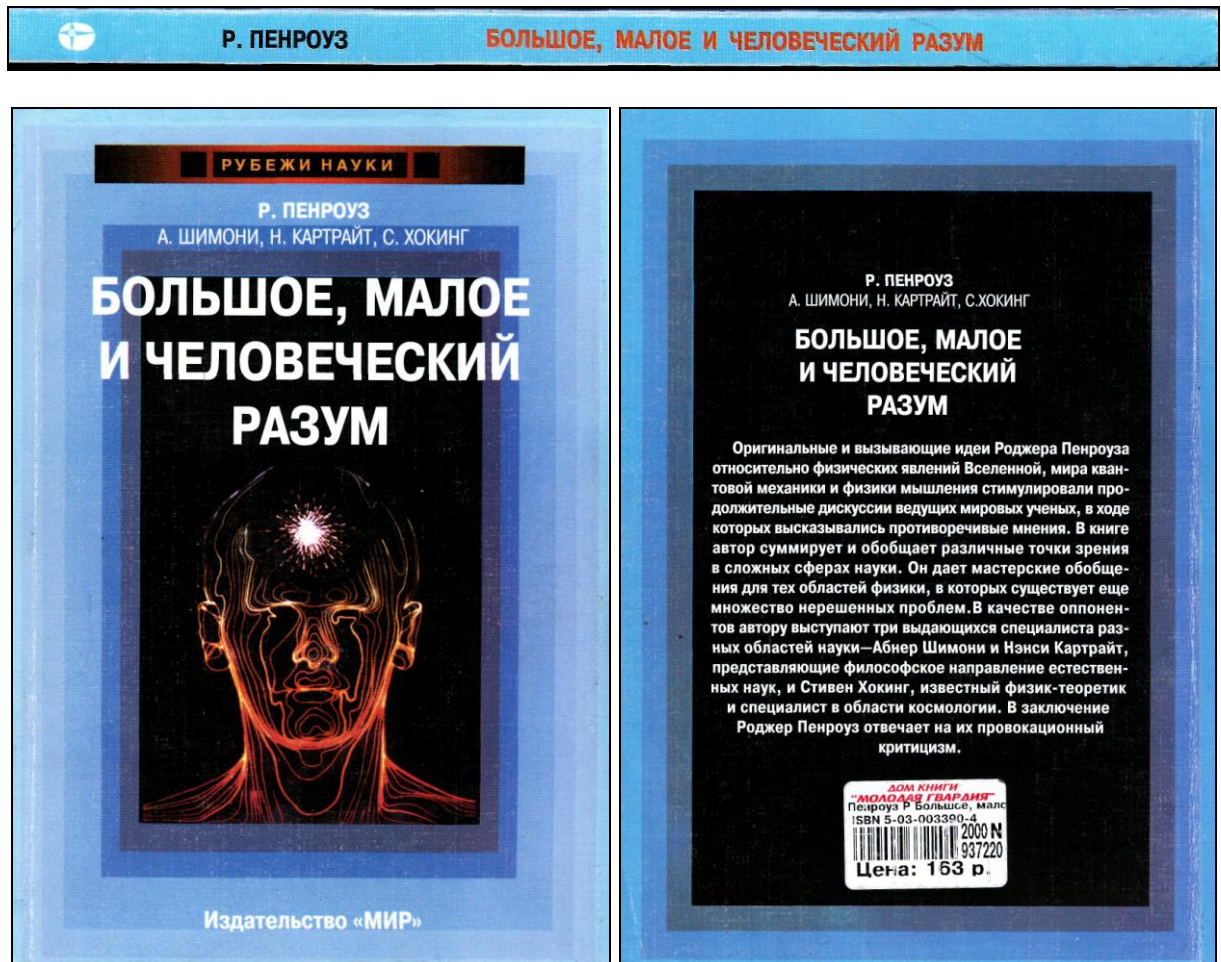


Сканирование и форматирование: Янко Слава (Библиотека Fort/Da) || slavaaa@yandex.ru ||
yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Исq# 75088656 || Библиотека:
<http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - внизу. Книга издана без окончания
update 27.08.06



БОЛЬШОЕ, МАЛОЕ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ РАЗУМ

**THE LARGE,
THE SMALL AND
THE HUMAN MIND**

ROGER PENROSE

with

**ABNER SHIMONY,
NANCY CARTWRIGHT and
STEPHEN HAWKING**

edited by **MALCOLM LONGAIR**



**CAMBRIDGE
UNIVERSITY PRESS**

РУБЕЖИ НАУКИ

Р. ПЕНРОУЗ

А. ШИМОНИ, Н. КАРТРАЙТ, С. ХОКИНГ под редакцией М.
ЛОНГЕЙРА

**БОЛЬШОЕ, МАЛОЕ И
ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ
РАЗУМ**

Перевод с английского канд. физ.-мат. наук А. В. Хачояна
под редакцией Ю. А. Данилова



Москва «Мир» 2004

УДК 53 ББК 22.31 П25

Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. П25 Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

ISBN 5-03-003390-4

Книга написана известным английским ученым-астрофизиком и популяризатором науки Роджером Пенроузом на основе престижных Теннеровских лекций (прочитанных им в 1995 г.) и материалов вызванной этими лекциями полемики. Поэтому она включает в себя разделы, написанные крупными английскими учеными Нэнси Картрайт и Абнером Шимони, а также знаменитым физиком-теоретиком Стивеном Хокингом. Книгу отличают оригинальность идей автора, разнообразие обсуждаемых проблем (парадоксы квантовой механики, астрофизика, теория познания, проблемы художественного восприятия) и исключительно высокий научный и философский уровень изложения.

Для широкого круга читателей (от физиков-теоретиков до искусствоведов), интересующихся историей и философией науки.

УДК 53 ББК 22.31

Редакция литературы по физике и астрономии

© Cambridge University Press, 1997 © Перевод на русский язык, оформление «Мир», 2004

Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

ISBN 5-03-003390-4 (русск.) ISBN 0-521-65538-2 (англ.)

Электронное оглавление

Электронное оглавление	3
Об авторах	5
ЗАИМСТВОВАННЫЕ РИСУНКИ.....	5
Предисловие переводчика	6
Предисловие. Малкольм Лонгейр	6
Глава 1. Пространство-время и космология.....	9
Рис. 1.1.....	10
Рис. 1.2.....	10
Рис. 1.3.....	11
Рис. 1.4. Характерное время и размеры некоторых объектов и процессов Вселенной.....	12
Рис. 1.5.....	13
Рис. 1.6. Единое пространство-время в механике Галилея—Ньютона. Прямые линии соответствуют равномерно движущимся частицам.	14
Рис. 1.7. Распространение световой вспышки в пространстве-времени (<i>a</i>) и пространстве(<i>b</i>). 15	
Рис. 1.8. Описание движения частицы в пространстве-времени специальной теории относительности	16
Рис. 1.9. Относительность понятия одновременности в специальной теории относительности Эйнштейна.....	16
Рис. 1.10. Картина звездного неба для двух различных наблюдателей.....	17
Рис. 1.11. Искривленное пространство-время.....	18
Рис. 1.12.....	19
Рис. 1.13.....	20
Рис. 1.14.....	21
Рис. 1.15.....	22
Рис. 1.16.....	25
Рис. 1.17. М. Эшер. «Предельная окружность 4» (представление геометрии Лобачевского). ...	26
Рис. 1.18. <i>a</i> — треугольник в евклидовом пространстве; <i>b</i> — треугольник в пространстве Лобачевского.....	26
Рис. 1.19. Гравюра М. К. Эшера «Предельная окружность 1».....	27
Рис. 1.20. Некоторые особенности гиперболической геометрии (пространства Лобачевского), поясняющие построения гравюры «Предельная окружность 1».....	28
Рис. 1.21. Пространство Лобачевского, «вложенное» (в виде гиперboloидов) в пространство- время Минковского.....	28
Рис. 1.22. Результаты измерений спектра космического микроволнового фонового излучения	30
Рис. 1.23.....	31
Рис. 1.24. Законы механики обратимы относительно времени, однако в реальной жизни события всегда протекают в последовательности слева направо (показанной на рисунке), а не наоборот.....	32
Рис. 1.25. Второе начало термодинамики в действии.....	32
Рис. 1.26.....	33
Рис. 1.27. Попытка изображения проблемы «внутренне присущей» неупорядоченности Вселенной на ранней стадии развития.....	34
Рис. 1.28.....	34
Рис. 1.29.....	36
Рис. 1.30.....	36
Глава 2. Тайны квантовой механики	37
Рис. 2.1.....	38
Рис. 2.2. Эксперимент по рассеянию монохроматических фотонов при использовании перегородки с двумя щелями.....	39
Рис. 2.3.....	40
Рис. 2.4. Сфера Римана.....	42
Рис. 2.5.....	44
Рис. 2.6.....	45
Рис. 2.7. Кот Шредингера.....	47
Рис. 2.8.....	47
Рис. 2.9.....	49
Рис. 2.10.....	49

Рис. 2.12.	50
Рис. 2.13.	51
Рис. 2.15.	52
Рис. 2.16.	52
Рис. 2.17.	53
Рис. 2.18.	53
Рис. 2.19. Как связана планковская длина (10^{-33} см) с задачей редукции квантовых состояний?	54
Рис. 2.20.	55
Рис. 2.21. Полная масса-энергия гравитирующей системы с учетом различной локализации масс.	56
Рис. 2.22.	57
Глава 3. Физика и разум	58
Рис. 3.1. «Третий мир», предложенный Карлом Поппером.	58
Рис. 3.2.	59
Рис. 3.3. Три мира и три тайны.	60
Рис. 3.4.	61
Таблица 3.1	63
Рис. 3.5. Белые начинают и добиваются ничьей.	64
Рис. 3.6. Белые начинают и добиваются ничьей.	65
Таблица 3.2	66
Рис. 3.7.	69
Рис. 3.8. Император Альберт в книге «Тени разума» спорит с Математически Обоснованной Киберсистемой.	70
Рис. 3.9. Ребенок вполне способен воспринимать мир абстрактных платоновских идей, рассматривая простые рисунки.	70
Рис. 3.10. Невычисляемая, но детерминистическая игрушечная модель вселенной, различные состояния которой задаются парой конечных наборов полимино.	72
Рис. 3.11.	73
Рис. 3.12. Набор из трех типов плиток полимино может заполнить плоскость целиком, но заполняющий узор не обладает периодичностью.	73
Рис. 3.13. При достаточно строгом заполнении пространства-времени световыми конусами могут возникать замкнутые времениподобные мировые линии.	74
Рис. 3.14. Схема работы нейрона, связанного с другими нейронами через синапсы.	75
Рис. 3.15.	76
Рис. 3.16. Инфузория-туфелька.	77
Рис. 3.17.	77
Рис. 3.18. Микротрубка имеет вид полого цилиндра, обычно составленного из 13 «колонок» димеров тубулина.	78
Рис. 3.19.	79
Рис. 3.20.	81
Рис. 3.21. Невозможный треугольник.	82
ЛИТЕРАТУРА	83
Глава 4. О мышлении, квантовой механике и актуализации возможностей. Абнер Шимони	84
ВВЕДЕНИЕ	84
4.1. О РОЛИ И МЕСТЕ МЫШЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ	84
4.2. ПРИМЕНИМОСТЬ ИДЕЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ К ПРОБЛЕМЕ СВЯЗИ СОЗНАНИЯ И ТЕЛА	87
4.3. ПРОБЛЕМА АКТУАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ	90
ПРИМЕЧАНИЯ	91
Глава 5. Почему именно физика? Нэнси Картрайт	92
ПРИМЕЧАНИЯ	95
Глава 6. Возражения убежденного редукциониста. Стивен Хокинг	95
Глава 7. Ответы Роджера Пенроуза	97
ОТВЕТ АБНЕРУ ШИМОНИ	97
ОТВЕТ НЭНСИ КАРТРАЙТ	99
Далее книга оборвана	101



Оригинальные, яркие и вызывающие идеи Роджера Пенроуза относительно процессов, протекающих в гигантском мире Вселенной, в микромире квантовой физики и в мозгу человека, не раз становились предметом острой полемики и дискуссии. Некоторые из этих идей уже знакомы читателям по его предыдущим книгам: *The Emperor's New Mind* («Новый разум короля») и *Shadows of the Mind* («Тени разума»). В предлагаемой книге Пенроуз обобщает и развивает их дальше, а также дает прекрасный обзор многих нерешенных проблем современной физики. Выдвигаемые Пенроузом радикальные концепции позволяют по-новому объяснять работу мозга и природу человеческого сознания.

В полемику с автором в этой книге вступили трое ученых, связанных с различными научными дисциплинами, — известные специалисты по философии науки Абнер Шимони и Нэнси Картрайт, а также знаменитый физик-теоретик и астрофизик Стивен Хокинг. В последней главе книги Роджер Пенроуз, продолжая эту исключительно интересную дискуссию, отвечает своим оппонентам. Читатель получает возможность ознакомиться с собственной, весьма нестандартной (иногда даже шуточной) точкой зрения крупнейшего физика-теоретика на самые важные проблемы современной науки.

Издательство Cambridge University Press во многом обязано сотрудничеству с президентом и членами общества «Клер Холл», Кембридж, под чьим покровительством проводились Теннеровские лекции 1995 г. по общечеловеческим ценностям, породившие данную книгу.

Об авторах

РОДЖЕР ПЕНРОУЗ Роузболловский профессор*, профессор математики Оксфордского университета

АБНЕР ШИМОНИ почетный профессор философии и физики Бостонского университета

НЭНСИ КАРТРАЙТ профессор философии, логики и науковедения Высшей Лондонской школы экономики и политики (LSE)

СТИВЕН ХОКИНГ Лукасианский профессор* Кембриджского университета

ЗАИМСТВОВАННЫЕ РИСУНКИ

The Emperor's New Mind, R. Penrose, 1989. Oxford: Oxford University Press. 1.6, 1.8, 1.11, 1.12, 1.13, 1.16(a), (b) and (c), 1.18, 1.19, 1.24, 1.25, 1.26, 1.28(a) and (b), 1.29, 1.30, 2.2, 2.5(a), 3.20.

Shadows of the Mind, R. Penrose, 1994. Oxford: Oxford University Press. 1.14, 2.3, 2.4, 2.5(b), 2.6, 2.7, 2.19, 2.20, 3.7, 3.8, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.16, 3.17, 3.18.

High Energy Astrophysics, Volume 2, M. S. Longair, 1994. Cambridge: Cambridge University Press. 1.15, 1.22.

С разрешения Cordon Art-Vaarn-Holand © 1989. 1.17, 1.19.

Профессора на кафедрах, учрежденных в честь Роуза Болла и Лукаса. Честь занимать «именные» кафедры предоставляется только выдающимся ученым. Например, профессорами Лукасианской кафедры были Ньютон и Дирак. — *Прим. ред.*

Предисловие переводчика

Сложность и многообразие вопросов, рассматриваемых в книге Р. Пенроуза, требуют предварить ее перевод хотя бы весьма краткими замечаниями. Во-первых, как убедительно демонстрирует сам автор, квантовая механика далека не только от завершенности, но и от единства методологического подхода. За десятки лет споров о принципах квантовой физики накопилась огромная по объему литература по многим из рассматриваемых вопросов (например, о знаменитом коте Шредингера уже написаны целые библиотеки). В этом чудовищном массиве информации философские, методологические и научные противоречия естественным образом давно переросли (или переродились) в лингвистические и терминологические. Читатель может получить некоторое представление о современном состоянии вопроса по статье М. Б. Менского «Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов» (Успехи физических наук, том 170, № 6, 2000, с. 631) и вызванной ею дискуссии (УФН, 2001; т. 171, №4, с. 437-462; УФН, 2001; т. 171, № 6, с. 625-647).

Особые трудности возникают при переводе разделов, относящихся к предлагаемой Р. Пенроузом гипотезе о квантовом характере человеческого сознания. Термины, связанные с психологией (типа русских *душа, мысль, сознание, осознание* или английских *mind, awareness, conscious*), не только плохо определены и расплывчаты (по сравнению с физическими), но и гораздо хуже поддаются переводу (например, широко используемое Пенроузом понятие *intelligence* практически не имеет однозначной русской трактовки).

Эти обстоятельства весьма осложняют перевод небольшой по объему книги, но переводчик и редактор все же надеются, что им удалось сохранить оригинальный и вольный стиль автора и достаточно верно передать сложный ход его рассуждений.

