сообщения и вообще что-либо перемещать, ограничены законом, который гласит: ничто не может двигаться быстрее света. Чтобы изучить последствия этого закона, мы, физики, используем пространственно-временные схемы, на которых в точке каждого события располагается «световой конус будущего». Свет идет от этого события по световому конусу, а все остальное — то, что движется медленнее света, — попадает из точки события или на конус, или внутрь него. См., например, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity [Hartle 2003].

На рис. НТП.1 показан рисунок световых конусов будущего внутри тессеракта и на его гранях (в Кип-версии). Это математическое описание искривления пространства — времени, на которое я ссылаюсь в примечании 97 к главе 30. Физики называют такой рисунок световых конусов «каузальной структурой пространства — времени» внутри тессеракта. На рис. НТП.1

также показана мировая линия (фиолетовая кривая) гравитационно-волнового сообщения (силы), которое Купер отправил через тессеракт в спальню Мёрф, а также мировая линия луча света (красный пунктир), идущего из спальни через грани тессеракта, благодаря чему Купер видит, что происходит в спальне. Это пространственно-временная версия чисто пространственной схемы на рис. 30.5.

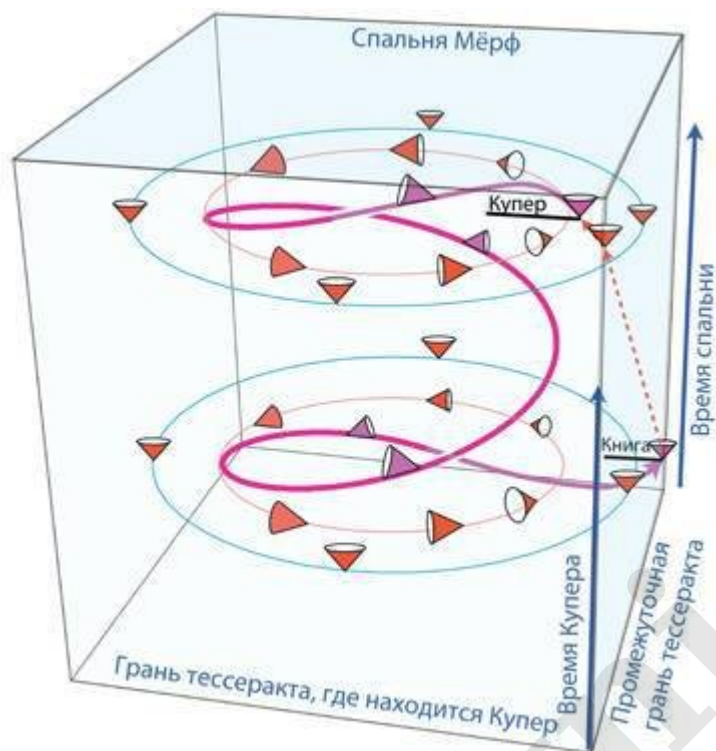


Рис. НТП. 1. Каузальная структура пространства — времени внутри тессеракта; одно пространственное измерение опущено

Можете разобраться, почему гравитационно-волновое сообщение движется со скоростью света и тем не менее перемещается назад как относительно времени спальни, так и относительно времени Купера? И постарайтесь понять, как луч света, двигаясь со световой скоростью, перемещается, напротив, вперед относительно обоих времен. Сравните это с описанием картины Эшера (рис. 30.6) в главе 30.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Прежде всего благодарю за приглашение в Голливуд и мое знакомство с потрясающим миром кинобизнеса моего партнера Линду Обст, а также Кристофера Нолана, Эмму Томас, Джонатана Нолана, Пола Франклина и Стивена Спилберга.

Я благодарен Линде за дружбу и сотрудничество, давшие начало замыслу «Интерстеллар», и за то, как она вела этот проект через все испытания и беды, пока фильм не попал в руки к Кристоферу Нолану, который его так преобразил.

За знакомство с миром визуальных эффектов и возможность участвовать в визуализации червоточины, черной дыры Гаргантюа и ее аккреционного диска я благодарю Пола Франклина, Оливера Джеймса и Эжени фон Танзелманн, и также благодарю Оливера и Эжени за приятное сотрудничество.

За мудрые замечания и предложения относительно рукописи этой книги я благодарю Линду Обст, Джеффа Шрива, Эмму Томас, Кристофера Нолана, Джордана Голдберга, Пола Франклина, Оливера Джеймса, Эжени фон Танзелманн и Кэрол Роуз. За настойчивое стремление к тому, чтобы каждой строке этой книги были присущи точность и логика, я благодарю Лесли Хуанга и Дона Рифкина. За ценную помощь и/или советы по иллюстрациям спасибо Джордану Голдбергу, Эрику Леваю, Джеффу Шриву, Джулии Драскин, Джо Лопсу, Лии Хэллоран и Энди Томпсону. Спасибо Пэту Холлу, который помогал получать разрешения на использование иллюстраций.

За помощь в создании этой книги я благодарю Дрейка Макфили, Джеффа Шрива, Эми Черри и моих голливудских адвокатов Эрика Шермана и Кена Зиффрена (да, практически каждому, кто работает в Голливуде, необходим адвокат или агент, даже захолустному ученому).

