

НАУКА
ЗА КАДРОМ
ИНТЕРСТЕЛЛАР

КИП ТОРН

ПРЕДИСЛОВИЕ КРИСТОФЕРА НОЛАНА.



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 7

Введение 9

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

I. ОСНОВЫ

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

II. ГАРГАНТЮА

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

III. ЗЕМЛЯ В БЕДЕ

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

IV. ЧЕРВОТОЧИНА

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

V. ИССЛЕДУЕМ ОКРЕСТНОСТИ ГАРГАНТЮА

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

VI. ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ФИЗИКА

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

VII. КУЛЬМИНАЦИЯ

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

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

Вкратце о Вселенной

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

Большой взрыв

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

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

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

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

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

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

Галактики

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

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

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

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

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

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

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

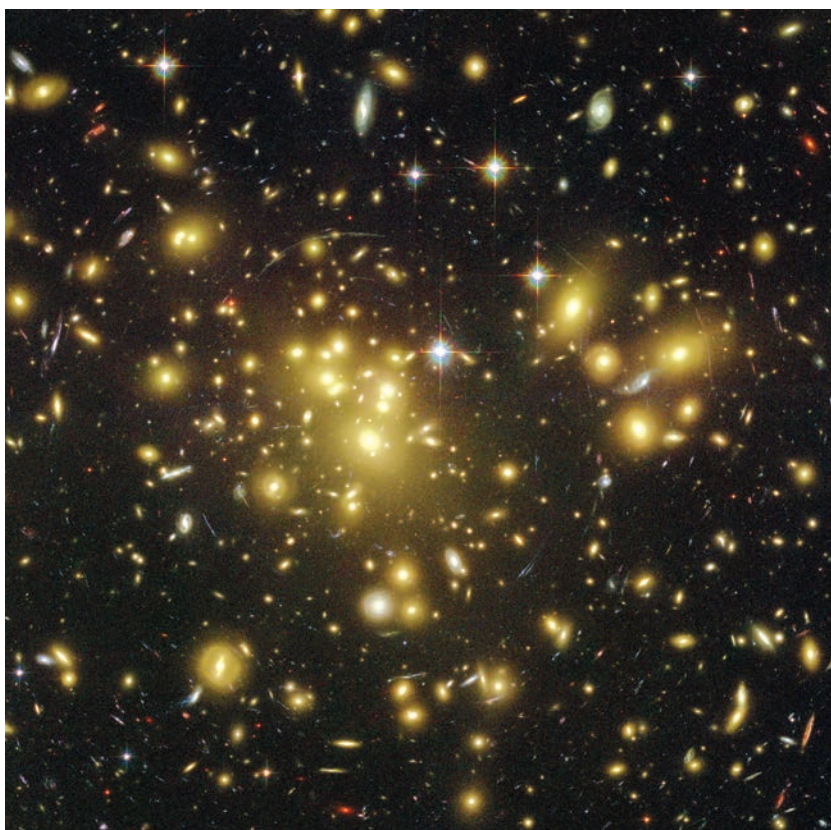


Рис. 2.1. Массивное скопление галактик под названием Abell 1689 и множество более отдаленных галактик; сфотографировано космическим телескопом «Хаббл»