А. В. Хачоян

Предисловие. Малкольм Лонгейр

За последнее десятилетие появилось немало книг, в которых выдающиеся ученые современности пытаются объяснить широкому читателю сущность и исключительный интерес проводимых ими исследований в различных областях знаний. Наиболее известными из них стали знаменитая «Краткая история времени» Стивена Хокинга (которая имела столь поразительный успех, что ее издание стало заметным явлением в истории мировой научно-популярной литературы), книга Джеймса Глейка «Хаос» (в которой успешно показано, что сложнейшие научные изыскания иногда похожи на захватывающий детектив) и «Мечты об окончательной теории» Стивена Вайнберга, сделавшая понятными и интересными самые последние достижения в физике элементарных частиц.

Даже среди таких известных работ предыдущая книга Роджера Пенроуза «Новый разум короля» (1989 г.) выделяется своей неординарностью. В то время как другие авторы обычно пытаются просто передать смысл и значение достижений современной науки, Роджер рискнул предложить читателям совершенно новую, временами ошеломляющую возможность существования какой-то, (пока даже не сформулированной до конца) теории фундаментальных процессов, позволяющей объединить почти не связанные друг с другом теории, относящиеся к самым разнообразным наукам (физике, математике, биологии, нейрофизиологии и даже философии). Неудивительно, что книга «Новый разум короля» вызвала ожесточенную полемику, в результате чего автору пришлось в 1994 г. опубликовать книгу «Тени разума», в которой он попытался не только ответить своим многочисленным критикам, но и развить дальше предложенные идеи. В 1995 г. Р. Пенроуз был приглашен прочесть известные Теннеровские лекции, где он представил общий обзор своей концепции и призвал к дискуссии своих наиболее известных оппонентов, Абнера Шимони, Нэнси Картрайт и Стивена Хокинга. Три лекции цикла составили первые три главы предлагаемой читателю книги, содержащие краткое введение в круг

9

идей, детально разработанных автором в упомянутых выше книгах. Следующие три главы (4-6) содержат аргументы упомянутых участников дискуссии, а в последней главе 7 Пенроуз комментирует полученные замечания и подытоживает результаты дискуссии.

Собственно говоря, написанные Пенроузом разделы достаточно красноречивы, и поэтому мое предисловие имеет целью лишь подготовить читателя к обсуждению некоторых довольно сложных проблем современной науки, рассматриваемых ниже. Р. Пенроуз считается одним из

самых блестящих математиков современности, но его исследования всегда имели весьма строгое физическое обоснование. Международное признание и славу он снискал своими достижениями в астрофизике и космологии, относящимися к релятивистской теории гравитации, причем многие работы были выполнены им совместно со Стивеном Хокингом. Одна из сформулированных им теорем в этой области доказывает, что (в соответствии с классической релятивистской теорией гравитации) внутри так называемых черных дыр возникают физические сингулярности пространства-времени, т. е. в некоторых точках искривленность пространства (или соответственно плотность материи) становится бесконечно большой. Вторая теорема о «бесконечности» утверждает, что классическая релятивистская теория гравитации неизбежно приводит к сингулярностям такого типа в космологических моделях, связанных с Большим Взрывом. Эти теоремы показывают, что используемые нами теории еще весьма далеки от завершенности, поскольку в замкнутых и зрелых физических построениях такие сингулярности не должны возникать.

Эти работы представляют собой лишь часть обширного вклада Р. Пенроуза в различные разделы физики и математики. Физикам хорошо знаком процесс Пенроуза (при котором частицы поглощают энергию вращения в черных дырах), и они широко пользуются созданными им диаграммами для описания поведения вещества в окрестности черных дыр. Красивая геометрия (временами напоминающая живопись) многих таких явлений наглядно представлена самим автором в первых трех главах книги. Некоторые аспекты рассматриваемых проблем уже широко известны публике по «невозможным» построениям и картинам знаменитого художника Мориса Эшера и так называемым «мозаикам» самого Пенроуза. Интересно, что М. Эшера на создание некоторых гравюр (именно тех, на которых сделана попытка изобразить «невозможное») вдохновила одна из статей, напи-

10

санных Р. Пенроузом и его отцом Л. С. Пенроузом. В гл. 1 гиперболические геометрические построения Пенроуза проиллюстрированы известной серией гравюр М. Эшера «Предельные окружности». В связи с этим нельзя не упомянуть созданные самим Пенроузом «мозаики», или «изразцы», которые позволяют полностью покрыть бесконечную плоскость небольшим числом разновидностей простых геометрических фигур заданного типа. Основная и самая интересная математическая сторона проблемы состоит в том, что узор, позволяющий решить эту задачу, является неповторяющимся. Эта геометрическая задача неожиданно возникает в гл. 3 книги в связи с возможностью определения строгих вычислительных операций для компьютеров.

Пенроузу удалось не только разработать ряд блестящих математических подходов, но и успешно применить их для решения сложнейших конкретных задач современной физики. Рассматриваемые им вопросы всегда оказываются очень важными и интересными. Сейчас физики уверены, что теория Большого Взрыва дает нам достаточно верную картину возникновения Вселенной, однако она еще далека от завершенности, и мы пока не знаем многих фундаментальных законов, определяющих ее основные особенности в возрасте от одной тысячной секунды после рождения до наших дней. Для воссоздания полной картины нам еще предстоит определить начальные условия, однако все известные нам законы физики относятся лишь к достаточно «старой» Вселенной, возраст которой превышает упомянутый рубеж в одну тысячную долю секунды. Поэтому мы еще должны разумным образом экстраполировать известные нам закономерности. Мы уже достаточно хорошо представляем себе требуемые начальные условия, но очень мало знаем о порождающих их причинах, и эта проблема остается центральной для всей современной космологии.

Обычно в космологии используют модель раздувающейся (инфляционной) Вселенной, однако даже в этой модели для описания некоторых особенностей процесса необходимо ввести параметры, характерные для ранней, так называемой планковской эпохи развития Вселенной (10^{-43} с), когда в этот исключительно короткий период произошли важнейшие события, последствия которых и пытается описать современная наука.

Принимая в целом привычную картину Большого Взрыва, Роджер Пенроуз отказывается от инфляционной модели и предполагает, что на самой ранней стадии развитие Вселенной определялось еще неизвестными нам физическими законами, свя-

11

занными с квантовой теорией гравитации. Он считает, что многочисленные попытки построения такой теории не увенчались успехом именно потому, что задача была неправильно поставлена теоретически. Его аргументы связаны прежде всего с проблемой определения

энтропии Вселенной, рассматриваемой в качестве единого объекта. Поскольку энтропия (очень упрощенно — степень неупорядоченности системы) возрастает со временем, Вселенная должна была возникнуть из весьма упорядоченного состояния с очень низкой энтропией. Вероятность случайного появления такого состояния исчезающе мала, вследствие чего Пенроуз предположил, что задача может быть решена только в рамках точной теории квантовой гравитации.

В гл. 2 рассматриваются общие проблемы квантования и квантовой физики, которая (вместе со своим релятивистским обобщением — квантовой теорией поля) уже давно и очень успешно применяется для описания свойств отдельных атомов и частиц, а также для объяснения экспериментальных результатов в ядерной физике. Однако лишь в последние годы мы стали понимать глубокий физический смысл этой теории. Пенроузу удалось блестяще продемонстрировать, что в ее внутренней структуре заложены весьма непростые (интуитивно неочевидные) представления, не имеющие аналогов в классической механике. Например, нелокальность означает, что при возникновении пары частица—античастица каждая из них сохраняет «память» о процессе рождения в том смысле, что эти частицы не могут считаться полностью независимыми друг от друга. Роджер объясняет это тем, что «квантовая запутанность объектов представляет собой удивительное явление, лежащее где-то между их разделением и объединением». Квантовая механика позволяет нам даже получать информацию о процессах, которые не произошли, но могли быть реализованы. Различие между классической и квантовой механикой особенно ярко проявляется в очень необычной (с привычной точки зрения) задаче о так называемом испытании бомб в эксперименте Элицура—Вайдмана.

Интуитивно неприемлемые особенности являются неотъемлемой частью квантовой механики, однако она ставит перед нами и более глубокие проблемы. Пенроуза особо интересует вопрос о том, каким образом в физике удастся связать квантовые явления с поведением систем на макроскопическом уровне. В этой весьма противоречивой ситуации многие физики используют квантовомеханические правила просто в качестве вычислительных приемов, позволяющих получать удивительно

12

точные решения. Такой подход, несмотря на его эффективность (правильно применяя некоторые методы, вы получаете безусловно верные ответы), в сущности означает лишь грубый и лишенный изящества переход от простого и линейного мира квантовых явлений к реальному миру экспериментатора. Переход осуществляется посредством так называемого «коллапса волновой функции» или «редукции вектора состояний». Пенроуз уверен, что при этом стандартном квантовомеханическом приеме теряется весьма значительная часть картины физического мира, и нам необходимо разработать совершенно новую теорию, которая будет как-то включать в себя указанную «объективную редукцию волновых функций». Такая теория при соответствующих предельных переходах будет сводиться к обычной квантовой механике и квантовой теории поля, но она должна описывать и новые физические явления (в частности, она должна позволить нам решить задачу квантования гравитационного поля и дать описание раннего периода развития Вселенной).

В гл. 3 Пенроуз пытается выявить общие черты, присущие математике, физике и человеческому сознанию. Если задуматься, то в самом деле поразительно, что в самых, казалось бы, логичных и абстрактных областях физики и математики не удается создать программы для привычных нам дискретных компьютеров (даже для самых точных и обладающих наибольшим объемом памяти). Все компьютеры практически не могут, например, доказывать математические теоремы, как это делают обычные люди-математики. Все это, с другой стороны, прекрасно согласуется с одним вариантом знаменитой теоремы Гёделя, которая в трактовке Пенроуза означает, что математические выводы (и, вообще говоря, все процессы, связанные с мышлением и поведением) осуществляются «невыхислимым» образом. Такое заключение представляется весьма плодотворным хотя бы потому, что интуитивно мы и сами чувствуем, что почти все наши акты «сознательного восприятия» нельзя свести к вычислимым операциям. Большая часть упомянутой выше предыдущей книги Пенроуза «Тени разума» была посвящена именно такой интерпретации теоремы Гёделя, имеющей особое значение для всех логических построений автора.

Пенроуз неожиданно усматривает много общего между принципиальными проблемами квантовой механики и процессов сознания. Например, он считает, что нелокальность и квантовая когерентность могут объяснить нам когерентность работы человеческого мозга, а «невыхислительный» характер процессов со-

13

знания может быть связан, по его мнению, с объективным коллапсом волновых функций макроскопических переменных. Пенроуз не только формулирует эти весьма общие принципы работы мозга, но и пытается непосредственно выявить в мозгу структуры, соответствующие указанным физическим процессам.

Разумеется, введение в книгу лишь очень слабо может отразить оригинальность, богатство и блеск предлагаемых автором идей и понятий, однако хотелось бы еще раз обратить внимание читателя на основные направления, играющие важную роль для понимания. Автора прежде всего поражает замечательная способность математики реально описывать фундаментальные процессы природы. Пенроуз убежден, что наш физический мир в каком-то смысле является проявлением платоновского мира математических идеалов. В наше время, конечно, никто не пытается вывести математику из попыток описания окружающего мира или из подгонки экспериментально наблюдаемых закономерностей к математическим формулам. В действительности мы сейчас пытаемся понять структуру Вселенной, исходя из некоторых весьма общих принципов и из законов самой математики.

Неудивительно, что предложенные в книге столь смелые гипотезы стали предметом ожесточенной полемики, в которую оказались вовлечены ученые самых разных специальностей и интеллектуальной направленности. Абнер Шимони во многом соглашается с Пенроузом (например, он признает незавершенность привычной формулировки квантовой механики и соглашается с тем, что некоторые квантовомеханические представления вполне подходят для описания работы мозга), однако он сравнивает Роджера Пенроуза с «альпинистом, который лезет не на ту гору», и готов предложить собственные конструктивные подходы к решению указанных задач. Нэнси Картрайт задается фундаментальными для философии вопросами о том, какие науки вообще должны лечь в основу понимания природы сознания и какова при этом роль физики. Она же поднимает в дискуссии весьма острую тему совместимости (или возможности сведения друг к другу) законов различных научных дисциплин. Наиболее критическим является раздел, написанный Стивеном Хокингом, старым другом и коллегой Пенроуза. По многим признакам именно позиция Хокинга ближе всего к точке зрения «среднего физика». Он предлагает автору прежде всего самому разработать процедуру детального восстановления (редукции) волновых функций. Впрочем, Хокинг вообще не считает, что мнение физиков о проблемах сознания имеет какую-то особую

14

ценность. Появление таких замечаний вполне закономерно, и Пенроуз пытается опровергнуть их в своем общем ответе, составившем заключительную главу книги.

Одну из поставленных перед собой задач Пенроуз, безусловно, решил с блеском — он создал некий манифест или программу развития теоретической физики XXI века. В трех первых главах книги ему удалось представить связную картину того, как должна быть «устроена» совершенно новая физика, основанная на общей идее невычислимости некоторых операций и объективного восстановления волновых функций, что и является основной идеей книги. Правильность предлагаемых концепций в конечном счете будет определяться тем, смогут ли Пенроуз и его последователи действительно создать физическую теорию нового типа. В любом случае, даже если работы по этой программе не приведут к быстрым успехам, ее основные идеи, по моему глубокому убеждению, окажут плодотворное влияние на будущее развитие теоретической физики и математики.

Глава 1. Пространство-время и космология



Предлагаемая читателю книга называется «Большое, малое и человеческий разум», и поэтому в полном соответствии с названием две ее первые главы посвящены самым большим и самым малым объектам в окружающей нас физической Вселенной, которую я с предельной схематичностью и простотой изобразил в виде «сферы» на рис. 1.1. Я не буду тратить время на чисто «ботанические» описания того, что и как происходит в разных частях Вселенной, а попробую обратить ваше внимание на анализ и понимание реальных законов, управляющих ее поведением. Основная причина, по которой я разделил физические законы на части, относящиеся к «большому» и «малому», заключается в том, что общие закономерности физических процессов в

очень большом и очень малом масштабах представляются весьма различными. Центральной темой гл. 3, где речь идет о человеческом сознании, является именно это бросающееся в глаза различие между законами природы для разномасштабных явлений. Поскольку я буду говорить о физическом мире на языке описывающих его физических теорий, я просто обязан сказать хоть что-то и о другом мире — мире Платона, философском представлении мира идей, абсолютов и математических истин. Конечно, платоновский мир содержит и другие абсолютные понятия (такие как Добро и Красота), но я в данном случае буду говорить лишь о математических принципах и понятиях. Некоторым людям трудно представить себе существование этого мира вообще, и они предпочитают считать математические понятия просто какими-то идеализированными формами объектов нашего физического мира, и в этом случае, конечно, «математический мир» следует рассматривать всего лишь как порождение нашего физического мира (рис. 1.2).

16

Рис. 1.1.



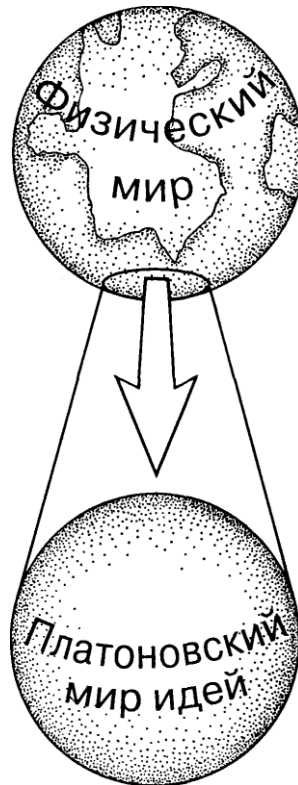
Я лично полагаю (и, мне кажется, большинство математиков и физиков-теоретиков придерживаются примерно той же точки зрения), что математика имеет другие, более серьезные основания и представляет собой некую структуру, управляемую собственными вневременными законами. Поэтому, возможно, многие физики и математики предпочли бы считать физический мир порождением «вневременного» математического мира идей. Соответствующая картина (рис. 1.3) при всей ее простоте очень важна для рассматриваемых в этой книге проблем (в особенности это относится к материалу гл. 3).

Наиболее замечательной характеристикой законов природы является то, что они подчиняются математическим закономерностям с исключительно высокой точностью. Чем глубже мы понимаем законы природы, тем сильнее чувствуем, что физический мир как-то исчезает, «испаряется», и мы остаемся лицом к лицу с чистой математикой, т. е. имеем дело лишь с миром математических правил и понятий.

Прежде чем перейти к дальнейшему рассмотрению, нам следует оценить временные и пространственные масштабы Вселенной и как-то связать их с местом и ролью человека в общей картине мира. Я сделал попытку объединить масштабы некоторых известных объектов и процессов в единую диаграмму (рис. 1.4), где слева представлены характерные времена, а справа — харак-

17

Рис. 1.2.