А также за внимательность и поддержку при работе над фильмом и книгой я благодарю мою жену и подругу жизни Кэроли Уинстейн.

## БИБЛИОГРАФИЯ

Грин Б. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. — М. : Либроком, 2015.

Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. — М. : Либроком, 2011.

Л'Энгл М. Трещина во времени. — М. : АСТ, 2013.

Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. — М. : Мир, 1977.

Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. — М. : Наука, 1989.

Пенроуз Р. Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной. — М.; Ижевск : Институт компьютерных исследований; Регулярная и хаотическая динамика, 2007.

Прайс Р. и др. Будущее пространства — времени. — СПб. : Амфора, 2013.

Роузвер Н. Т. Перигелий Меркурия. От Леверье до Эйнштейна. — М. : Мир, 1985.

Рэндалл Л. Закрученные пассажи. Проникая в тайны скрытых размерностей пространства. — М. : Едиториал УРСС; Либроком, 2011.

Торн К. С. Черные дыры и складки времени. Дерзкое наследие Эйнштейна. — М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 2009.

Фейнман Р. Характер физических законов. — М. : АСТ, 2011.

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

Хокинг С. Мир в ореховой скорлупке. — СПб. : Амфора, 2013.

Хокинг С., Млодинов Л. Высший замысел. — СПб. : Амфора, 2012.

Хокинг С., Пенроуз Р. Природа пространства и времени. — СПб. : Амфора, 2014.

Эбботт Э. Флатландия. Бюргер Д. Сферландия. — СПб. : Амфора, 2001.

- Adkins, J. F., Ingersoll, A. P., and Pasquero, C. (2005). "Rapid Climate Change and Conditional Instability of the Glacial Deep Ocean from the Thermobaric Effect and Geothermal Heating," *Quaternary Science Reviews*, 24, 581-594.
- Al-Khalili, J. (2012). *Black Holes, Wormholes, and Time Machines*, 2nd edition (CRC Press, Boca Raton, Florida).
- Barrow, J. D. (2011). *The Book of Universes: Exploring the Limits of the Cosmos* (W. W. Norton, New York).
- Bartusiak, M. (2000). *Einstein's Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time* (The Berkeley Publishing Group, New York).
- Baum, R., and Sheehan, W. (1997). *In Search of the Planet Vulcan: The Ghost in Newton's Clockwork Universe* (Plenum Trade, New York).
- Baumgart, A., Jennerjahn, T., Mohtadi, M., and Hebbeln, D. (2010). "Distribution and Burial of Organic Carbon in Sediments from the Indian Ocean Upwelling Region Off Java and Sumatra, Indonesia," *Deep-Sea Research I*, 57, 458-467.
- Begelman, M., and Rees, M. (2009). *Gravity's Fatal Attraction: Black Holes in the Universe*, 2nd edition (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Billings, L. (2013). *Five Billion Years of Solitude: The Search for Life Among the Stars* (Penguin Group, New York).
- Brans, C. (2010). "Varying Newton's Constant: A Personal History of Scalar-Tensor Theories," *Einstein Online*, 1002.
- Carroll, S. (2011). *From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time* (Oneworld Publications, Oxford, England).
- Carroll, S. (2014). *Preposterous Universe*, [preposterousuniverse.com/blog/](http://preposterousuniverse.com/blog/).
- Choptuik, M. W. (1993). "Universality and Scaling in Gravitational Collapse of a Massless Scalar Field," *Physical Review Letters*, 70, 9.
- Davies, P. C.W., and Brown, J. R. (1986). *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Dyson, F. J. (1963). "Gravitational Machines," in *Interstellar Communication*, edited by A.G.W. Cameron (W. A. Benjamin, New York), pp. 115-120.
- Dyson, F. J. (1968). "Interstellar Transport," *Physics Today*, October 1968, pp. 41-45.
- Ehlinger, L. (2007). *Flatland: The Film*; доступен на YouTube: [youtube.com/watch?v=eyuNrm4VK2w](http://youtube.com/watch?v=eyuNrm4VK2w).
- Emerson, S., and Hedges, J. I. (1988). "Processes Controlling the Organic Carbon Content of Open Ocean Sediments," *Paleoceanography*, 3, 621-634.
- Everett, A., and Roman, T. (2012). *Time Travel and Warp Drives* (University of Chicago Press, Chicago).