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

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

Солнечная система

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

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

Рис. 2.2. Галактика Андромеды

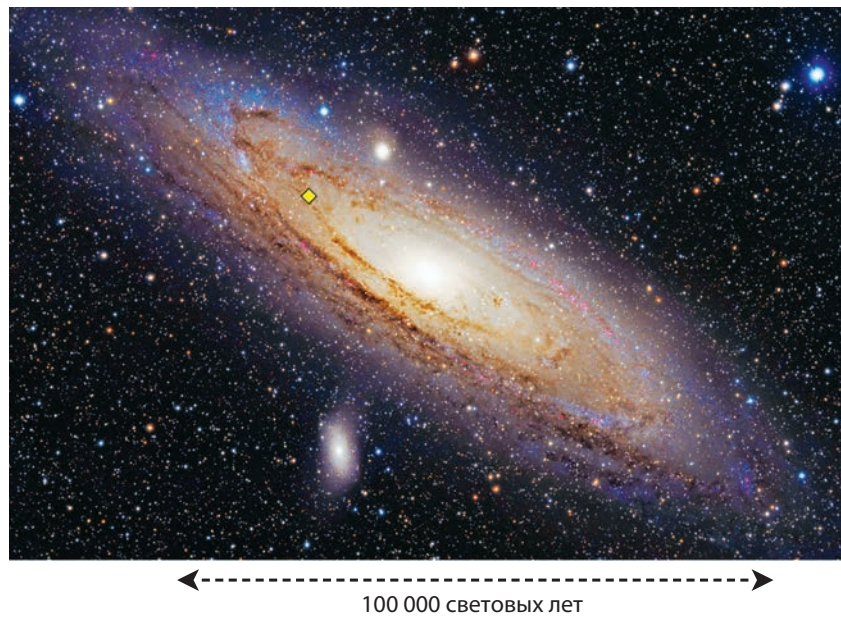
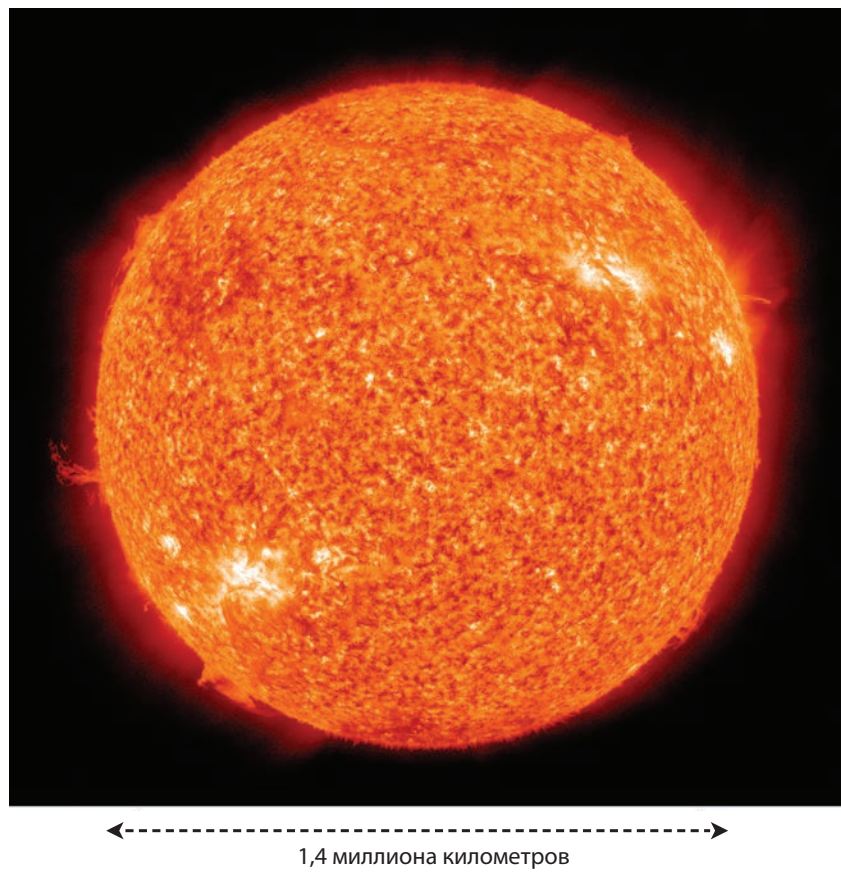
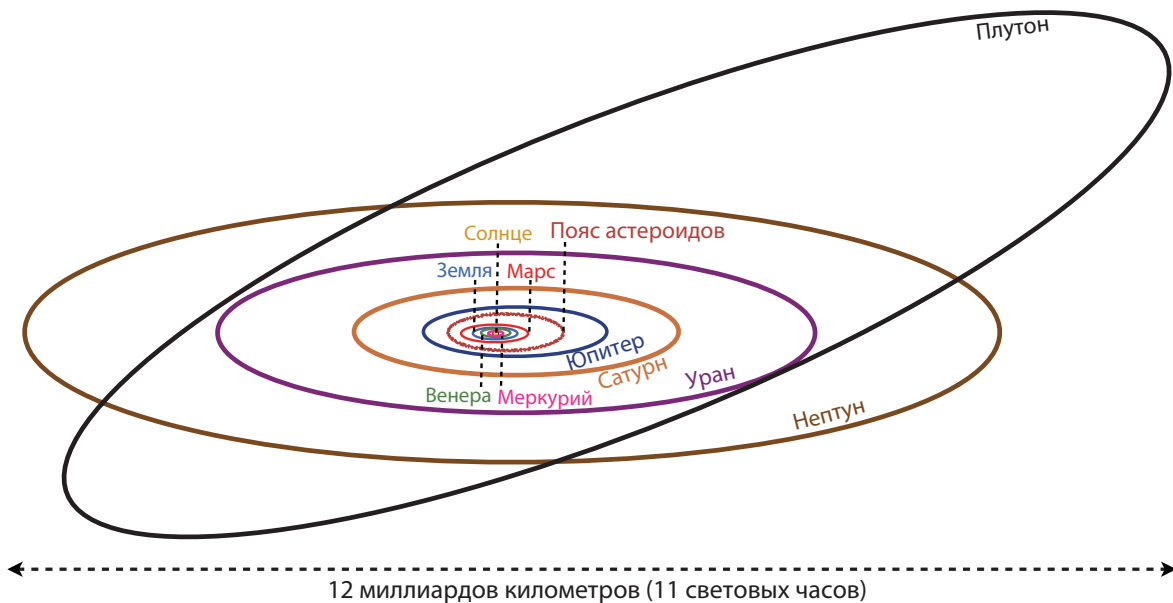