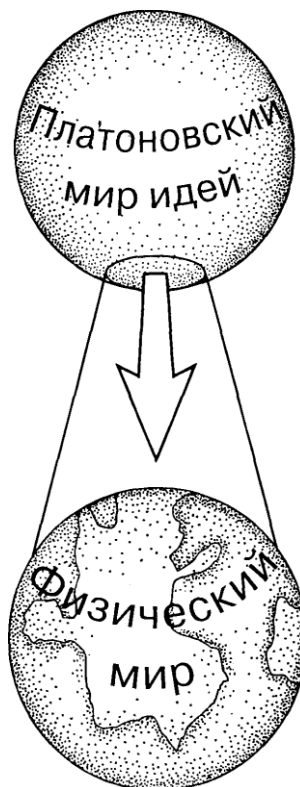


терные размеры. В нижнем левом углу рисунка указан минимальный масштаб времени, имеющий какой-то физический смысл. Этот интервал времени, равный 10^{-43} с, называется *планковским временем*, или «хрономом», и он намного короче продолжительности всех известных нам процессов, включая очень краткие процессы физики элементарных частиц (например, время существования самых короткоживущих частиц-резонансов составляет около 10^{-23} с). Выше по диаграмме в логарифмическом масштабе указана длительность некоторых известных процессов, вплоть до возраста Вселенной.

Справа на диаграмме приведены расстояния, соответствующие определенным временным масштабам. Времени Планка (хронону) соответствует фундаментальная единица, называемая *планковской длиной*. Две эти величины естественным образом

18

Рис. 1.3.



возникают при любой попытке объединить физические теории, описывающие очень большие и очень малые объекты (речь идет об общей теории относительности Эйнштейна и квантовой механике). При любом сочетании вариантов этих теорий длина и время Планка выступают в качестве фундаментальных единиц измерения. Переход от левой шкалы диаграммы к правой осуществляется умножением на скорость света, что позволяет легко сопоставлять любой промежуток времени с расстоянием, проходимым световым сигналом за это время.

Размеры физических объектов на рисунке изменяются от 10^{-15} м (характерный размер элементарных частиц) до 10^{27} м (радиус наблюдаемой Вселенной, приблизительно соответствующий ее возрасту, умноженному на скорость света). Интересно оценить положение, которое на диаграмме занимаем *мы*, люди.

19

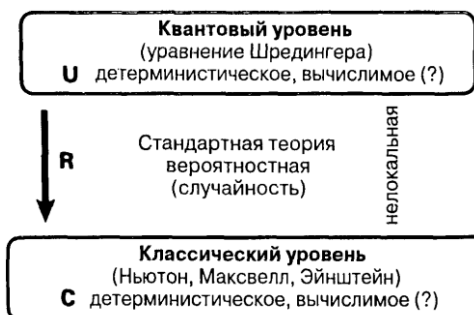
Рис. 1.4. Характерное время и размеры некоторых объектов и процессов Вселенной.



На шкале размеров мы находимся где-то в середине, будучи чрезвычайно крупными по отношению к длине Планка (и превышая на много порядков размеры элементарных частиц), но очень маленькими в масштабах всей Вселенной. С другой стороны, на временной шкале процессов длительность человеческой жизни выглядит совсем неплохо, и ее можно сопоставлять с возрастом Вселенной! Люди (и в особенности поэты) любят жаловаться на эфемерность человеческого существования, однако наше место на временной шкале вовсе не является жалким или ничтожным. Разумеется, нам следует помнить, что все сказанное относится к «логарифмической шкале», однако ее использование представляется совершенно оправданным при рассмотрении столь гигантских диапазонов значений. Говоря другими словами, число человеческих жизней, укладываемых в возрасте

20

Рис. 1.5.



Вселенной, намного меньше, чем число времен Планка (или даже времен жизни элементарных частиц), укладываемых в продолжительность жизни человека. В сущности, мы являемся довольно стабильными структурами Вселенной. Что же касается пространственных масштабов, то мы действительно находимся где-то в середине шкалы, вследствие чего нам не дано воспринимать в непосредственных ощущениях ни очень большие, ни очень малые объекты окружающего нас физического мира.

Давайте рассмотрим, какие физические теории описывают объекты столь различных размеров. В схему рис. 1.5 я попытался «втиснуть» всю существующую физику. При этом мне, конечно, пришлось пожертвовать многими незначительными деталями (например, просто выкинуть из картины все уравнения и разделы наук!), однако, на мой взгляд, я сохранил фундаментальные теории.

Наиболее существенным обстоятельством является то, что в физике используются два

совершенно разных подхода. Для описания поведения микрообъектов мы используем квантовую механику (я обозначил ее на рисунке словами «квантовый уровень»), о которой подробнее рассказано в гл. 2. Большинство людей полагают, что квантовая механика является странной, загадочной и недетерминистической теорией, но это неверно. На самом деле, если вы рассматриваете события на квантовом уровне, то квантовая теория является совершенно точной и детерминистической. Наиболее известным ее соотношением является уравнение Шредингера, которое определяет поведение физического состояния квантовой системы (его называют просто *квантовым состоянием*) и, безусловно, является совершенно точным и детерминистическим. Я использую букву U для обозначения всех расчетов или методов, связанных с квантовым уровнем рас-

21

смотрения. Неопределенность в квантовой механике возникает лишь тогда, когда вы осуществляете так называемое «измерение», требующее значительного «увеличения» масштаба события для перехода с квантового уровня на классический. Более подробно мы будем рассматривать эти проблемы в гл. 2.

При больших масштабах мы используем представления классической физики, которая является совершенно детерминистической. Она включает в себя законы механики Ньютона, законы Максвелла (позволяющие ввести в физику понятия электричества, магнетизма и света), две теории относительности Эйнштейна (специальную теорию относительности, описывающую движение тел при больших скоростях, и общую теорию относительности для систем с мощными гравитационными полями), причем все эти законы выполняются при больших расстояниях с исключительно высокой точностью.

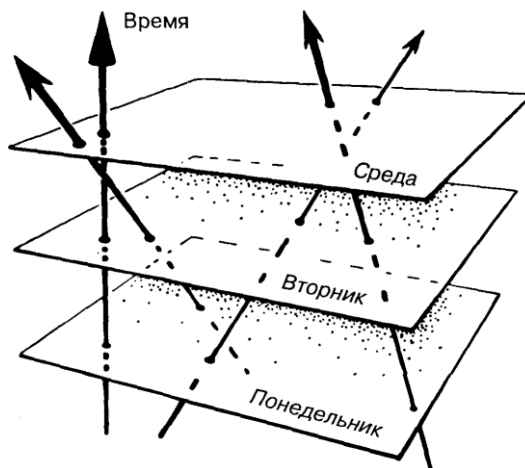
Отмечу также, что на рис. 1.5 я использовал термин «вычислимость» для характеристики и квантовой, и классической физики. В первых двух главах это понятие практически не используется, но оно имеет важное значение для задач, обсуждаемых в гл. 3, где мы и рассмотрим проблему «вычислимости» более внимательно.

Настоящая глава посвящена в основном эйнштейновской теории относительности, ее характерным особенностям, исключительной точности, а также поразительной изящности и элегантности. Однако сначала необходимо рассказать хотя бы очень кратко о ньютоновской физике. Вскоре после того, как Эйнштейн разработал общую теорию относительности, Картан показал, что ньютоновская теория гравитации также позволяет ввести представление о едином пространстве-времени. Физическая картина в механике Галилея и Ньютона позволяет представить пространство-время введением глобальной (всемирной) временной координаты, после чего состояние системы может описываться просто набором последовательных диаграмм (рис. 1.6), в которых различным моментам времени соответствуют сечения четырехмерного пространства-времени. Каждому такому пространственному сечению (т. е. плоскости на рис. 1.6) соответствует обычное евклидово трехмерное пространство. Характерной особенностью ньютоновского пространства-времени является то, что все пространственные «сечения» существуют в нем как бы одновременно.

Таким образом, например, все события, происходящие в полночь понедельника, лежат в нижней горизонтальной плоскости диаграммы; все, что происходит в полночь вторника, — на

223

Рис. 1.6. Единое пространство-время в механике Галилея—Ньютона. Прямые линии соответствуют равномерно движущимся частицам.

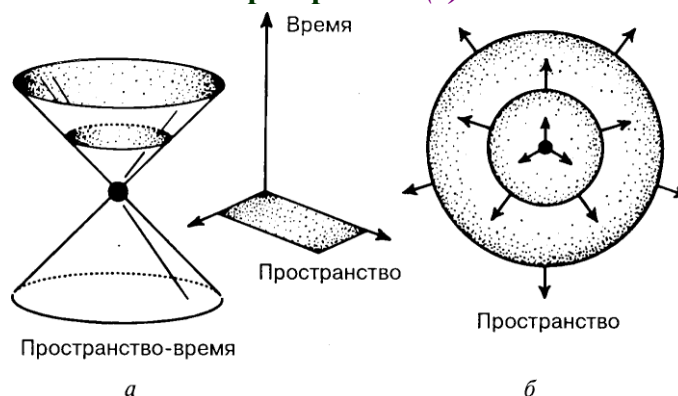


следующей плоскости и т. д. Временные сечения по оси времени дают просто последовательность евклидовых пространств во времени. Все наблюдатели (независимо от их способа передвижения в пространстве-времени) фиксируют одни и те же события одновременно, поскольку они видят одни и те же «срезы», или «сечения», единого пространства-времени.

Совершенно иначе обстоят дела в специальной теории относительности Эйнштейна, где время и, соответственно, полная картина пространства-времени перестают быть универсальными величинами, как в физике Ньютона. Для демонстрации существенной разницы этих теорий нам необходимо прежде всего ввести одно из важнейших представлений теории относительности — так называемый *световой конус*.

Что такое световой конус? Представьте себе вспышку света в заданной точке пространства и в определенный момент времени (это и есть *событие* в пространстве-времени), после которой волны начинают распространяться со скоростью света, передавая сигнал о событии. В пространственных координатах фронт распространения имеет вид сферы, расширяющейся со скоростью света (рис. 1.7, б), однако в полной системе координат (пространство-время) мы получим значительно более сложную картину (рис. 1.7, а), в которой будут учитываться горизонтальные смещения, соответствующие сдвигам на рис. 1.6. К сожалению, изобра-

Рис. 1.7. Распространение световой вспышки в пространстве-времени (а) и пространстве (б).



жение на рис. 1.7, а является всего лишь двумерным (плоскость рисунка), поскольку мы пользуемся всего лишь тремя измерениями для изображения четырехмерного пространства-времени. Поэтому нам приходится изображать вспышку света точкой в начале координат (событие), а затем — окружностями на горизонтальных сечениях, отражающими реальное движение лучей света (волн) через пространство. При этом движение световых лучей образует в пространстве-времени конус, верхняя часть которого описывает историю «вспышки» движением световых лучей в будущее пространство-время. С другой стороны, нижняя часть конуса соответствует приходу световых лучей из прошлого в точку вспышки (эту часть диаграммы обычно называют световым конусом прошлого). Наблюдатель получает всю информацию от световых лучей, распространяющихся по поверхности конуса!

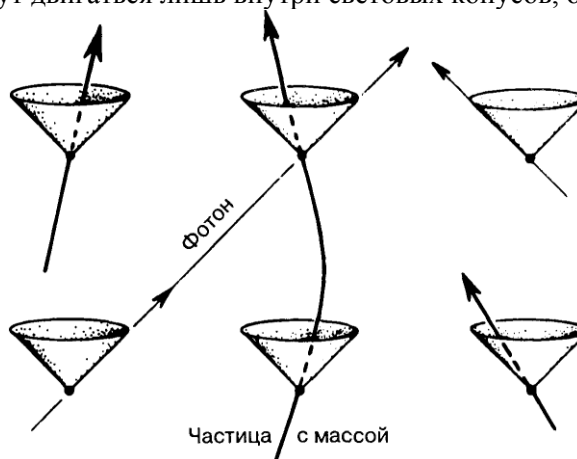
Такие световые конусы являются важнейшими структурами пространства-времени, и, в частности, именно они ограничивают возможности и пределы причинно-следственных связей в

природе. Историю любой частицы можно изобразить линией в пространстве-времени на диаграмме указанного типа, причем эта линия должна лежать внутри светового конуса (рис. 1.8). Все сказанное просто вытекает из условия, что никакая материальная частица не может двигаться быстрее света. Поэтому никакой сигнал не может выйти за пределы светового конуса, что естественным образом ограничивает пределы действия любых причинно-следственных связей.

24

Рис. 1.8. Описание движения частицы в пространстве-времени специальной теории относительности

(его называют также пространством-временем Минковского или просто геометрией Минковского). Световые конусы в различных точках пространства-времени выстраиваются таким образом, что частицы могут двигаться лишь внутри световых конусов, относящихся к будущему.



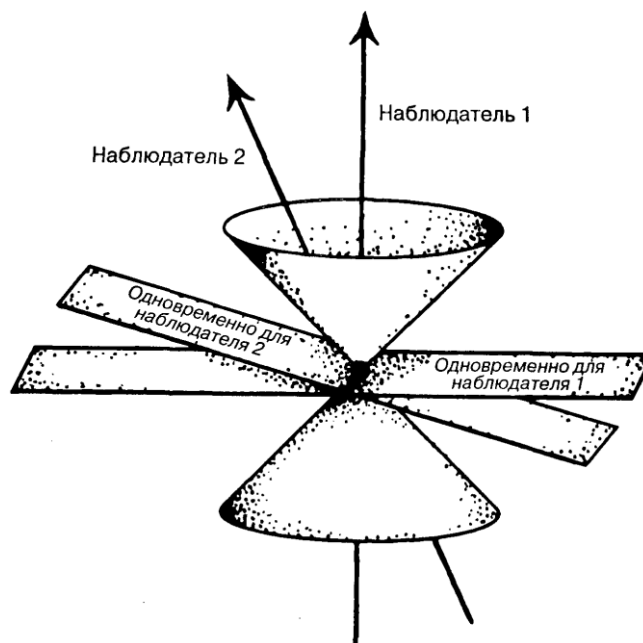
Естественно, что световые конусы отличаются весьма своеобразными геометрическими свойствами. Представим себе, например, двух наблюдателей, движущихся в пространстве-времени с различной скоростью. В отличие от механики Ньютона, где «плоскости одновременных событий» совершенно одинаковы для всех наблюдателей, в теории относительности нельзя ввести абсолютную одновременность, вследствие чего каждый из этих наблюдателей будет рисовать собственные плоскости «одновременности» в пространстве-времени, как показано на рис. 1.9. Существует известный и хорошо разработанный метод преобразования таких плоскостей друг в друга (так называемые *преобразования Лоренца*, образующие *группу Лоренца*), открытие которого сыграло важную роль в истории специальной теории относительности. Речь идет о группе (линейных) преобразований пространства-времени, при которых световой конус остается инвариантным.

Мы можем придать группе Лоренца и несколько иную трактовку. Как уже подчеркивалось, световой конус является одной из важнейших структур пространства-времени. Представьте се-

25

Рис. 1.9. Относительность понятия одновременности в специальной теории относительности Эйнштейна.

Наблюдатели 1 и 2 движутся в пространстве-времени относительно друг друга, в результате чего события, одновременные для наблюдателя 1, перестают быть одновременными для наблюдателя 2, и наоборот.