- Forward, R. (1962). "Pluto — the Gateway to the Stars," *Missiles and Rockets*, 10, 26–28.
- Forward, R. (1984). "Roundtrip Interstellar Travel Using Laser-Pushed Lightsails," *Journal of Spacecraft and Rockets*, 21, 187–195.
- Foucart, F., Duez, M. D., Kidder, L. E., and Teukolsky, S. A., "Black Hole–Neutron Star Mergers: Effects of the Orientation of the Black Hole Spin," *Physical Review D* 83, 024005 (2011).
- Freeze, K. (2014). *The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Gamow, G. (1947). *One, Two, Three ... Infinity: Facts and Speculations of Science* (Viking Press, New York; now available from Dover Publications, Mineola, New York).
- Gregory, R., Rubakov, V. A., and Sibiryakov, S. M. (2000). "Opening Up Extra Dimensions at Ultra-Large Scales," *Physical Review Letters*, 84, 5928–5931; доступно по адресу [lanl.arxiv.org/abs/hep-th/0002072v2](http://lanl.arxiv.org/abs/hep-th/0002072v2).
- Guillochon, J., Ramirez-Ruiz, E., Rosswog, S., and Kasen, D. (2009). "Three-Dimensional Simulations of Tidally Disrupted Solar-Type Stars and the Observational Signatures of Shock Breakout," *Astrophysical Journal*, 705, 844–853.
- Guth, A. (1997). *The Inflationary Universe* (Perseus, New York).
- Hartle, J. (2003). *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity* (Pearson, Upper Saddle River, New Jersey).
- Hedges, J. I., and Keil, R. G. (1995). "Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis," *Marine Chemistry*, 49, 81–115.
- Isaacson, W. (2007). *Einstein: His Life and Universe* (Simon & Schuster, New York).
- Kennefick, D. (2007). *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Lemonick, M. (2012). *Mirror Earth: The Search for Our Planet's Twin* (Walker, New York).
- Levin, J., and Perez-Giz, G. (2008). "A Periodic Table for Black Hole Orbits," *Physical Review D*, 77, 103005.
- Lynden-Bell, D. (1969). "Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars," *Nature*, 223, 690–694.
- Maartens, R., and Koyama K. (2010). "Brane-World Gravity," *Living Reviews in Relativity* 13, 5.
- Marolf, D., and Ori, A. (2013). "Outgoing Gravitational Shock-Wave at the Inner Horizon: The Late-Time Limit of Black Hole Interiors," *Physical Review D*, 86, 124026.
- McKinney, J. C., Tchekhovskoy, A., and Blandford, R. D. (2012). "Alignment of Magnetized Accretion Disks and Relativistic Jets with Spinning Black Holes," *Science*, 339, 49–52.
- McMullen, C. (2008). *The Visual Guide to Extra Dimensions. Volume 1: Visualizing the Fourth Dimension, Higher-Dimensional Polytopes, and Curved Hypersurfaces* (Custom Books).
- Meier, D. L. (2012). *Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm* (Springer Verlag, Berlin).

- Merritt D. (2013). *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey).
- Nahin, P. J. (1999). *Time Machines: Time Travel in Physics, Metaphysics and Science Fiction*, 2nd edition (Springer Verlag, New York).
- Obst, L. (1996). *Hello, He Lied: & Other Truths from the Hollywood Trenches* (Little, Brown, Boston).
- Obst, L. (2013). *Sleepless in Hollywood: Tales from the New Abnormal in the Movie Business* (Simon & Schuster, New York).
- O'Neill, G. K. (1978). *The High Frontier: Human Colonies in Space* (William Morrow, New York; 3rd edition published by Apogee Books, 2000).
- Paczynski, B., and Wiita, P. J. (1980). "Thick Accretion Disks and Supercritical Luminosities," *Astronomy and Astrophysics*, 88, 23–31.
- Panek, R. (2011). *The 4% Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality* (Houghton Mifflin Harcourt, New York).
- Perryman, M. (2011). *The Exoplanet Handbook* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Pineault, S., and Roeder, R. C. (1977a). "Applications of Geometrical Optics to the Kerr Metric. I. Analytical Results," *Astrophysical Journal*, 212, 541–549.
- Pineault, S., and Roeder, R. C. (1977b). "Applications of Geometrical Optics to the Kerr Metric. II. Numerical Results," *Astrophysical Journal*, 213, 548–557.
- Poisson, E., and Israel, W. (1990). "Internal Structure of Black Holes," *Physical Review D*, 41, 1796–1809.
- Rees, M., ed. (2005). *Universe: The Definitive Visual Guide* (Dorling Kindersley, New York).
- Schutz, B. (2003). *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity* (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Schutz, B. (2009). *A First Course in General Relativity*, 2nd edition (Cambridge University Press, Cambridge, England).
- Singh, P. S. (2004). *Big Bang: The Origin of the Universe* (HarperCollins, New York).
- Shostak, S. (2009). *Confessions of an Alien Hunter: A Scientist's Search for Extraterrestrial Intelligence* (National Geographic, Washington, DC).
- Stewart, I. (2002). *The Annotated Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Basic Books, New York).
- Teo, E. (2003). "Spherical Photon Orbits Around a Kerr Black Hole," *General Relativity and Gravitation*, 35, 1909–1926.
- Thorne, K. S. (2003). "Warping Spacetime," in *The Future of Theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Stephen Hawking's 60th Birthday*, edited by G. W. Gibbons, S. J. Rankin, and E.P. S. Shellard (Cambridge University Press, Cambridge, England), Chapter 5, pp. 74–104.