Рис. 2.3. Солнце, сфотографированное Обсерваторией солнечной динамики NASA





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

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

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

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

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

Звездная смерть: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры

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

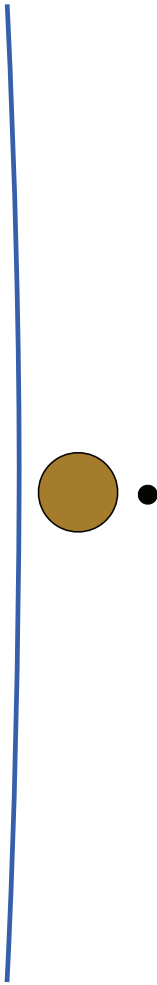


Рис. 2.5. Белый карлик (слева), нейтронная звезда (посередине) и черная дыра (справа), которые весят в 1,2 раза больше Солнца. Здесь показана лишь малая часть поверхности белого карлика

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

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

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

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

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

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

Магнитные, электрические и гравитационные поля

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

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

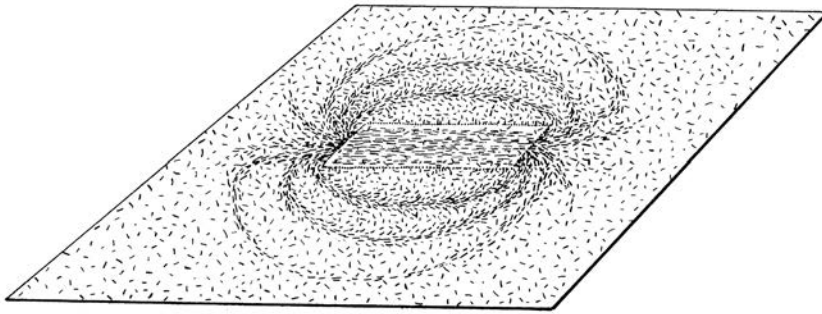


Рис. 2.6. Силовые линии магнитного поля вокруг магнитного бруска видны благодаря рассыпанным по листу бумаги железным опилкам (Рисунок Мэтта Зимета по моему наброску; из моей книги «Черные дыры и складки времени: дерзкое наследие Эйнштейна» [Торн 2009].)

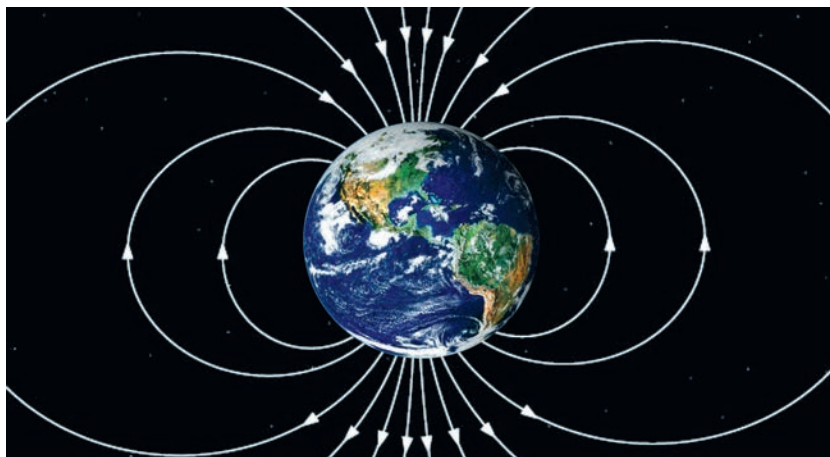
Наверное, на уроках физики вам уже приходилось иметь дело с силовыми линиями магнитного поля, когда вы ставили простой, но очень эффектный опыт. Помните, берешь листок бумаги, накрываешь им магнитный брусок и сыпешь сверху железные опилки? Опилки при этом складываются в узор, как на рис. 2.6. Они выстраиваются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