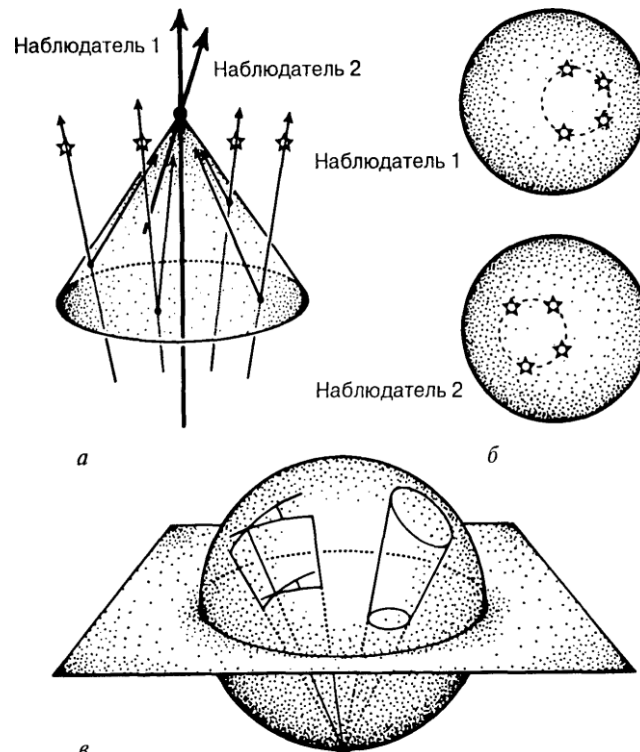


бля наблюдателем, рассматривающим Вселенную из какой-то точки пространства. В ваши глаза попадает свет от далеких звезд, и в соответствии с концепцией пространства-времени наблюдаемые вами события представляют собой пересечения мировых линий звезд с вашим световым конусом прошлого, как это показано на рис. 1.10. Другими словами, в вашем световом конусе прошлого звезды в некоторый момент времени образуют некий рисунок на небесной сфере (рис. 1.10, *а*). Предположим, что второй наблюдатель, двигаясь с большой скоростью относительно вас, именно в этот момент оказывается рядом. Он воспринимает те же звезды, однако ему кажется, что они занимают на сфере другие положения (рис. 1.10, *б*) — этот эффект астрономы называют *абберрацией*. Существует набор преобразований, позволяющий связать друг с другом изображения, воспринима-

26

Рис. 1.10. Картина звездного неба для двух различных наблюдателей,

а — наблюдатели 1 и 2 из одной и той же точки рассматривают звезды в световом конусе прошлого. Места пересечения светового конуса со звездами указаны черными точками. Световые сигналы идут от звезд к наблюдателям вдоль светового конуса. Наблюдатель 2 движется в пространстве-времени относительно наблюдателя 1 с некоторой скоростью; *б* — расположение звезд на небе, как его видят наблюдатели 1 и 2, когда они оказываются в одной точке пространства-времени; *в* — наглядное представление преобразования картины звездного неба для различных наблюдателей при использовании стереографической проекции (окружности переходят в окружности, значения углов сохраняются).



емые различными наблюдателями. В каждом из таких преобразований сфера соотносится с другой сферой, однако среди этих преобразований есть специальное, в котором точным окружностям соответствуют точные окружности, в результате чего при

27

преобразовании сохраняются значения углов, т. е. воспринимаемые вами круглые изображения остаются круглыми и для другого наблюдателя.

Существует прекрасная иллюстрация механизма действия таких преобразований, которая, кстати, одновременно демонстрирует исключительную элегантность и красоту математической физики при описании фундаментальных понятий и представлений. На рис. 1.10, *в* показана сфера, пересекаемая плоскостью по экватору. Мы можем нарисовать на поверхности этой сферы различные фигуры, а затем рассмотреть их так называемые стереографические проекции (проекции из южного полюса сферы на экваториальную плоскость), обладающие довольно необычными свойствами. Действительно, как видно из рисунка, при такой проекции не только окружности на сфере превращаются в окружности на плоскости, но сохраняются и точные значения всех углов, образуемых пересечением кривых на сфере. В гл. 2 я более подробно расскажу об этом типе проекций (см. рис. 2.4) и покажу, что с его помощью можно сопоставить все точки сферы комплексным числам (такие числа возникают при извлечении квадратного корня из отрицательных чисел), а затем перевести в точки экваториальной плоскости. Такая операция, в которую можно вовлечь все множество комплексных чисел (включая «бесконечные» значения), позволяет построить структуру, называемую *сферой Римана*.

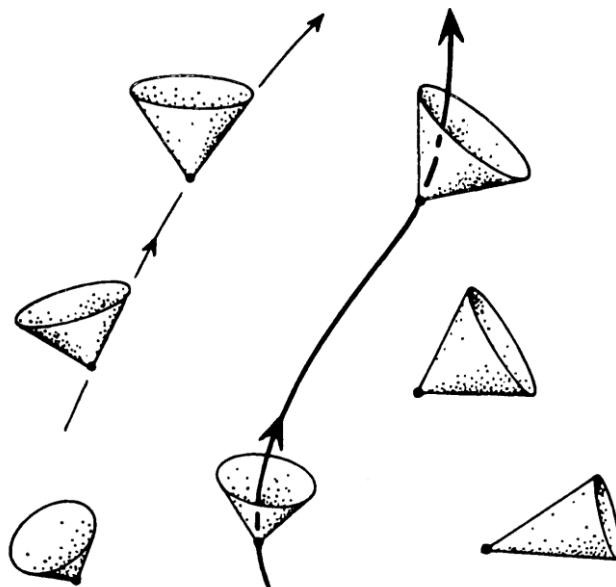
Для читателя, заинтересовавшегося этой проблемой, я приведу формулу

$$u \rightarrow u' = \frac{\alpha u + \beta}{\gamma u + \delta},$$

описывающую преобразование (абerrации) Лоренца, которое переводит окружности в окружности и одновременно сохраняет значения всех углов. Преобразования такого типа называют преобразованиями Мёбиуса. Мне бы хотелось лишь отметить простоту и изящество этой формулы, описывающей столь сложный параметр, каким выступает в данной ситуации величина *u*. Совершенно удивительным кажется то, что при указанных преобразованиях в специальной теории относительности конечная формула имеет очень простой вид, в то время как соответствующие преобразования абerrации в ньютоновской механике описываются очень сложными выражениями. Как это часто бывает в физике, переход к более фундаментальным понятиям и более точным теориям приводит к упрощению математического описания,

28

Рис. 1.11. Искривленное пространство-время.



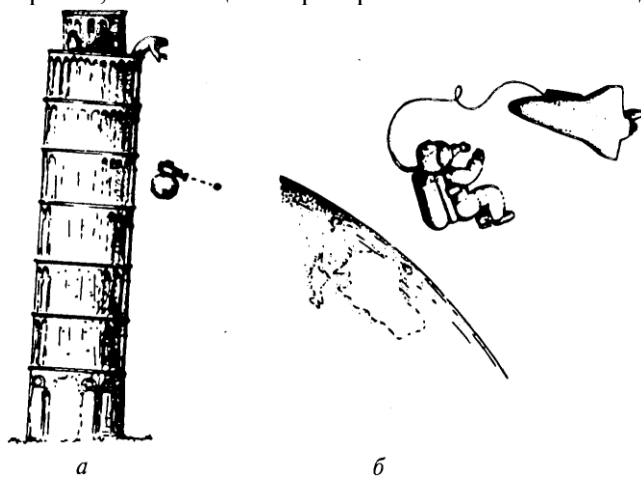
хотя на первый взгляд такой переход должен сопровождаться усложнением формального аппарата. Примером этой важной закономерности может служить разительный контраст между понятиями относительности в механике Галилея и Эйнштейна.

Специальная теория относительности во многих отношениях не только значительно проще классической механики, но и выглядит гораздо изящнее с математической точки зрения (в частности, при рассмотрении процессов в рамках теории групп). В специальной теории относительности пространство-время является плоским, а все световые конусы выстраиваются вдоль траекторий, как было показано на рис. 1.8. При переходе к более сложной общей теории относительности (теории пространства-времени с учетом гравитации) ясная физическая картина на первый взгляд «мутнеет» и теряет свою простоту, так как световые конусы оказываются разбросанными по всему пространству (рис. 1.11). Ранее я говорил, что, развивая любую теорию все глубже и глубже, мы должны приходить к более простым математическим выражениям. Представленная мною картина пока выглядит ужасающе сложной, однако если мы проявим немного терпения, то убедимся, что математическая простота и изящество теории возникнут снова.

29

Рис. 1.12.

а — Галилей бросает с наклонной Пизанской башни два камня (один с телекамерой); *б* — астронавт и космический корабль, плавающие в пространстве как бы без воздействия гравитации.



Напомню вам основные положения эйнштейновской теории тяготения. Прежде всего, она основана на принципе эквивалентности Галилея. На рис. 1.12 я попытался изобразить Галилея, бросающего с вершины знаменитой Пизанской башни большой и маленький камни. Независимо от того, действительно ли Галилей проводил такие эксперименты, он совершенно ясно установил, понял и сформулировал правило, что оба камня долетят до поверхности Земли за одинаковое

время, если не учитывать сопротивления воздуха при падении. Если бы вы находились на одном из этих камней, то второй казался бы вам неподвижно висящим в воздухе (для более наглядной демонстрации этого факта я пририсовал телекамеру к одному из камней). В наше время эффект свободного парения очень часто демонстрируют при репортажах с космических кораблей, и недавно я сам видел британского космонавта, свободно «плавающего» в пространстве рядом с огромным космическим аппаратом (полная аналогия с большим и маленьким камнями в опытах Галилея). Именно это явление и называют принципом эквивалентности.

Рассматривая гравитацию в рамках опытов со свободным падением, мы вдруг понимаем, что в этих условиях она как бы полностью исчезает. Однако эйнштейновская теория вовсе *не утверждает*, что *тяготение исчезает*, она всего лишь говорит об *исчез-*
30

новении силы тяжести, что означает совершенно иное явление, которое можно назвать «приливным эффектом» гравитации.

Для дальнейшего изложения мне необходимо ввести еще несколько математических понятий. Мы говорим об искривлении пространства-времени, а процессы такого типа описываются *тензором*, который я для удобства назову **Риманом** и буду обозначать заглавной буквой **R** в простом уравнении, которое выпишу чуть ниже. Я не буду объяснять вам, в чем состоит физический смысл тензора кривизны Римана, обозначенного **R**, а только отмечу, что тензоры имеют некоторое число нижних индексов, вместо которых в уравнение поставлено соответствующее число точек (внизу справа от знака тензора). Тензор кривизны **R** можно разложить на две составляющие (одну из которых я назову кривизной **Вейля**, а вторую — кривизной **Риччи**), что позволяет мне выписать уравнение

Риман = Вейль + Риччи

$R_{\dots} = C_{\dots} + R'_{\dots}g_{\dots}$,

где формально величины **C** и **R'** являются тензорами кривизны Вейля и Риччи, а **g** — так называемый метрический тензор.

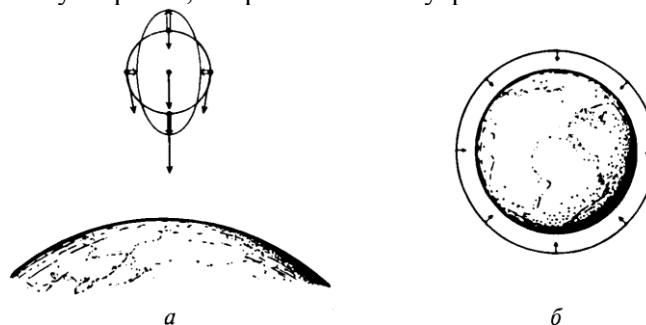
Кривизна Вейля является объективным показателем упомянутого выше «приливно-го эффекта», физическую природу которого я поясню сейчас на простом примере. С точки зрения космонавта гравитация исчезает, однако мы понимаем, что это не так. Представьте себе, например, что космонавт окружен сферическим облаком неподвижных относительно него частиц. С течением времени это облако начнет «расплываться» и деформироваться, после чего в результате очень небольшого различия сил тяготения в различных участках сферы (мне хочется особо подчеркнуть, что я могу вполне адекватно описать эффект в рамках ньютоновской механики) сферическое облако через некоторое время превратится в эллипсоид, как показано на рис. 1.13, *a*.

Как я уже говорил, искажение отчасти объясняется тем, что частицы, расположенные ближе к Земле, ускоряются сильнее, чем частицы на периферии облака. Кроме того, частицы по «бокам» сферы испытывают небольшие ускорения «внутри», что также показано на рис. 1.13, *a*. Обе эти причины способствуют образованию эллипсоида из первоначально сферического облака частиц. Описываемый эффект очень удачно был назван «приливым», поскольку достаточно заменить Землю в наших

31

Рис. 1.13.

a — приливный эффект. Широкие стрелки показывают направление относительного ускорения частиц; *б* — если сферическое облако окружает какой-либо массивный объект (например, Землю), то оно испытывает в целом ускорение, направленное «внутри».



рассуждениях Луной, а облако частиц — мировым океаном, как мы сразу поймем, почему поверхность морей на нашей планете не представляет собой правильную сферу! В соответствии с

совершенно таким же механизмом морская толща на обращенной к Луне поверхности Земли притягивается Луной чуть сильнее, чем на обратной стороне, в результате чего вдоль морской поверхности дважды в день пробегает высокая приливная вода.

Гравитационный эффект по Эйнштейну представляет собой просто другую форму описанного приливного эффекта. Он определяется, как уже отмечалось, *кривизной Вейля*, т. е. составляющей S_{\dots} выпяченного выше уравнения. Эта часть тензора кривизны соответствует процессам с «сохранением объема» (т. е. объем эллипсоида, образовавшегося в результате деформации сферы из частиц, должен в точности равняться объему исходной сферы).

Вторая составляющая, называемая *кривизной Риччи*, относится к эффектам, связанным с «сокращением объема». Например, если Земля будет окружена сферическим облаком частиц (как показано на рис. 1.13, б), то объем сферы с течением времени должен несколько уменьшиться, поскольку все частицы притягиваются «внутрь». Степень такого сокращения объема и описывается составляющей R' . В соответствии с эйнштейновской теорией эта кривизна определяется количеством вещества в ближайшем окружении данной точки. Иными словами, определив правильным образом плотность вещества в некоторой точке пространства, мы можем найти и величину направленного

32

«внутрь» ускорения. При таком подходе теория Эйнштейна полностью совпадает с ньютоновской теорией тяготения.

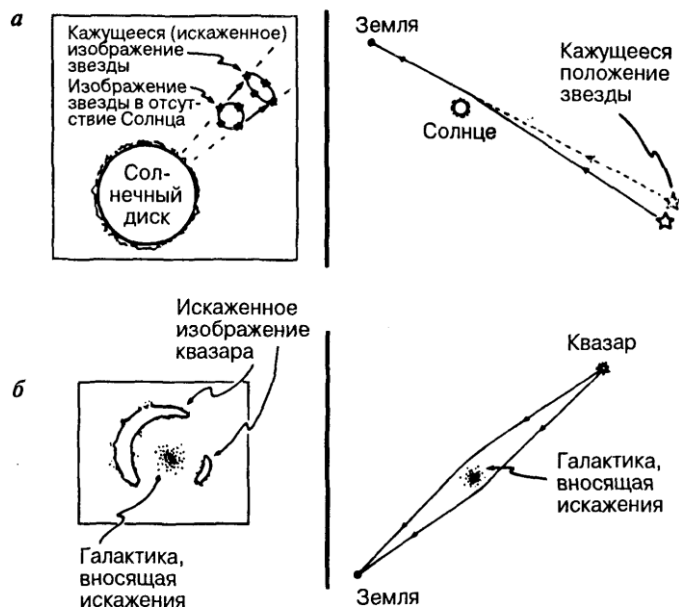
Именно так Эйнштейн и сформулировал свою теорию гравитации — он выразил тяготение посредством приливных эффектов, являющихся мерой локального искривления пространства-времени. Представление об искривлении четырехмерного пространства-времени является важнейшим в теории относительности. Я напому вам рис. 1.11, где схематически были показаны мировые линии частиц и их искажения. Теория Эйнштейна представляет собой чисто геометрическую схему для четырехмерного пространства-времени, причем ее математическая формулировка отличается удивительной красотой.

История открытия общей теории относительности является весьма поучительной и интересной. Эйнштейн полностью сформулировал ее в 1915 г., исходя не из экспериментальных наблюдений, а лишь из некоторых эстетических, геометрических и физических принципов и пристрастий. Основой теории стали принцип эквивалентности Галилея (примером действия которого могут служить описанные выше эксперименты с бросанием камней различного веса, рис. 1.12) и общие идеи неевклидовой геометрии, естественным образом используемые для описания пространства-времени. Об экспериментальных доказательствах теории вначале никто не задумывался, однако после ее окончательной формулировки было предложено три разных варианта проверки. Первый из них связан с известной астрономической задачей (проблема смещения перигелия Меркурия), которую никак не удавалось решить в рамках классической механики Ньютона. Общая теория относительности позволила совершенно точно предсказать величину этого смещения. Далее, из теории следовало, что траектория световых лучей должна искривляться при прохождении через мощные гравитационные поля (например, вблизи Солнца). Для проверки этой гипотезы в 1919 г. под руководством Артура Эддингтона была организована астрономическая экспедиция для наблюдения полного солнечного затмения. Результаты, полученные этой знаменитой экспедицией, соответствовали предсказаниям эйнштейновской теории (рис. 1.14, а). И наконец, третья проверка была связана с предсказанием замедления хода часов в гравитационном поле (часы у поверхности Земли должны идти чуть медленнее, чем часы на вершине башни), что неоднократно проверялось в экспериментах. Следует отметить, что все эти проверки не оказались достаточно вескими (из-за того, что наблюдаемые эффекты всегда

33

Рис. 1.14.