- Toomey, D. (2007). *The New Time Travelers: A Journey to the Frontiers of Physics* (W. W. Norton, New York).
- Visser, M. (1995). *Lorentzian Wormholes: From Einstein to Hawking* (American Institute of Physics, Woodbury, New York).
- Vilenkin, A. (2006). *Many Worlds in One: The Search for Other Universes* (Hill and Wang, New York).
- Wheeler, J. A., and Ford, K. (1998). *Geons, Black Holes and Quantum Foam: A Life in Physics* (W. W. Norton, New York).
- Will, C. M. (1993). *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test* (Basic Books, New York).
- Witten, E. (2000). "The Cosmological Constant from the Viewpoint of String Theory," доступно по адресу [arxiv.org/abs/hep-ph/0002297](http://arxiv.org/abs/hep-ph/0002297).
- Yang, H., Zimmerman, A., Zenginoglu, A., Zhang, F., Berti, E., and Chen, Y. (2013). "Quasinormal Modes of Nearly Extremal Kerr Spacetimes: Spectrum Bifurcation and Power-Law Ringdown," *Physical Review D*, 88, 044047.

## ПРИМЕЧАНИЯ

1. Непереведенное (а может, непереваемое) название фильма буквально означает «Межзвездный». *Прим. ред.*
2. Англ. *wormhole*; среди российских физиков также в ходу термины «кротовая нора» и «кротовина». *Прим. перев.*
3. Дыра названа в честь отличающегося гигантскими размерами и прожорливостью героя романа французского писателя Франсуа Рабле (1494–1553). В одном из ранних вариантов сценария дыр было две — Гаргантюа и Пантагрюэль. *Прим. ред.*
4. Для краткости все интерпретации и экстраполяции Кипа Торна, призванные объяснить научные аспекты фильма, мы будем называть Кип-версией. *Прим. ред.*
5. *Flashdance*, режиссер Эдриан Лайн, 1983. *The Fisher King*, режиссер Терри Гиллиам, 1991. *Contact*, режиссер Роберт Земекис, 1997. *How to Lose a Guy in 10 Days*, режиссер Дональд Перти, 2003. В двух последних играл Мэттью Макконахи. *Прим. ред.*
6. *The Perils of Pauline* — название двух сериалов (1914, 1933) и двух фильмов (1947, 1967), над героинями которых то и дело нависает новая опасность. *Прим. перев.*
7. Краткое название Калифорнийского технологического института. *Прим. ред.*
8. *Big Bang*, дословно — «Большой бабах». *Прим. перев.*
9. 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.*

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.*

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

**11.** 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.*

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

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

**14.** 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.*

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

**16.** 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.*

**17.** 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.*

**18.** 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, воспаря разумом в поисках подходящего слова. *Прим. автора.*

**19.** См. приложение «Некоторые технические примечания» в конце книги. *Прим. автора.*

**20.** Эффект состоит в испускании излучателем гамма-квантов без отдачи. Важным свойством этого излучения является чрезвычайно малая ширина линии излучения (спектр состоит «почти из одной частоты»), что позволяет проводить ряд тонких измерений в различных экспериментах. *Прим. науч. ред.*

**21.** Впрочем, см. начало главы 24. *Прим. автора.*

**22.** Под «ровным» имеется в виду пространство — время нулевой кривизны. *Прим. науч. ред.*

**23.** Неизменной с учетом очевидных замедлений из-за взаимодействия с электронами в межпланетном пространстве (так называемые «плазменные поправки»). *Прим. автора.*

**24.** Эта закономерность является проявлением принципа Ферма, одного из фундаментальных принципов физики, связанного с принципом наименьшего действия. *Прим. науч. ред.*

**25.** В 1907 году Эйнштейну подумалось, что если бы он свалился, например, с крыши своего дома, то во время падения не чувствовал бы гравитации. Он называл эту мысль «счастливейшей в своей жизни», поскольку она сподвигла его на изучение гравитации, благодаря чему, в свою очередь, появились идея об искривлении времени и пространства и законы, которым это искривление подчиняется. *Прим. автора.*

**26.** Можно также утверждать, что изменение геометрии пространства — времени (искривление пространства черной дыры) динамически связано с изменением энергии материи, заполняющей пространство — время, что и выражается уравнениями Эйнштейна. Изменение одного неизбежно влечет изменение другого. *Прим. науч. ред.*

**27.** Слаба настолько, что уравнения движения Ньютона почти идеально описывают движение планет, за исключением некоторых случаев, например одного из первых открытых эффектов общей теории относительности — смещения перигелия Меркурия. Но и это смещение мало — 43' за целое столетие. *Прим. науч. ред.*

**28.** Интересно, что если перейти в систему тела, падающего в черную дыру, то время (измеренное в его собственной системе отсчета) достижения гравитационного радиуса оказывается конечным, хотя с точки зрения стороннего наблюдателя это происходит бесконечно долго. *Прим. науч. ред.*

**29.** Иначе говоря, временные и пространственные измерения переходят друг в друга и временная компонента метрического тензора меняет знак на тот, который характерен для пространственной. *Прим. науч. ред.*

**30.** Если путешествие назад во времени возможно, его получится совершить, лишь отправившись в космос и вернувшись прежде своего отлета. Нельзя перемещаться назад во времени, не меняя положения в пространстве, тогда как все вокруг вас продолжает двигаться по времени вперед. Подробнее об этом см. в главе 30. *Прим. автора.*

**31.** Это так называемый эффект полного увлечения эргосферой, описываемой в тексте областью близ горизонта событий. В эргосфере ни одна частица не может находиться в покое. *Прим. науч. ред.*