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



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

Рис. 2.8. Силовые линии магнитного поля Земли



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

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

Рис. 2.9. Полярное сияние над Хаммерфестом, Норвегия



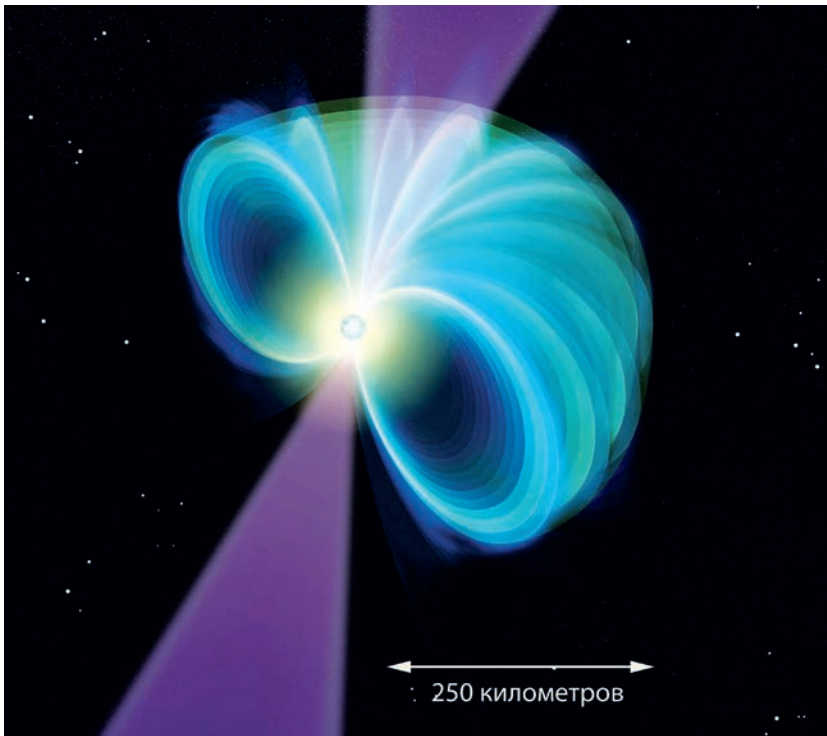


Рис. 2.10. Условное изображение нейтронной звезды с магнитным полем в форме пончика и джетами

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

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

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

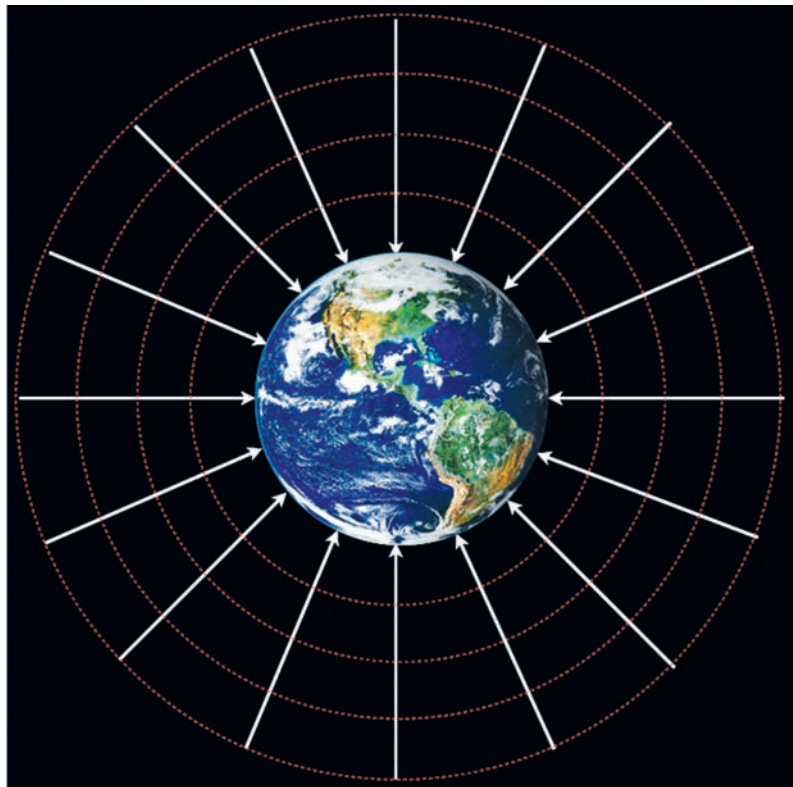
* Механизм верно описан для полярного сияния на Земле. Для других планет наиболее яркие линии в спектре излучения определяются составом атмосферы. Так, для Юпитера наиболее яркой будет линия излучения водорода в ультрафиолетовом спектре. *Прим. науч. ред.*

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

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

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

Рис. 2.11. Силовые линии гравитационного поля Земли



Законы, управляющие Вселенной

Эпоха великих негеографических открытий

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

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

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



Мартин Вальдземюллер, 1506



Абрахам Ортелиус, 1570

Рис. 3.1. Карты мира



Эмануэль Боуэн, 1744

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

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