а — прямые измерения воздействия гравитационного поля нахождение световых лучей в соответствии с общей теорией относительности. Изображение удаленных звезд искажается из-за вейлевского искривления пространства-времени, приводящего к искривлению траекторий световых лучей в гравитационном поле Солнца. Круглые изображения звезд при этом превращаются в эллипсы; *б* — использование эйнштейновского эффекта искривления световых лучей в качестве практического приема астрономических наблюдений. Массу галактики, лежащей на пути светового луча, можно оценить по степени искажения изображения удаленного квазара.



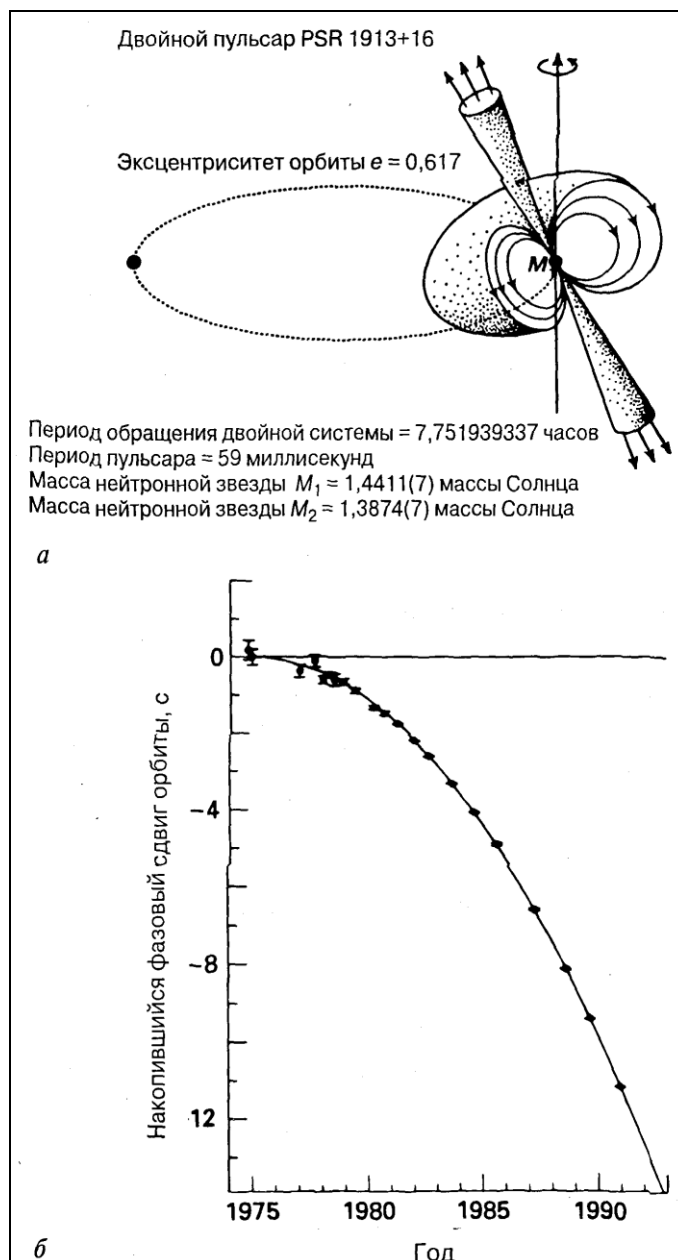
очень слабы), а также могут быть достаточно убедительно объяснены в рамках других теорий.

Отношение к теории относительности резко изменилось в 1993 г., когда Хульзе и Тейлор получили Нобелевскую премию за исключительно интересные астрономические наблюдения, относящиеся к двойному пульсару PSR 1913+16. Этот астрономический объект (рис. 1.15, *a*) состоит из двух нейтронных звезд со столь большой плотностью, что масса каждой из них примерно равна массе нашего Солнца, хотя их радиус составляет всего лишь несколько километров! Нейтронные звезды вращаются

34

Рис. 1.15.

a — схематическое изображение двойного пульсара PSR 1913+16. Одна из нейтронных звезд является источником направленного радиоизлучения, испускаемого вдоль оси магнитного диполя (которая, кстати, не совпадает с осью вращения нейтронной звезды). Отчетливые импульсы регистрируются в те моменты времени, когда узкий луч излучения попадает в поле зрения наблюдателя. Характеристики двойной нейтронной звезды, определяемые точной регистрацией сигналов, совпадают с теми, которые предсказывает общая теория относительности; *б* — сравнение экспериментально измеренных значений изменения фазы сигналов излучения пульсара PSR 1913+16 с теоретическими расчетами, основанными на учете гравитационного излучения двойной нейтронной звезды (сплошная кривая).



35

вокруг общего центра тяжести по очень вытянутым эллиптическим орбитам. Одна из звезд обладает сильнейшим магнитным полем, благодаря чему является источником настолько интенсивного излучения, что на Земле (т. е. на расстоянии 30 000 световых лет) оно прекрасно регистрируется в виде серии четко определенных импульсов. Это позволило провести разнообразные и тщательные измерения, в частности, параметры орбит обеих нейтронных звезд удалось замерить с очень высокой точностью и проверить поправки, связанные с учетом общей теории относительности.

Далее я должен особо подчеркнуть, что в общей теории относительности существует и совершенно специфический эффект, отсутствующий в ньютоновской теории тяготения и заключающийся в том, что вращающиеся относительно друг друга объекты излучают энергию в виде гравитационных волн. Эти волны похожи на световые, но в отличие от последних представляют собой не колебания электромагнитного поля, а возмущения, или «рябь», пространства-времени. Измеренная скорость потери энергии упомянутой двойной нейтронной звезды с высокой точностью совпала с теоретическими расчетами, проведенными в рамках общей теории относительности. На рис. 1.15, б представлены результаты измерения смещения орбит за 20-летний период наблюдений. Высокая надежность регистрации излучаемых сигналов и длительность измерений позволили довести точность расчета параметров орбит до 10^{-14} , что делает общую теорию относительности самой точной и проверяемой областью современной науки.

36

Процесс создания и проверки общей теорией относительности содержит, безусловно, и важный моральный мотив, связанный с тем, что Эйнштейн потратил на создание теории многие годы, практически не обращая внимания на проблемы ее экспериментальной проверки. Существует общераспространенное мнение, что физики ищут образы, или «паттерны», получаемых в эксперименте результатов и ставят своей целью создание красивых теорий, позволяющих описать эти результаты. Считается, что именно поэтому физики и математики предпочитают «держаться вместе». Однако в случае с общей теорией относительности ситуация выглядит совершенно иной. Вне всякой связи с экспериментальными результатами была разработана весьма изящная и элегантная математическая теория, относящаяся к основам физики. Проблема заключается как раз в том, что эта прекрасная математическая структура просто существует в Природе и присутствует в пространстве, а не является чем-то привнесённым, «навязанным» Природе извне. Одна из важнейших идей этой главы состоит в том, что Эйнштейн выявил в мире нечто, уже содержащееся в нем. При этом обнаруженные им структуры вовсе не относятся к незначительным или маловажным разделам физики, а связаны с наиболее фундаментальными законами Природы и свойствами пространства-времени.

Сказанное возвращает нас к началу книги и рис. 1.3, связывающему мир математики с миром физических явлений. В общей теории относительности мы сталкиваемся со структурой, которая реально определяет с исключительной точностью поведение физического мира. При этом теория, описывающая фундаментальные свойства нашего мира, была получена вовсе не в результате длительных наблюдений за поведением Природы (разумеется, сказанное не означает, что я отрицаю очевидную ценность таких наблюдений). Конечно, основным критерием научной теории является не убедительность доводов, а соответствие фактам. В данном случае мы имеем дело именно с теорией, которая прекрасно согласуется с экспериментальными данными. Точность теории относительности по крайней мере вдвое (как математик я подразумеваю под точностью число знаков после запятой при надежном расчете) выше точности классической механики, т. е. ее расчеты справедливы до 10^{-14} , в то время как точность ньютоновской механики составляет лишь 10^{-7} . Такое «возрастание» точности наблюдалось в классической механике за период от семнадцатого века (Ньютон знал,

37

что точность его расчетов составляет 10^{-3}) до наших дней (она доведена, как я уже говорил, до 10^{-7}).

Разумеется, гипотеза Эйнштейна представляет собой некую физическую теорию, и для нас очень важно установить ее связь со структурой реального мира. Я обещал, что не буду вдаваться в подробности и делать изложение «ботаническим», однако в данном случае речь идет о теории единственной известной нам Вселенной (как о целостном объекте), так что я могу углубиться в рассуждения, не опасаясь обвинений в излишней болтливости. Теория Эйнштейна предлагает нам три типа стандартной модели развития мира (рис. 1.16) в зависимости от того, какова величина одного из главных параметров теории, обозначенного буквой κ . В различных работах по космологии часто используется так называемая космологическая постоянная, но я не буду ее упоминать, поскольку сам Эйнштейн считал своей основной ошибкой именно введение этой постоянной в уравнения общей теории относительности. Если же жизнь когда-нибудь заставит физиков вернуться к этой постоянной, нам придется это вытерпеть.

Полагая космологическую постоянную равной нулю, мы получаем для трех различных значений параметра κ ($\kappa = +1, 0, -1$) три различные модели Вселенной (см. рис. 1.16). Разумеется, было бы правильнее учитывать также возраст и масштаб Вселенной (для этого необходимо пользоваться непрерывным, а не дискретным параметром κ), однако мы ограничимся лишь этими тремя моделями, поскольку их можно легко связать с кривизной пространственных сечений Вселенной. Если сечения являются плоскими, то этому соответствует нулевая кривизна и значение параметра $\kappa = 0$ (рис. 1.16, *а*). Если же сечения имеют положительную кривизну, то Вселенная является замкнутой и, следовательно, $\kappa = +1$ (рис. 1.16, *б*). В этих моделях Вселенная имеет сингулярное исходное состояние, знаменующее ее рождение (знаменитый Большой Взрыв). При $\kappa = +1$ Вселенная после рождения расширяется (иногда говорят «раздувается») до некоторого максимального размера, после чего начинает сжиматься и «схлопывается» в момент Большого Сжатия. При $\kappa = -1$ расширение Вселенной будет продолжаться вечно (рис. 1.16, *в*), а случай $\kappa = 0$ является промежуточным между двумя указанными. На рис. 1.16, *г* схематически показана зависимость радиуса Вселенной от времени, где под радиусом понимается некий характерный размер. Он может быть задан лишь при $\kappa = +1$, а в двух остальных случаях Вселенная просто

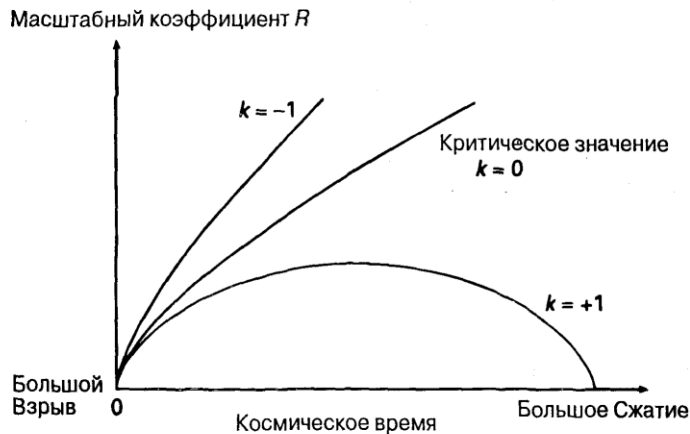
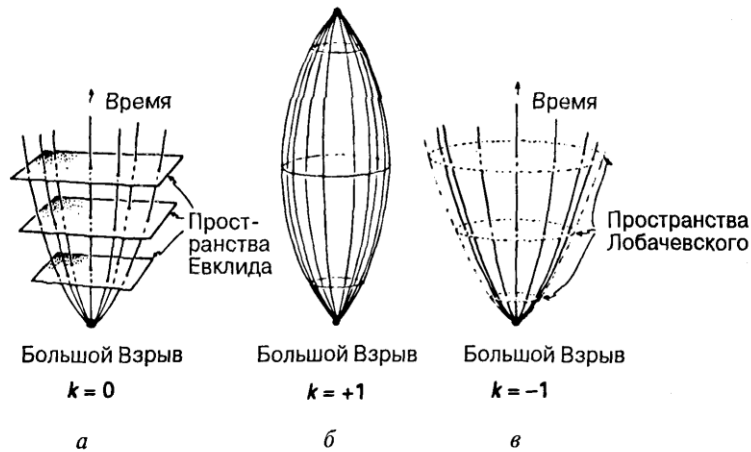
бесконечно расширяется.

38

Рис. 1.16.

a — пространственно-временная картина расширяющейся Вселенной с евклидовыми пространственными сечениями (на рисунке указаны лишь два измерения), $k = 0$; *б* — пространственно-временная картина расширяющейся (а затем сжимающейся) Вселенной со сферическими пространственными сечениями, $k = +1$; *в* — пространственно-временная картина расширяющейся Вселенной с пространственными сечениями, описываемыми геометрией Лобачевского, $k = -1$; *г* - динамика развития трех указанных типов модели Фридмана.

Большое Сжатие



г

39

Мне хочется подробнее рассмотреть случай с $k = -1$ (который, кстати сказать, труднее всего согласовать с общей картиной), представляющий интерес по двум важным причинам. Во-первых, эта модель наиболее удобна, если вы хотите трактовать результаты наблюдений по их истинному, «номинальному» значению. Дело в том, что в общей теории относительности искривление пространства обусловлено суммарным количеством вещества во Вселенной, а этого количества, по современным данным, явно недостаточно для создания Вселенной с замкнутой геометрией (разумеется, может оказаться и так, что Вселенная содержит большое количество так называемой скрытой, или темной, массы, которую мы еще просто не успели обнаружить, и тогда будет справедлива какая-то другая модель, однако, скорее всего, наша Вселенная не имеет столь большой массы и описывается параметром $k = -1$). Вторая причина моего интереса к этой модели связана с ее исключительной красотой и элегантностью.

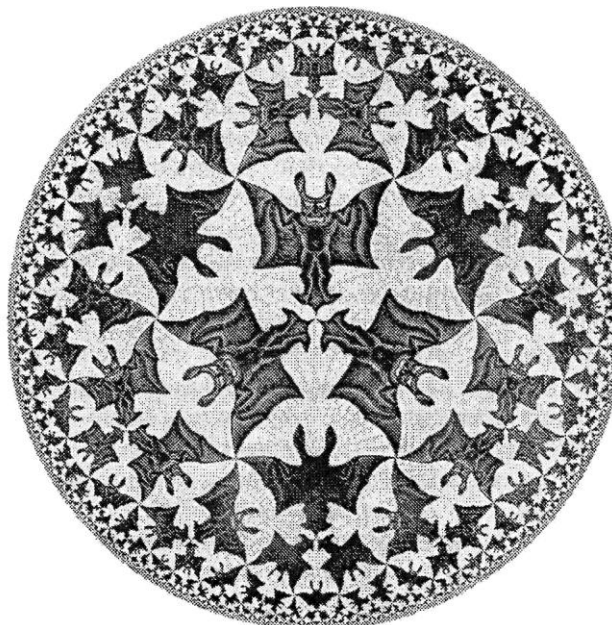
На что похожи вселенные с параметром $k = -1$? Их пространственные сечения описываются так называемой гиперболической геометрией (геометрией Лобачевского), прекрасной иллюстрацией которой может служить одна из картин Мориса Эшера (рис. 1.17). Эшер нарисовал целую серию гравюр, озаглавленную «Предельные окружности», одна из которых и показана на рисунке. Как вы видите, художнику представляется, что Вселенная полна ангелов и чертей! Для нашего рассмотрения гораздо важнее то, что вся картина как бы выгнута по отношению к краям

предельной окружности, и это искривление связано именно с попыткой художника изобразить гиперболическое пространство на плоском листе бумаги, иными словами — в привычном евклидовом пространстве. Следует осознать, что если бы мы жили в этой Вселенной, то форма и размеры всех черт были бы одинаковы независимо от того, попали бы мы в центр или на край картины. Гравюра дает некоторое представление о том, что происходит в пространстве Лобачевского, и о тех особенностях, которые возникают при соответствующем искажении пространства.

Геометрия Лобачевского может показаться странной и неожиданной, но если вдуматься, то привычная нам евклидова геометрия — тоже совершенно замечательная вещь, хотя бы потому, что она дает нам прекрасные образцы взаимодействия физики и математики. Когда-то древние греки рассматривали ее не как раздел математики, а как описание окружающего мира.

40

Рис. 1.17. М. Эшер. «Предельная окружность 4» (представление геометрии Лобачевского).