**32.** Астеризм — небольшая, легко различимая группа звезд, обычно часть какого-либо созвездия. *Прим. ред.*

**33.** Дословный перевод фразы «У черных дыр нет волос» на французский звучит так неприлично, что французские издатели до последнего не хотели включать ее в переводное издание. Но тщетно. *Прим. автора.*

**34.** Если вас интересуют точные цифры, см. приложение «Некоторые технические примечания» в конце книги. *Прим. автора.*

**35.** Пожалуй, вернее было бы взять массу в 200 миллионов Солнц, но я выбрал 100 миллионов, чтобы упростить расчеты. *Прим. автора.*

**36.** См. рис. 17.2 и пояснения к нему в главе 17. *Прим. автора.*

**37.** Иначе говоря, скорость вращения Гаргантюа равна 0,99999999999999 от предельной.

*Прим. автора.*

**38.** Пока ТАРС падал, «Эндюранс» находился не на сильном отдалении, а на критической орбите вблизи горизонта, вращаясь вокруг Гаргантюа примерно с той же скоростью, что и ТАРС. Поэтому Амелия Брэнд, находясь в «Эндюранс», не видит, что ТАРС на большой скорости летит вокруг дыры. Подробнее об этом в главе 27. *Прим. автора.*

**39.** Вероятность обнаружить в нужном месте и в нужное время черную дыру средней массы невелика, но в рамках научной фантастики это допустимо, поскольку не нарушает законов физики. *Прим. автора.*

**40.** Угловой диаметр — в астрономии: видимый диаметр небесного тела, выраженный в угловых мерах. Радиан — единица измерения углов; угол, соответствующий дуге, длина которой равна ее радиусу; 1 радиан =  $57,3^\circ$ . *Прим. ред.*

**41.** См. рис. 6.4 и рис. 6.5. *Прим. автора.*

**42.** Трение возникает в результате сложного процесса, когда движущийся газ возбуждает поле, усиливая его и, таким образом, преобразуя энергию движения в магнитную энергию; затем магнитное поле, которое в соседних областях пространства направлено в противоположную сторону, пересоединяется, переводя при этом магнитную энергию в тепло. Преобразование движения в тепло и есть сущность трения. *Прим. автора.*

**43.** Стоит также упомянуть эффект Пенроуза, состоящий в том, что в эргосфере вращающейся черной дыры частицы могут обладать (формально) отрицательной энергией, что дает принципиальную возможность извлекать энергию из черной дыры, которую может уносить один из продуктов распада частицы в эргосфере, покинувший ее. Эффект дает возможность извлекать энергию из черной дыры, замедляя ее вращение. *Прим. науч. ред.*

**44.** На рис. 9.5 я поменял размер дыры на размеры Гаргантюа, а размер звезды — на размер красного гиганта и скорректировал временные отметки. *Прим. автора.*

**45.** Угловой момент объекта — это произведение его окружной скорости на расстояние до Гаргантюа. Угловой момент важен для нас, поскольку он постоянен по всей длине орбиты объекта, даже если это сложная орбита. *Прим. автора.*

Еще один примечательный факт: если тело и вектор его движения в начальный момент движения лежали в экваториальной плоскости, то и в дальнейшем движение будет происходить в этой плоскости. Математически это следует из геодезических уравнений в метрике Керра. Здесь допустима аналогия из классической механики, где при условии сохранения момента импульса движение тела (в трехмерном пространстве) происходит в фиксированной плоскости, которая определяется начальными условиями. *Прим. науч. ред.*

**46.** Здесь имеется в виду окисление органических соединений в нашем организме с образованием углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и выделением энергии. *Прим. науч. ред.*

**47.** Хлоропласты и фотосинтез также присущи водорослям и цианобактериям в океанах. И те и другие для простоты я буду считать за растения. (В некотором смысле цианобактерия — это разновидность хлоропласта.) *Прим. автора.*

**48.** Если вам интересны конкретные данные и пояснения по поводу геофизических оценок, см. приложение «Некоторые технические примечания» в конце книги. *Прим. автора.*

**49.** Нельзя оставить без внимания и двигатели, где в качестве топлива используются элементарные частицы со скоростями, близкими к скорости света. Множество таких частиц (например, гамма-кванты или пи-мезоны) образуются в процессах аннигиляции частица — античастица (например, электрон — позитрон). Использование подобных технологий, по оценкам некоторых ученых, позволит достигнуть скоростей порядка  $c$ . К сожалению, производство антивещества для процессов аннигиляции слишком трудоемко и технически сложно. *Прим. науч. ред.*

**50.** Формула для кинетической энергии:  $Mv^2/2$ , где  $M$  — это масса атома гелия, а  $v$  — его скорость. Формула высвобожденной энергии:  $0,0064 Mc^2$ , где  $c$  — скорость света. (Тут я пользуюсь знаменитым принципом Эйнштейна, который гласит, что если преобразовать массу в энергию, количество энергии будет равняться массе, помноженной на квадрат скорости света.) Приравняв одно к другому, получим:  $v^2 = 2 \cdot 0,0064c^2$ , из чего следует, что  $v$  приблизительно равно  $c/10$ . *Прим. автора.*

**51.** Одно из возможных решений: от основного паруса перед торможением отделяется вспомогательный, который перемещается перед кораблем. Лазерный луч с Земли, отражаясь от вспомогательного паруса, оказывает воздействие на основной парус, но уже в направлении, противоположном направлению разгона, что вызывает торможение. *Прим. науч. ред.*

**52.** Если не вдаваться глубоко: из-за расширения Вселенной стартовая точка и финишная в течение полета будут постоянно отдаляться друг от друга, то есть кораблю потребуется на путь больше времени, чем если бы Вселенная не расширялась. *Прим. науч. ред.*

**53.** То есть материи, которая обладает гравитационной массой, создающей вокруг себя гравитационное поле. *Прим. перев.*

**54.** Саган К. Э. Контакт. — СПб. : Ред Фиш; Амфора, 2005. *Прим. ред.*

**55.** Энергия в релятивистской физике — штука странная: ее величина, измеренная наблюдателем, зависит от того, с какой скоростью и в каком направлении наблюдатель движется. *Прим. автора.*

То есть определяется системой отсчета и при переходе к другой системе преобразуется как компонента четырехмерного вектора. *Прим. науч. ред.*

**56.** Напомню, что Оливер Джеймс, специалист студии Double Negative, написал компьютерный код, лежащий в основе визуализации червоточин и черных дыр в «Интерстеллар», см. главу 1 и главу 8. *Прим. автора.*

**57.** Линзирование происходит преимущественно в области, где червоточина имеет сильно изогнутую форму (при взгляде из балка). Это область, где наклон стенок превышает 45 градусов, поэтому я определил ширину линзирования как радиальное расстояние от горловины червоточины до участка, где наклон стенок равен 45 градусам (рис. 15.1). *Прим. автора.*

**58.** Прецессия — явление, когда ось вращающегося тела перемещается, описывая коническую поверхность. Хрестоматийный пример прецессии — поведение волчка, когда он замедляется и его ось отклоняется от вертикали. *Прим. ред.*

**59.** Если перечислять всех руководителей исследовательской команды, то это сам Джеми, его тогдашние постдокторанты Джон Ковач (сейчас в Гарварде) и Чао-Лин Куо (сейчас в Стэнфорде), а также Клем Прайк (сейчас в Университете Миннесоты). *Прим. автора.*

- 60.** Как было сказано в примечании к главе 1, результаты этих экспериментов до сих пор не окончательно приняты научным сообществом. *Прим. науч. ред.*
- 61.** Центробежная сила зависит от углового момента планеты; он является мерой ее орбитальной скорости и не меняется вдоль всей ее орбиты (см. главу 10). Изображая на рис. 17.2 зависимость силы от расстояния до Гаргантюа, я считаю угловой момент планеты Миллер постоянным. Если бы он был чуть меньше взятого значения, величина центробежной силы тоже была бы повсюду меньше, две кривые на рис. 17.2 не пересекались бы и при отсутствии точек равновесия планета упала бы в черную дыру. Поэтому положение планеты Миллер на рис. 17.1 и 17.2 — ближайшее к Гаргантюа из стабильных; я выбрал его, чтобы получить максимально возможное замедление времени. Другие подробности см. в приложении «Некоторые технические примечания» в конце книги. *Прим. автора.*
- 62.** Некоторые ученые высказывали предположение, что планета Миллер, находясь она еще чуть ближе в горизонту событий Гаргантюа (за так называемым пределом Роша), состояла бы из неких частиц, сохранившихся с ранних стадий развития Вселенной. *Прим. науч. ред.*
- 63.** Значения резонансных частот в таблице представлены в непривычных для нас единицах измерения. Чтобы преобразовать в более понятный вид, их надо умножить на скорость света в кубе и поделить на  $2\pi GM$ , где  $\pi = 3,14159\dots$ ,  $G$  — гравитационная постоянная Ньютона, а  $M$  — масса Гаргантюа. Этот коэффициент преобразования приблизительно равен одному колебанию в час, поэтому значение первой предсказанной частоты в таблице — примерно 0,67 колебания в час. Для скорости затухания используется тот же самый коэффициент. *Прим. автора.*
- 64.** Когда в фильме «Эндюранс» находится на орбите вокруг планеты Манн, мы видим, что Гаргантюа занимает около 0,9 градуса обзора — приблизительно вдвое больше, чем Луна, если смотреть на нее с Земли. Согласно моим расчетам, это значит, что планета Манн удалена от Гаргантюа примерно на 600 радиусов черной дыры. Тогда время, необходимое, чтобы планета приблизилась к Гаргантюа, составит не менее 40 дней — это гораздо дольше, чем, судя по всему, находится на планете или рядом с ней экипаж, но вполне подходит как время полета до планеты; см. главу 7. *Прим. автора.*
- 65.** 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.*
- 66.** см. главу 3, где вкратце рассказывается о постижении законов квантовой гравитации. *Прим. автора.*
- 67.** Flat (англ.) — плоский, line (англ.) — линия, point (англ.) — точка, space (англ.) — пространство. *Прим. ред.*
- 68.** 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.*
- 69.** Виллем де Ситтер (1872–1934) — нидерландский астроном. *Прим. ред.*
- 70.** О квантовых флуктуациях я расскажу в главе 26, а о полях балка — в главе 25. *Прим. автора.*
- 71.** 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.*