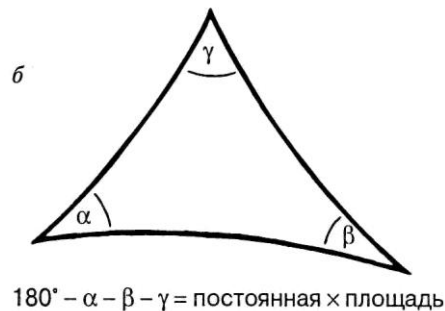
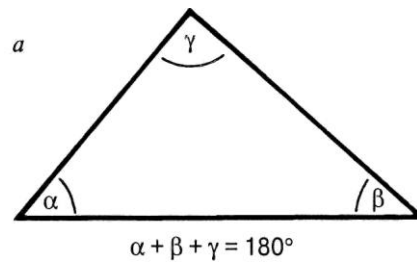


Геометрия действительно описывает мир с поразительной точностью. Я говорю об очень высокой, но не абсолютной точности, поскольку, как мы уже видели, теория Эйнштейна доказала позднее, что наш мир в определенных условиях может быть «искривлен». Вопрос о возможности существования других геометрий всегда волновал ученых. Эта очень старая проблема известна под названием *пятого постулата Евклида* и сводится к справедливости утверждения о том, что через точку на плоскости, лежащую вне заданной прямой, можно провести только одну прямую, параллельную данной. Долгое время считалось, что это утверждение можно доказать, используя другие, более очевидные теоремы и положения евклидовой геометрии, однако позднее выяснилось, что такое доказательство невозможно, вследствие чего и возникло представление о неевклидовой геометрии.

В такой геометрии сумма углов треугольника не равна 180° . На первый взгляд кажется, что это условие значительно усложняет рассмотрение, поскольку мы привыкли к тому, что в евклидовой геометрии сумма углов любого треугольника всегда со-

41

Рис. 1.18. а — треугольник в евклидовом пространстве; б — треугольник в пространстве Лобачевского.



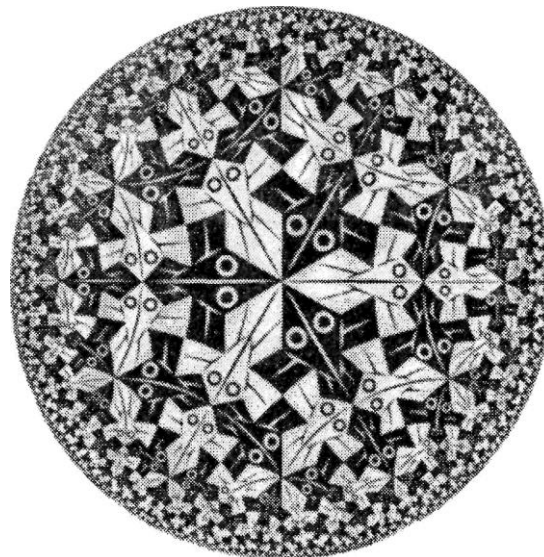
ставляет именно 180° (рис. 1.18, *a*). Однако в неевклидовой геометрии разность между суммой углов треугольника и 180° пропорциональна площади треугольника, т. е. неожиданно выясняется, что площадь треугольника сложнее описать именно в евклидовой геометрии, где она задается сложным уравнением для всех углов и длин сторон треугольника. В неевклидовой геометрии площадь треугольника определяется замечательно простой формулой Ламберта (рис. 1.18, *б*). Поразительно, но Ламберт вывел свою формулу до открытия неевклидовой геометрии!

Очень важную роль в геометрии играют так называемые действительные (вещественные) числа, абсолютно необходимые для построений евклидовой геометрии. Такие числа ввел древнегреческий математик Евдокс в 4 веке до н.э., и они до сих пор сохраняют свое значение для создания физической картины мира. Позднее мы будем говорить и о комплексных числах, но последние также основаны на представлении о вещественных числах.

Давайте рассмотрим еще одну гравюру Эшера (рис. 1.19), которая демонстрирует особенности геометрии Лобачевского да-

42

Рис. 1.19. Гравюра М. К. Эшера «Предельная окружность 1».



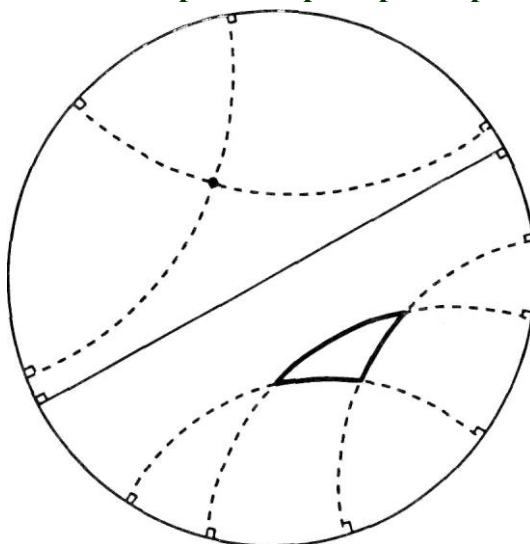
же нагляднее, чем рис. 1.17 (поскольку на ней использованы «прямые линии», которые всегда выглядят более очевидными). На рисунке показаны дуги окружностей, пересекающие границу под прямым углом. Обитатель мира с геометрией Лобачевского воспринимал бы прямую линию как одну из этих дуг, что хорошо видно на рис. 1.19, где «по-настоящему прямыми» являются лишь линии, проходящие через центр окружности, а все остальные «прямые» в действительности представляют собой изогнутые дуги. Некоторые из этих «прямых» показаны на рис. 1.20, где я дополнительно выделил точку, не лежащую на истинной прямой (т. е. не на диаметре). Обитатель

мира Лобачевского может провести через эту точку две (и даже больше) различные линии, которые не будут пересекать диаметр, т. е. в этой геометрии пятый постулат Евклида безусловно не имеет силы. Более того, измерив сумму углов треугольника на рисунке, вы можете вычислить его площадь. Надеюсь, что даже эти обрывочные сведения дают возможность почувствовать необычность и очарование мира с гиперболической геометрией.

Я уже говорил, что мне очень нравится гиперболическая геометрия, созданная Лобачевским. Одной из причин моего пристрастия является и то, что группой симметрий этого простран-

43

Рис. 1.20. Некоторые особенности гиперболической геометрии (пространства Лобачевского), поясняющие построения гравюры «Предельная окружность 1».



ства выступает уже знакомая нам группа Лоренца, соответствующая симметрии специальной теории относительности и световых конусов, играющих в этой теории столь важную роль. На рис. 1.21 световой конус показан более подробно. Я нарочно убрал одну из пространственных координат, чтобы продемонстрировать вам наглядную трехмерную картину. Показанный на рисунке световой конус описывается простым уравнением

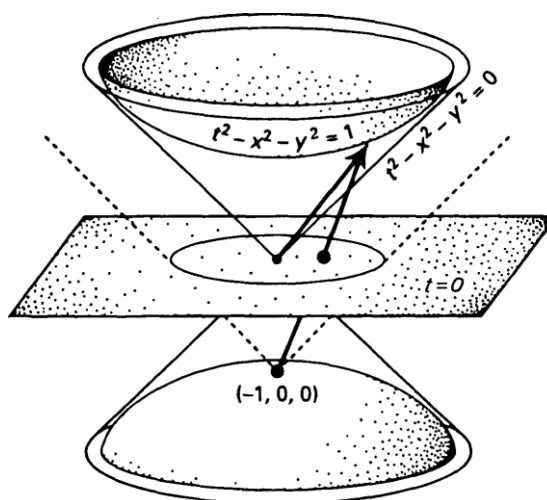
$$t^2 - x^2 - y^2 = 0.$$

В такой геометрии (ее называют геометрией Минковского) уравнению $t^2 - x^2 - y^2 = 0$ соответствуют две чашеобразные поверхности, расположенные на «единичном расстоянии» от начала координат («расстоянию» в геометрии Минковского соответствует реальное *время*, т. е. время, измеряемое в физическом эксперименте при помощи движущихся часов). В пространстве Минковского эти поверхности служат «сферами», и можно показать, что внутренняя геометрия таких сфер является гиперболической (пространство Лобачевского). В евклидовой геометрии вы можете вращать обычную сферу и найти группу симметрии, соответствующую таким вращениям. В случае поверхностей,

44

Рис. 1.21. Пространство Лобачевского, «вложенное» (в виде гиперболоидов) в пространство-время Минковского.

Стереографическая проекция переводит его в так называемый диск Пуанкаре, ограниченный окружностью на плоскости $t=0$.



изображенных на рис. 1.21, группа симметрий представляет собой группу вращений Лоренца, которая описывает преобразование пространства и времени при вращении, т. е. при вращении единого пространства-времени вокруг некоторой фиксированной точки. В таком представлении группа симметрий пространства Лобачевского точно совпадает с группой Лоренца.

На рис. 1.21 для пространства Минковского показана также стереографическая проекция, подобная рассмотренной выше (рис. 1.10, *в*). Вместо южного полюса на рис. 1.21 используется точка $(-1, 0, 0)$, а точки верхней «чаши» проецируются на плоскость $t = 0$, которая выступает аналогом экваториальной плоскости на рис. 1.10, *в*. Все точки после проецирования лежат внутри окружности в плоскости $t = 0$, которую называют иногда диском Пуанкаре. В результате операции в целом (которая, кстати, в точности совпадает с художественным приемом, использовавшимся М.Эшером в его гравюрах «Предельная окружность») гиперболическая поверхность (пространство Лобачевского) преобразуется в диск Пуанкаре. Более того, такое преобразование соответствует главной особенности проекции рис. 1.10, *в* — оно сохраняет все углы и окружности, придавая

45

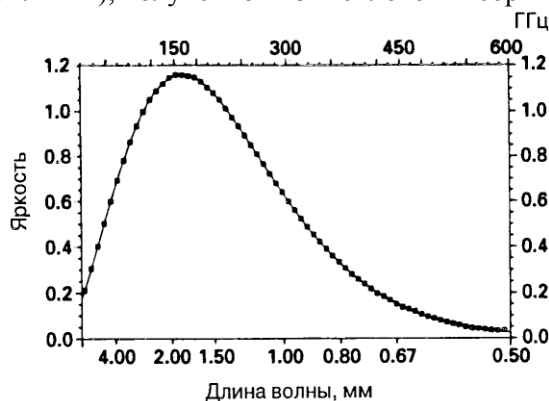
операции геометрическое изящество. Я просто восхищаюсь всеми этими совпадениями, с которыми математики постоянно встречаются в своих исследованиях!

Надеюсь, что мой восторг не показался вам чрезмерным. Существует интересная и несколько загадочная психологическая закономерность: если результаты исследования какой-то заинтересовавшей вас проблемы (например, геометрической) выражаются красивой математической формулой, то это поддерживает интерес исследователя и стимулирует дальнейшую работу (совершенно аналогично результаты, не обладающие математическим изяществом, обычно разочаровывают и обескураживают исследователя). Гиперболической геометрии присуща особая математическая красота, и было бы очень приятно (мне лично, по крайней мере), если бы Вселенная была построена столь математически красиво. Разумеется, у меня есть очень много других причин для веры в такое устройство Вселенной. Многим не нравится идея о гиперболической, открытой Вселенной, и они предпочитают модели замкнутых вселенных (типа показанных на рис. 1.16, *б*), которые, вполне возможно, кажутся им более приятными и уютными (разумеется, стоит отметить, что такие замкнутые вселенные все еще остаются весьма крупными). Другие ученые предпочитают модели плоского мира (рис. 1.16, *а*), поскольку среди теорий зарождения Вселенной существует и так называемая теория *раздувающейся Вселенной*, предполагающая плоскую геометрию мира. Должен сказать, что я не очень доверяю этим теориям.

Описанные выше три стандартных типа моделей Вселенной, известные под общим названием *моделей Фридмана*, отличаются исключительно высоким уровнем симметрии. Все они описывают расширение, однако Вселенная при этом остается совершенно однородной в любой момент времени. Это условие входит в структуру моделей Фридмана и получило специальное название *космологического принципа*. В моделях Фридмана свойства Вселенной одинаковы по всем направлениям, и похоже, что наша Вселенная устроена действительно по этому принципу. Если уравнения Эйнштейна справедливы (а выше я говорил о том, что его теория с высокой степенью точности соответствует наблюдаемым явлениям), то к моделям Фридмана следует относиться весьма серьезно. Отметим, что во всех этих моделях присутствует не очень «изящный» с точки зрения физики Большой Взрыв (состояние сверхгорячей Вселенной с бесконечной плотностью и другими сингулярными параметрами, которые очень

Рис. 1.22. Результаты измерений спектра космического микроволнового фонового излучения

(точки на рисунке), полученные при помощи спутника COBE, прекрасно совпадают с расчетной кривой (сплошная линия), полученной из «тепловой» теории Большого Взрыва.



трудно описывать теоретически). Однако если мы все же смирился с возможностью существования этого сверхнагретого и сверхплотного физического состояния, то сможем предсказать развитие мира вплоть до настоящего времени. Одно из важнейших предсказаний такого типа относится к тепловому состоянию Вселенной. Теоретический расчет показывает, что в ней должно присутствовать однородное фоновое излучение, спектр которого должен соответствовать известному в физике излучению черного тела. Именно такой тип космической радиации (получивший название микроволнового фонового излучения) был открыт Пензиасом и Вильсоном в 1965 г., что стало одной из главнейших научных сенсаций нашего времени. На рис. 1.22 представлена спектральная кривая этого излучения (полученная при помощи спутника COBE), которая с очень высокой степенью точности совпадает с хорошо известным из учебников спектром абсолютно черного тела.

Для всех специалистов по космологии существование этого фонового излучения стало убедительным доказательством того, что наша Вселенная когда-то находилась в очень горячем и плотном состоянии. Излучение сообщает нам нечто об исходном состоянии Вселенной и, хотя не дает полной информации, совершенно определенно свидетельствует о том, что событие типа Большого Взрыва действительно когда-то произошло.

47

Другими словами, наша Вселенная должна быть очень похожа на одну из моделей рис. 1.16.

Измерения, проведенные при помощи спутника COBE, позволили сделать еще одно важное открытие, заключающееся в том, что (хотя обнаруженное космическое фоновое излучение является высокооднородным и прекрасно описывается математически) Вселенная в целом не является совершенно однородной. В распределении излучения по звездному небу остаются очень небольшие, но вполне реальные неоднородности. Фактически мы вынуждены признать, что какие-то крошечные неоднородности присутствовали уже на самой ранней стадии развития Вселенной, а сейчас мы видим лишь их остатки, которые еще не «расплылись» и не превратились в однородное «загрязнение». Скорее всего, наша Вселенная похожа на модели рис. 1.23 (для демонстрации своей непредубежденности и беспристрастности я привожу примеры и открытой, и замкнутой Вселенной).

Развитие неоднородностей в замкнутой Вселенной будет приводить к образованию реальных наблюдаемых структур (звезд, галактик и т. д.), после чего в результате коллапса звезд, стягивания масс галактик к центрам и т. п. начнут формироваться черные дыры со своими сингулярными центрами (картина будет напоминать Большой Взрыв, протекающий в обратном порядке). Однако в целом ситуация не столь проста. Дело в том, что исходное состояние Большого Взрыва было приятно симметричным и однородным, а изображенное на рисунке конечное состояние представляет собой ужасную «смесь», в которой образующиеся черные дыры сбиваются в кучи, производя немыслимый беспорядок в момент Большого Сжатия (рис. 1.23, *а*). На рис. 1.23, *б* эволюция такой замкнутой модели представлена в виде последовательности «фотокадров», фиксирующих ряд событий. В модели открытой Вселенной образование черных дыр выглядит гораздо естественнее и «спокойнее» — во Вселенной была исходная сингулярность, которая

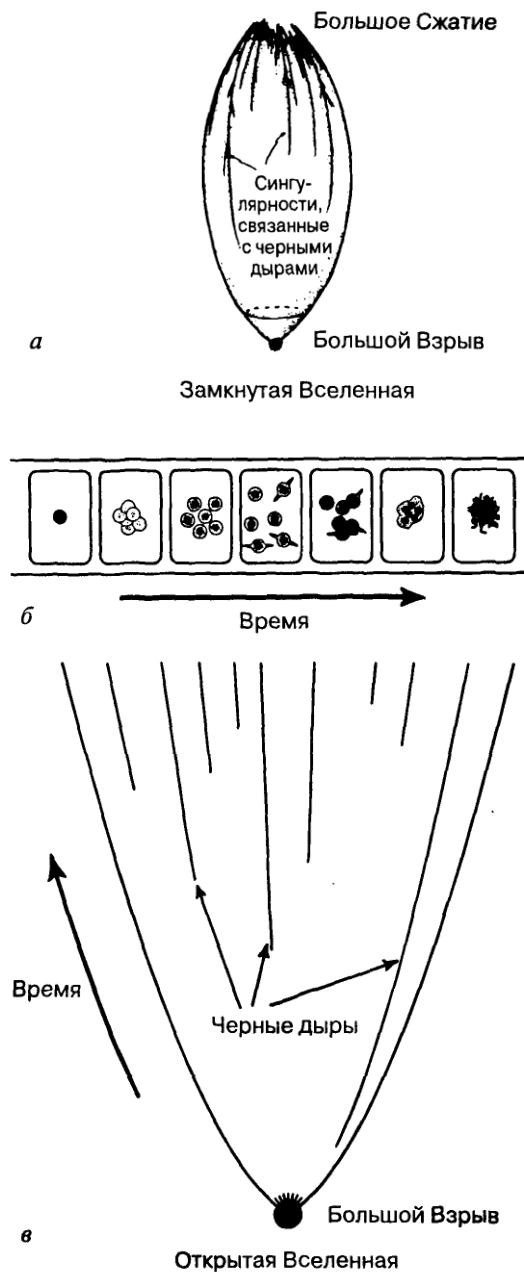
продолжает сохраняться и порождает новые сингулярности в центрах черных дыр (рис. 1.23, *в*).