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

**73.** Откуда это магическое расстояние в 0,1 миллиметра, почему не 1 километр или 1 пикометр? Я выбрал эту величину весьма произвольно. Эксперименты показывают, что приблизительно 0,1 мм — это верхний предел, до которого гравитация продолжает подчиняться закону обратных квадратов. Однако мы вполне могли бы взять и меньшее расстояние. *Прим. автора.*

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

**75.** Данные наблюдений прекрасно объясняются моделью, включающей в себя темную энергию и темную материю, что говорит в пользу их существования. *Прим. науч. ред.*

**76.** Gravity Recovery And Climate Experiment, совместная космическая миссия США и Германии, запущена в мае 2002 года, на 2014 год все еще ведет сбор данных. *Прим. автора.*

Grace (англ.) — грация, изящество. *Прим. ред.*

**77.** Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer — «Исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений». *Прим. автора.*

**78.** В соответствии с законами теории относительности темная энергия, которая (предположительно) ускоряет расширение Вселенной, имеет еще одно свойство — она порождает в нашей бране огромное напряжение, будто брана — натянутый жгут. Также из релятивистских законов Эйнштейна следует: чтобы пространство — время вне AdS-бутерброда было, как мы того хотим, не искривленным, каждая ограничительная брана должна испытывать внутреннее давление, равное половине внутреннего напряжения нашей браны. В этом-то давлении и таится опасность. *Прим. автора.*

**79.** Либо коробление может привести к отклонению одной или обеих бран наружу, с высвобождением AdS-слоя. В результате ньютоновский закон обратных квадратов перестанет действовать, и все планеты разлетятся прочь от Солнца — что, возможно, не так уж пагубно для нашей Вселенной, но весьма печально для человечества. *Прим. автора.*

**80.** Значения для различных членов и прочие сведения об уравнении расписаны на остальных пятнадцати досках — все это написал за профессора я. Вы можете посмотреть фотографии всех шестнадцати досок на сайте [Interstellar.withgoogle.com](http://Interstellar.withgoogle.com). *Прим. автора.*

**81.** Точнее, положения центров масс этих зеркал. *Прим. автора.*

**82.** В 1955 году Джон Уилер указал на возможность существования квантовой пены с червоточинами размером в  $10^{-35}$  метра — в 10 триллионов триллионов раз меньше атома (так называемая планковская длина). *Прим. автора.*

**83.** Плита, найденная возле египетского города Розетта (Рашид); выбитый на ней текст послужил Жану-Франсуа Шампольону (1790–1832) отправной точкой для расшифровки египетских иероглифов. *Прим. ред.*

**84.** На самом деле он моделировал поведение так называемой «скалярной волны», но это несущественное уточнение. Несколько лет спустя Эндрю Абрамс и Чак Эванс из Университета Северной Каролины повторили моделирование Чоптюка с гравитационной волной и получили тот же результат — голую сингулярность. *Прим. автора.*

**85.** Израэль и Пуассон назвали эту сингулярность «сингулярностью инфляции массы», под этим именем она и известна с тех пор среди физиков. Я предпочитаю название «падающая сингулярность» и использую в этой книге его. *Прим. автора.*

**86.** Это происходит, поскольку угловой момент «Эндюранс» немного меньше, чем угловой момент планеты Манн. На рис. 27.3 «Эндюранс» поднимается на кромку кратера, а планета Манн, не дойдя до нее, по спирали движется вниз по склону (центробежные силы выталкивают ее наружу) и затем поднимается по склону гравитационной энергии, удаляясь прочь от Гаргантюа. *Прим. автора.*

**87.** Аналогия с вулканом работает благодаря следующему ключевому моменту: общая сила (гравитационная плюс центробежная), действующая на «Эндюранс», пропорциональна уклону «энергетической поверхности» (рис. 27.3 и 27.5). Сообразили? *Прим. автора.*

**88.** Сигналы, поступающие снаружи, из-за высокой скорости «Рейнджера» подвергаются доплеровскому красному смещению, которое компенсирует синее смещение, вызванное гравитационным притяжением дыры, поэтому цвета выглядят как обычно. *Прим. автора.*

**89.** Из-за аберрации звездного света. *Прим. автора.*

**90.** На рис. 29.7 Купер перевернут так, что его взгляд обращен к макушке Мёрф, как на рис. 29.6. Это значит, что на изображениях 2-5 Мёрф тоже должна быть перевернута. Однако если бы на четырех изображениях она была перевернута, а на двух нет, это запутало бы кинозрителя, поэтому здесь, как и в фильме, все изображения показаны неперевернутыми. *Прим. автора.*

**91.** В фильме спальня Мёрф не кубическая, ее длина, ширина и высота — 6, 4,5 и 3 метра, а зал Купера втрое больше по каждому из измерений — 18, 13,5 и 9 метров. Но для простоты здесь я считаю и спальню и зал кубами. *Прим. автора.*