Я еще раз обращаю ваше внимание на то, что в стандартных моделях Фридмана существует огромная разница между исходным состоянием и тем состоянием, которое предсказывается теорией для отдаленного будущего. Эта особенность моделей имеет важное значение, поскольку она связана с одним из фундаментальных законов природы — вторым началом термодинамики.

148

Рис. 1.23.

а — модель эволюции замкнутого мира с образованием черных дыр в виде объектов разного типа, достигших конечного состояния в своем развитии. Легко сообразить, что в этом случае к моменту гибели мира (Большому Сжатию, или Коллапсу) будет твориться ужасное «столпотворение»; *б* — развертка событий рис. *а* в виде набора отдельных «фотокадров»; *в* — эволюция Вселенной открытого типа с образованием черных дыр на разных этапах развития.



49

Этот знаменитый закон физики легко объяснить на примерах из обыденной жизни. Каждый из нас может представить или вспомнить простую житейскую ситуацию, когда бокал падает со стола и разбивается, заливая вином ваш любимый коврик (рис. 1.24, последовательность событий слева направо). Проблема заключается в том, что механика Ньютона не содержит никаких запретов на

протекание тех же процессов в обратном направлении, хотя никто никогда не видел, чтобы разбитый бокал и пролитое вино соединились снова, наполненный бокал заскочил на стол и т. д. Два разных направления времени указаны на рисунке стрелками, и я вновь повторяю, что по законам механики оба эти направления совершенно равноправны. Разницу между ними устанавливает лишь второе начало термодинамики, в соответствии с которым энтропия системы со временем должна возрастать. Величина, которую я назвал энтропией, значительно возрастает, когда бокал падает и разбивается, вследствие чего процесс и идет в направлении, указанном верхней стрелкой. Грубо говоря, энтропия есть мера беспорядка в системе. Для более глубокого понимания этой идеи нам необходимо ввести представление о так называемом *фазовом пространстве*.

Фазовое пространство представляет собой пространство с совершенно немислимым числом измерений, поскольку каждая его точка описывает координаты и импульсы всех частиц рассматриваемой системы. На рис. 1.25 я выбрал отдельную точку в этом огромном пространстве, и эта точка определяет расположение и характер движения всех частиц системы. При изменении координат и импульсов любой из частиц положение системы в фазовом пространстве изменится. Эволюцию всей системы в таком пространстве я изобразил на рисунке извилистой линией.

Ломаная линия на рисунке описывает обычную эволюцию системы частиц и не связана ни с каким представлением об эн-

50

Рис. 1.24. Законы механики обратимы относительно времени, однако в реальной жизни события всегда протекают в последовательности слева направо (показанной на рисунке), а не наоборот.



тропии. Для введения энтропии мы должны нарисовать небольшие «пузыри» вокруг областей, в которые последовательно попадает система, и объединить различные состояния, которые нельзя рассмотреть по отдельности. Выражение «нельзя рассмотреть по отдельности» несколько туманно и требует пояснений. Конечно, на самом деле все зависит от того, кто и насколько подробно рассматривает поведение системы. Это один из тех сложных и запутанных вопросов, которые раздражают физиков-теоретиков, когда речь заходит об энтропии. Для нашего рассмотрения будет вполне достаточно указать, что под «невозможностью рассмотреть по отдельности» мы подразумеваем некоторое так называемое «крупнозернистое» объединение группы состояний. Для нахождения энтропии необходимо проделать следующие операции: провести «крупнозернистое» объединение группы состояний (т. е. собрать состояния в некоторой области фазового пространства и «слепить» их в единое целое), определить объем этой области, взять логарифм от объема, а затем умножить его на так называемую постоянную Больцмана. Второе начало термодинамики устанавливает, что энтропия системы постоянно возрастает. Это утверждение может показаться простым и даже глуповатым — фактически постулируется лишь то, что если системе, находящейся в очень маленьком «ящичке» или отсеке, позволить двигаться произвольно, то она будет перебираться во все более крупные «ящики» (что очень похоже на правду хотя бы потому, что большие ящики имеют огромные размеры и у попавшей в них системы практически нет шансов случайно «забрести» в маленький ящик). Вот, пожалуй, и все,

51

Рис. 1.25. Второе начало термодинамики в действии.

С течением времени точка в фазовом пространстве проникает в новые, постоянно увеличивающиеся области (или «отсеки») пространства, в результате чего энтропия системы постоянно увеличивается.



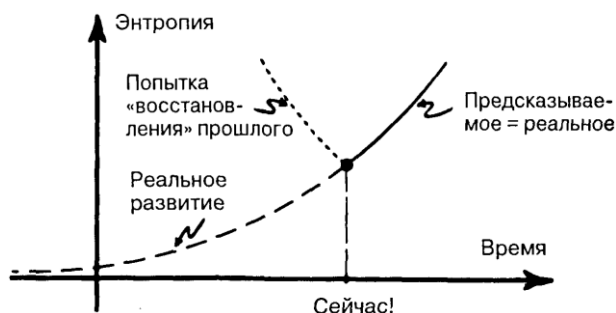
что можно сказать по этому поводу, — система, случайным образом блуждающая по фазовому пространству, будет попадать во все более крупные ящики или объемы. Именно это постулируется вторым законом. Впрочем, давайте еще немного подумаем о том, так ли все просто?

На самом деле смысл второго начала значительно шире, и сказанное выше разъясняет его лишь наполовину. Второе начало утверждает, что если нам известно состояние системы сейчас, то мы можем предсказать для нее наиболее вероятные состояния в будущем. Однако этот же закон приводит к совершенно неправильным ответам, как только мы пытаемся придать ему «обратную силу». Действительно, вернемся вновь к примеру с бокалом на краю стола. Разумеется, существует много вариантов, в результате которых бокал может оказаться в данном месте и в данный момент времени. Предположим, что нас интересует, какой из этих вариантов является наиболее вероятным. Применив наши рассуждения в обратном порядке, мы можем придти к выводу, что осколки бокала и пятно на ковре сами собой собрались в целый и наполненный бокал, который затем «подпрыгнул» и очутился на столе. Объяснение очевидно неправильно — гораздо вероятнее, что бокал поставил на край стола кто-то из присутствующих. Но при попытке понять, почему этот кто-то поставил бокал именно здесь, перед нами возникнет целый ряд

52

Рис. 1.26.

При попытке объяснения последовательности явлений на рис. 1.24 в обратном порядке мы «навязываем» системе возрастание энтропии при обращении времени, что и приводит к противоречию.



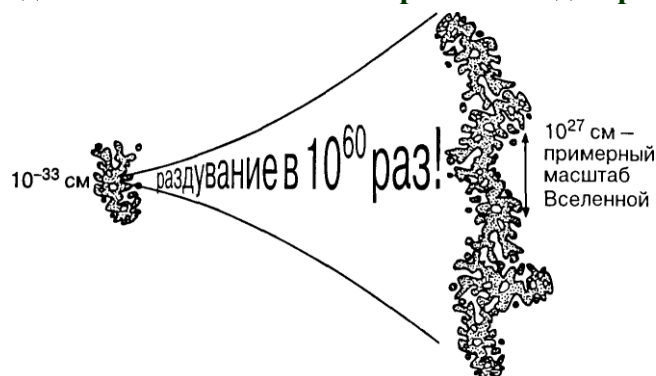
новых вопросов. Установление причинно-следственных связей в любом случае будет вызывать все новые вопросы, выявлять новые связи и т. д. Только такой путь мог бы привести нас к прошлым состояниям с уменьшающейся энтропией. Правильный ход событий описывается «актуальной» (иначе говоря, «реальной») кривой рис. 1.26 (а не всевозможными попытками восстановления прошлого), т. е. именно той кривой, которой соответствует постоянное уменьшение энтропии по мере перехода к прошлому.

Возрастание энтропии со временем объясняется тем, что система, перемещаясь в фазовом пространстве, занимает все большие объемы-ящики, однако уменьшение энтропии при переходе к прошлому носит совершенно иной характер. Действительно, давайте задумаемся над тем, какие процессы могли бы соответствовать возврату к прошлому с постоянным уменьшением энтропии? Можно ли при этом вернуться к моменту Большого Взрыва? По-видимому, проблема, порождающая столь явные и сильные противоречия, связана с какой-то весьма специфической особенностью самого Большого Взрыва. Попытки объяснения ситуации пока остаются малоуспешными. Например, выше я как-то отметил, что лично не очень доверяю модной теории раздувающейся (инфляционной) Вселенной. В этой достаточно популярной теории наблюдаемая в

огромных масштабах однородность Вселенной объясняется событиями, происходившими на самой ранней стадии ее развития. Предполагается, что в момент, когда возраст Вселенной составлял лишь около 10^{-36} секунды, произошло какое-то немыслимое по масштабу

53

Рис. 1.27. Попытка изображения проблемы «внутренне присущей» неупорядоченности Вселенной на ранней стадии развития.



расширение. Вопрос о том, как выглядела Вселенная на ранней стадии, теряет при этом подходе смысл, поскольку после такого чудовищного мгновенного увеличения объема (приблизительно в 10^{60} раз!) геометрия Вселенной стала выглядеть практически плоской. Это предположение позволяет обойти многие «острые углы», чем, возможно, и объясняются популярность и привлекательность описываемой теории.

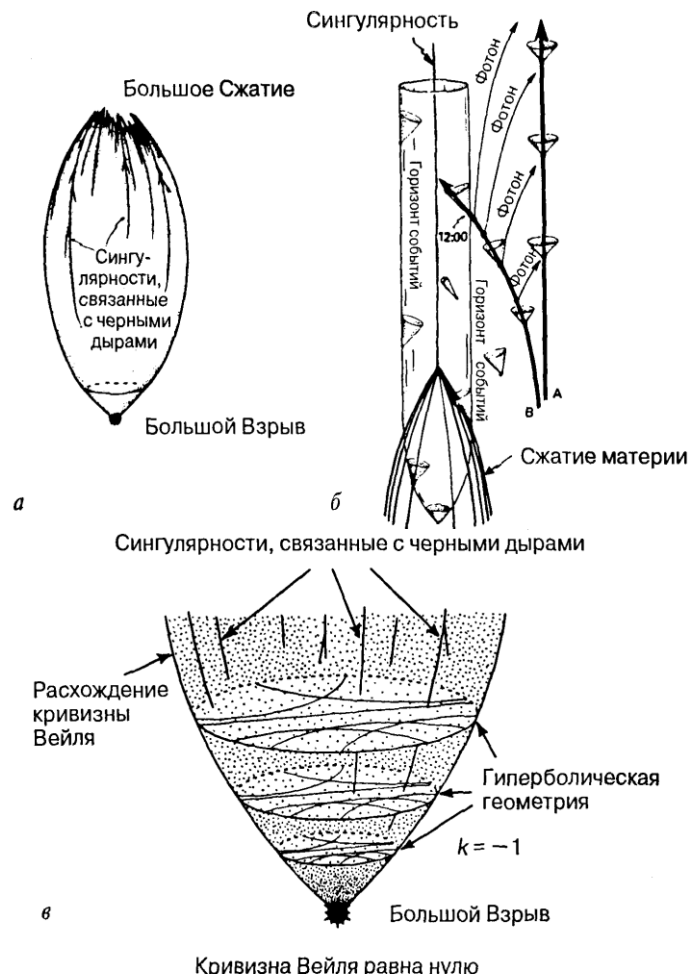
Однако, как это часто бывает в теории, предлагаемое объяснение всего лишь заменяет одну очень сложную проблему другой. Дело в том, что для описанного механизма требуется прежде всего, чтобы Вселенная находилась с самого начала в ужасном «беспорядке», который (даже если его чудовищно увеличивать в объеме!) все равно останется «беспорядком», в результате чего по мере расширения ситуация будет становиться все хуже и хуже (рис. 1.27).

Мне кажется, что приводимые доводы не объясняют наблюдаемую в настоящее время высокую степень упорядоченности Вселенной. Мы нуждаемся в теории, которая могла бы подсказать, на что был похож Большой Взрыв. Очевидно, что будущая теория должна как-то объединить понятия физики макромира и микромира, классической физики и квантовой механики. Более того, будущая теория должна объяснить причины как Большого Взрыва, так и наблюдаемой однородности мира. Возможно, конечно, что теория покончит и со столь понравившейся мне гиперболической вселенной Лобачевского.

54

Рис. 1.28.

a — общая картина замкнутой вселенной, развитие которой начинается с однородного, низкоэнтропийного Большого Взрыва (с тензором Вейля = 0) и заканчивается высокоэнтропийным Большим Сжатием, соответствующим слиянию многочисленных черных дыр (при этом тензор Вейля $\rightarrow \infty$); *b* — пространственно-временная диаграмма, описывающая коллапс отдельной черной дыры; *v* — эволюция открытой вселенной, также начинающаяся с однородного, низкоэнтропийного Большого Взрыва (с тензором Вейля = 0).



55

Вернемся еще раз к проблеме замкнутости и открытости рассматриваемых вселенных (рис. 1.28) и рассмотрим подробнее процессы формирования черных дыр. Они возникают в результате коллапса материальных объектов, приводящего к образованию сингулярностей, показанных линиями на пространственно-временных диаграммах. Мне хочется предложить вам одну идею, которую я называю *гипотезой кривизны Вейля* и которая, кстати, не является следствием ни одной из известных теорий. Повторю, что сейчас мы даже не представляем, какой должна быть будущая общая теория, поскольку мы не можем объединить существующие теоретические описания очень больших и очень малых физических объектов. Я уверен, однако, что эта теория должна каким-то образом включить именно то положение, которое я называю гипотезой кривизны Вейля. Напомню, что кривизной Вейля мы называем ту часть тензора Римана, которая связана с искажениями пространства и приливными эффектами. Предлагаемая мною гипотеза состоит в том, что по каким-то пока неясным причинам требуемая комбинация теорий должна приводить к нулевому (или хотя бы к очень малому) значению тензора Вейля в окрестности Большого Взрыва.

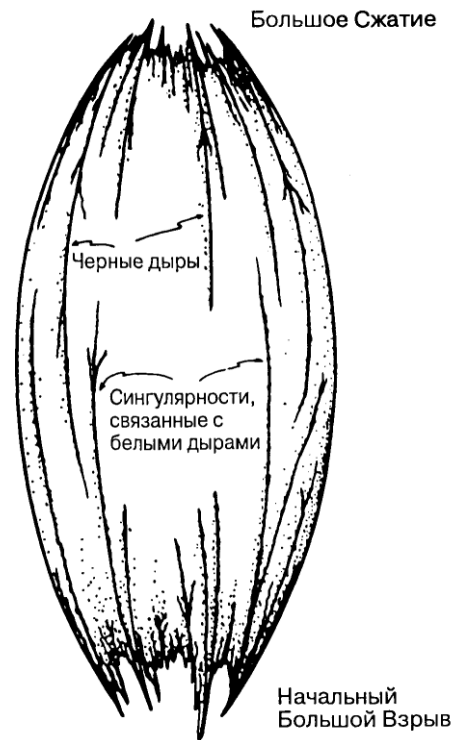
В этом случае общая картина эволюции вселенной будет напоминать рис. 1.28, *а* и *в*. Гипотеза кривизны Вейля предполагает асимметрию по отношению ко времени, поэтому она относится лишь к сингулярностям в прошлом, а не в будущем. Если бы тензор Вейля был достаточно «гибким» (т. е. его можно было применять в замкнутой модели и к прошлому, и к будущему), то нам бы удалось покончить с нынешней «ужасающей» картиной мира, в которой вселенная была и остается крайне беспорядочной (рис. 1.29). Ведь Вселенная, в которой мы живем, выглядит совсем по-иному!