**92.** Вариант отличается от итогового. Здесь (сверху посередине) мы видим невозможную фигуру (треугольник Пенроуза), изображениями которых прославился шведский художник Оскар Рутерсвард (1915–2002). В 1958 году статью о работах Рутерсварда написал английский математик Роджер Пенроуз. Под влиянием этой статьи в 1961 году голландский художник Мауриц Эшер создал знаменитую литографию «Водопад» (рис. 30.6). *Прим. ред.*

**93.** Крис и Пол называют эти залы «пустотами», поскольку через них не проходят стержни. *Прим. автора.*

**94.** Прозрачное с одной стороны зеркало. Такие можно видеть, например, в комнатах для допросов из фильмов о полицейских. *Прим. ред.*

**95.** Почему влево? Чтобы трубка всегда была в одном и том же поперечном положении в любой момент времени спальни. Подумайте об этом. *Прим. автора.*

**96.** Я могу с легкостью составить математическое описание искривления пространства — времени, которое позволит достичь этого — искривления, которое инженеры из балка могли бы попытаться создать искусственно, чтобы заставить гравитационный сигнал путешествовать

вперед в локальном времени балка и назад относительно времени спальни (см. технические примечания к этой главе в конце книги, особенно рис. НТП.1). Могут ли инженеры из балка произвести такое искривление на практике — вопрос законов квантовой гравитации, законов, которых не знаю я, но ключи к которым извлекает из сингулярности Гаргантюа ТАРС. *Прим. автора.*

**97.** Это, впрочем, оптическая иллюзия. *Прим. автора.*

**98.** Выражаясь научнее, камера на этом видео вместо черной дыры падает в максимально расширенное шварцшильдовское решение уравнений Эйнштейна, или решение Райсснера — Нордстрёма. *Прим. автора.*

**99.** Описание гравитации по Пачинскому — Виита было использовано в компьютерной игре по мотивам гравитационных прачей в «Интерстеллар» — для расчета влияния черной дыры на орбиты космолетов, см. [Game.InterstellarMovie.com](http://Game.InterstellarMovie.com). *Прим. автора.*

**100.** Связанные с этими расчеты см. в технических примечаниях к главе 27. *Прим. автора.*

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Предисловие*

### *Введение*

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

### I. ОСНОВЫ

#### 2. Вкратце о Вселенной

#### 3. Законы, управляющие Вселенной

#### 4. Искривления пространства и времени, приливная гравитация

#### 5. Черные дыры

### II. ГАРГАНТЮА

#### 6. Анатомия Гаргантюа

#### 7. Гравитационные прачи

#### 8. Внешний вид Гаргантюа

#### 9. Диски и джеты

#### 10. Случай — краеугольный камень эволюции

### III. ЗЕМЛЯ В БЕДЕ

#### 11. Болезнь растений

12. Задыхаясь без кислорода

13. Межзвездный перелет

#### IV. ЧЕРВОТОЧИНА

14. Червоточины

15. Внешний вид червоточины в «Интерстеллар»

16. Обнаружение червоточины: гравитационные волны

#### V. ИССЛЕДУЕМ ОКРЕСТНОСТИ ГАРГАНТЮА

17. Планета Миллер

18. Вибрации Гаргантюа

19. Планета Манн

20. «Эндюранс»

#### VI. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ФИЗИКА

21. Четвертое и пятое измерения

22. Сущности из балка

23. Ограничение гравитации

24. Гравитационные аномалии

25. Уравнение профессора

26. Сингулярности и квантовая гравитация

#### VII. КУЛЬМИНАЦИЯ

27. Кромка кратера

28. Внутрь Гаргантюа

29. Тессеракт

30. Передача сообщений в прошлое

31. Эвакуация колоний с Земли

*Где узнать больше?*

*Некоторые технические примечания*

*Благодарности*

*Библиография*

МАКСИМАЛЬНО ПОЛЕЗНЫЕ КНИГИ ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА «МАНН, ИВАНОВ И ФЕРБЕР»

Если у вас есть замечания и комментарии к содержанию, переводу, редактуре и корректуре, то просим написать на [email protected], так мы быстрее сможем исправить недочеты.

**Наши электронные книги:**

<http://www.mann-ivanov-ferber.ru/ebooks/>

**Заходите в гости:**

<http://www.mann-ivanov-ferber.ru/>

<http://blog.mann-ivanov-ferber.ru/>

<http://www.facebook.com/mifbooks>

<http://vk.com/mifbooks>

<https://twitter.com/mifbooks>

Дерево знаний

Предложите нам книгу

Ищем правильных коллег

**Для корпоративных клиентов:**

Полезные книги в подарок

Корпоративная библиотека

Книги ищут поддержку

НАД КНИГОЙ РАБОТАЛИ

Главный редактор *Артем Степанов*

Ответственный редактор *Мария Красовская*

Арт-директор *Алексей Богомолов*

Редактор *Борис Моносов*

Верстка *Елена Бреге*

Обложка *Андрей Макаренко*

Корректоры *Лев Зелексон, Мария Молчанова*

**ООО «Манн, Иванов и Фербер»**

mann-ivanov-ferber.ru

Электронная версия книги

подготовлена компанией Webkniga, 2015

webkniga.ru

mir-knigi.org