Какова вероятность (строго говоря, *случайность* или *шанс*), что начальная сингулярность вселенной была еще слабее, чем нам представляется сейчас? Эту величину можно оценить по формуле Якоба Бекенштейна и Стивена Хокинга для энтропии черных дыр. В нашем случае она приводит к дроби, где в числителе единица, а в знаменателе — немисливо чудовищное число 10^{10} в степени 123. Если указанная формула применима к столь грандиозному объекту, как вселенная, то вы действительно получаете это фантастическое число (поскольку вероятность зависит от размеров). В той вселенной, которую я предлагаю, эту величину можно смело приравнять нулю.

56

Рис. 1.29.

Сняв указанное ограничение (условие, что тензор Вейля = 0), мы вновь получаем картину с высокоэнтропийным Большим Взрывом (тензор Вейля $\rightarrow \infty$). Такую вселенную пронизывали бы белые дыры, и в ней не выполнялся бы второй закон термодинамики (а это никак не согласуется с тем, что мы видим).

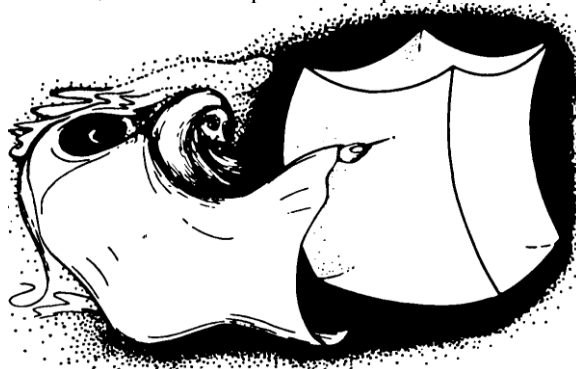


Сказанное подводит нас к вопросу о точности, с которой должны быть определены условия «организации» Большого Взрыва. Ситуация выглядит поразительной, и я попытался выразить ее карикатурой (рис. 1.30), на которой Творец выискивает сверхкрошечную точку в фазовом пространстве, соответствующую начальным условиям, при которых будущая вселенная приобретет привычный нам вид. Творцу необходимо определить положение точки в фазовом пространстве с указанной фантастической точностью ($10^{10^{123}}$). Число, о котором идет речь, столь велико, что мне не удалось бы выписать его в ряд, даже используя в качестве нулей все элементарные частицы вселенной.

57

Рис. 1.30.

Для создания вселенной, похожей на нашу, Творцу пришлось бы найти немислимо крошечную точку в фазовом пространстве и воткнуть в нее столь же крошечную иголку (ни точку, ни острие иголки на рисунке не удалось изобразить из-за малости размеров!). Выбранная точка должна была содержать лишь $10^{10^{123}}$ часть общего объема фазового пространства!



Я начал изложение с проблемы удивительной точности и согласованности физики и математики. Затем я попытался очень кратко рассказать о втором начале термодинамики, которое многие считают «приблизительным» и не оправдавшим возлагавшихся на него надежд (наверное, потому, что оно связано с понятиями случайности и вероятности), но которое на самом деле

отражает удивительно точные закономерности. Говоря о вселенной, мы обязаны оценить точность условий создания ее исходного состояния. Эта точность позднее должна быть отражена и в той будущей, еще не созданной теории, которая позволит объединить квантовую теорию и общую теорию относительности. В следующей главе я продолжу рассказ о процессах, объектах и задачах будущей теории.

Глава 2. Тайны квантовой механики



В гл. 1 я попытался показать, что структура окружающего нас физического мира очень сильно зависит от законов математики (как это было показано на рис. 1.3), причем точность, с которой математика описывает фундаментальные физические аспекты, иногда представляется просто поразительной и заставляет вспомнить название знаменитой лекции Джона Вигнера «Непостижимая эффективность математики в естественных науках». Список блестящих математических описаний природных явлений действительно выглядит весьма впечатляюще. Сюда входят, например:

Геометрия Евклида, которая на расстояниях порядка метров имеет точность порядка диаметра атома водорода. Как я уже отмечал в гл. 1, общая теория относительности не позволяет ей быть абсолютно точной, однако для практических целей точность евклидовой геометрии всегда исключительно высока.

Механика Ньютона, точность которой доходит до 10^{-7} (для дальнейшего повышения точности необходимо учитывать релятивистские эффекты).

Электродинамика Максвелла, которая в сочетании с квантовой механикой достаточно хорошо описывает взаимодействия при изменении масштаба в 10^{35} раз, т. е. от размеров элементарных частиц до межгалактических расстояний.

Эйнштейновская теория относительности, о которой я уже рассказывал в гл. 1. В той области, где она применима (и где она обобщает и включает в себя квантовую механику), точность этой теории доходит до 10^{-14} , что на семь порядков превышает точность механики Ньютона.

Квантовая механика, которая является темой этой главы и также представляет собой весьма точную теорию. Например, в квантовой электродинамике, представляющей собой сочета-

ние квантовой механики, электродинамики Максвелла и специальной теории относительности, точность некоторых расчетов доходит до 10^{-11} . В частности, можно особо отметить, что используемая в квантовой электродинамике так называемая «система единиц Дирака» включает в себя вычисленное значение магнитного момента электрона 1,001159652(46), которое прекрасно согласуется с экспериментально найденным значением 1,0011596521(93).

Особенно важно то, что во всех указанных теориях применение математических методов не только обеспечивает исключительную эффективность и точность описания физической картины, но и представляет интерес для развития самой математики, поскольку некоторые наиболее плодотворные идеи ее развития возникли именно на основе теоретических построений физики. В качестве примера можно указать обширные разделы математики, возникновение и развитие которых было обусловлено физическими исследованиями:

- теория действительных чисел;
- геометрия Евклида;
- математический анализ и теория дифференциальных уравнений;
- геометрия симплексов;
- дифференциальные формы и уравнения в частных производных;
- геометрии Римана и Минковского;
- теория комплексных чисел;
- теория гильбертова пространства;
- теория функциональных интегралов... и т. д.

Одним из наиболее ярких примеров такого рода является, безусловно, дифференциальное и интегральное исчисление, которое Ньютон и ряд других выдающихся математиков разработали в качестве математического *основания* обширного раздела физики, ныне известного под названием ньютоновской механики. Дальнейшее использование разработанных ими методов для решения

различных чисто математических задач оказалось исключительно благотворным для развития самой математики.

В гл. 1 я уже говорил о масштабах физических объектов, измеряемых в пределах от фундаментальных единиц (длина Планка и время Планка, которые столь малы, что для описания даже самой маленькой элементарной частицы нам необходимо увеличивать их в 10^{20} раз), через размеры и время жизни человека (интересно, что мы, люди, являемся наиболее устойчивыми

60

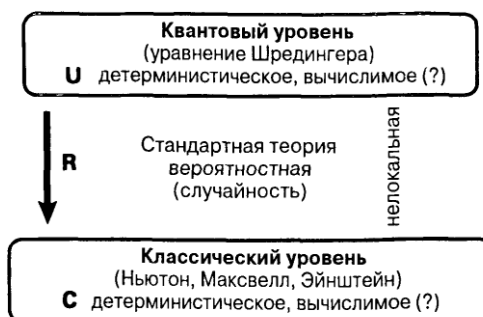
структурами физического мира), и наконец до возраста и радиуса Вселенной. При этом я особо подчеркивал важность того, что мы используем два совершенно разных метода для описания объектов физического мира, которые лежат на разных концах пространственно-временной шкалы. Как показано на рис. 2.1 (он просто повторяет рис. 1.5 первой лекции), мы используем квантовую механику для описания малых, квантовых уровней активности и классическую механику на уровне крупных объектов. Я обозначу эти уровни через U (унитарность, квантовый уровень) и C (классический уровень) и еще раз хочу подчеркнуть, что мы имеем дело, по-видимому, с совершенно разными законами в зависимости от масштаба изучаемых объектов.

Мне, как и любому другому физическому, представляется очевидным, что если мы правильно понимаем законы квантовой физики, то из нее должны выводиться законы классической физики. Проблема, однако, заключается в том, что на практике мы всегда пользуемся *либо* классическим, *либо* квантовым уровнем описания, что, к сожалению, напоминает подход древних греков, для которых было абсолютно естественным наличие в мире двух совершенно различных наборов законов природы, действующих соответственно на Земле и в мире Идей или божественных установлений. Величие и мощь подхода, развитого Галилеем и Ньютоном, заключаются именно в объединении этих двух наборов, позволяющем понимать мир в рамках единой системы физических законов. Похоже, что современная физика вновь возвращает нас к ситуации, когда мы имеем разные наборы законов для классического и квантового уровней описания мира.

Во избежание недоразумения мне бы хотелось сразу оговорить одно обстоятельство, связанное с рис. 2.1. Помещая рядом с именами Ньютона, Максвелла и Эйнштейна слова «классический уровень» или «детерминизм», я вовсе не хочу сказать, будто эти ученые сами верили в детерминизм поведения Вселенной. Мы просто не знаем этого точно, хотя почти с уверенностью можно утверждать, что Ньютон и Максвелл, например, не разделяли этой точки зрения, в то время как Эйнштейн ее поддерживал. Пометки «детерминизм» и «вычислимость» относятся лишь к созданным этими учеными теориям, а не к их личной вере. Точно так же к квантовому уровню добавлены слова «уравнение Шредингера», хотя я не думаю, что сам Шредингер считал свое уравнение пригодным для описания «всей физики». Я еще вернусь к этому вопросу, а пока просто напоминаю читателю, что люди и создаваемые ими теории — вовсе не одно и то же.

61

Рис. 2.1.



Двухуровневая картина на рис. 2.1 сразу вызывает очевидные вопросы: «Развивается ли Вселенная только в соответствии с законами квантовой механики? Можно ли объяснить все поведение Вселенной в рамках квантовой механики?» Прежде чем перейти к их обсуждению, я должен хотя бы очень кратко перечислить те проблемы, которые может описывать и объяснять квантовая механика.

- *Стабильность атомов.* До появления квантовой механики оставалось совершенно непонятным, почему электроны в атомах не падают по спирали на ядро. В классической физике существование устойчивых атомов запрещено.

- *Спектральные линии.* Только наличие в атомах квантовых энергетических уровней и

переходов между ними позволяет объяснить появление линий излучения, частоты которых мы можем наблюдать и предсказывать совершенно точно.

- *Химические силы.* Образование и существование молекул обусловлены силами, имеющими принципиально квантово-механический характер.

- *Излучение черного тела.* Вид спектра абсолютно черного тела может быть объяснен только при условии квантового характера излучения.

- *Надежность передачи наследственной информации.* Биологические организмы осуществляют эту передачу квантомеханическим путем на уровне молекул ДНК.

- *Лазеры.* Действие лазера основано на существовании индивидуальных квантовых переходов между квантовыми уровнями молекул, а также на квантовой природе самого светового излучения (фотоны являются частицами Бозе—Эйнштейна).

62

- *Сверхпроводимость и сверхтекучесть.* Эти явления, наблюдаемые при очень низких температурах, связаны с дальнедействующими квантовыми корреляциями (электронов и других частиц) в некоторых веществах.

- ... и т. д., и т. д.

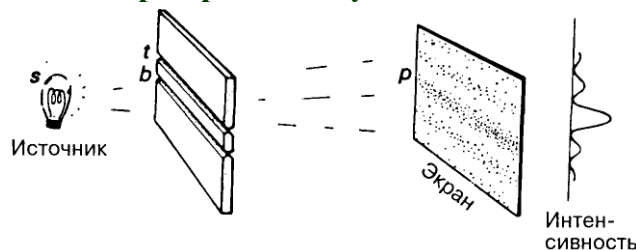
Другими словами, квантовая механика почти вездесуща и давно используется в окружающих нас бытовых приборах и в различных высокотехнологических изделиях (например, в компьютерах). Элементарные частицы описываются *квантовой теорией поля* (представляющей собой сочетание квантовой механики и специальной теории относительности Эйнштейна), точность которой, как я уже отмечал, доходит до 10^{-11} . Разумеется, приведенный список лишь частично отражает огромную роль квантовой механики в современной науке.

Мне хочется рассказать еще кое-что о квантовой механике. Рассмотрим рис. 2.2, на котором представлена схема типичного квантомеханического эксперимента. В соответствии с квантовой механикой свет состоит из частиц, называемых *фотонами*. На рисунке показаны соответственно источник *s* (испускающий отдельные фотоны), экран *p* (на котором регистрируется попадание фотонов) и расположенная между ними перегородка с двумя щелями *t* и *b*. Если бы фотоны были просто отдельными частицами, то попадание каждого фотона на экран можно было бы регистрировать как отдельное событие. Закрыв одну из щелей, экспериментатор видит на экране некоторое распределение «попадания фотонов», а закрыв другую — некоторое другое распределение. Необычное, квантовое поведение фотонов проявляется, например, в том, что, открыв обе щели, экспериментатор вдруг обнаруживает на экране места, куда фотоны совершенно перестают попадать. По какому-то неожиданному правилу два различных события, в которых фотон *мог* участвовать, взаимно исключают (гасят) друг друга. Ничего подобно классическая физика не знает, в ней из двух возможных событий происходит либо одно, либо другое. Два варианта развития событий в классике всегда приводят к одному из результатов, варианты не могут «сговориться» и взаимно «исчезнуть».

Результаты такого эксперимента могут быть описаны только в рамках квантовой теории, в соответствии с которой фотон *по дороге* к экрану вовсе не проходит через какую-нибудь одну из двух реально существующих щелей в перегородке. Его состоя-

63

Рис. 2.2. Эксперимент по рассеянию монохроматических фотонов при использовании перегородки с двумя щелями.



ние описывается таинственной комбинацией из двух соответствующих вероятностей, усредненных по некоторым *комплексным числам*, т. е. имеет вид

$$w x \text{ (вероятность A) } + z x \text{ (вероятность B),}$$

где *w* и *z* — комплексные числа. Для описанного эксперимента «вероятность A» соответствует траектории *stp* (источник-верхняя щель-экран), а «вероятность B» — траектории *sbp* (источник—нижняя щель—экран).

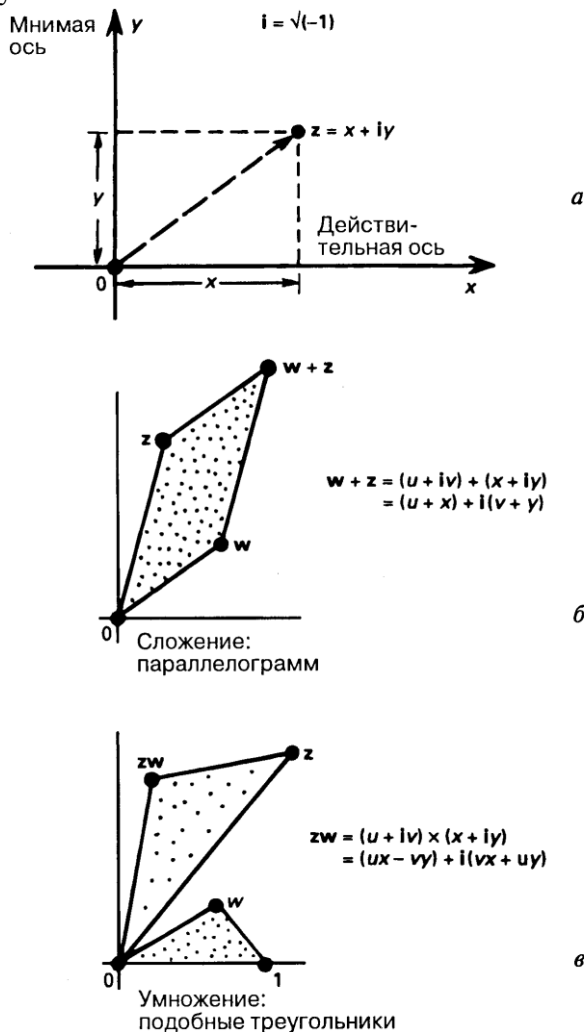
Вероятности событий могут взаимно «погашаться» именно потому, что множители перед вероятностями являются комплексными числами. При рассмотрении поведения фотона в рамках обычной теории вероятностей множители w и z всегда являются действительными. В квантовой механике они представляют собой комплексные числа, что сразу усложняет картину и разрушает простую вероятностную интерпретацию эксперимента. Это же обстоятельство не позволяет также описывать волновую природу частиц введением неких «волн вероятности», поскольку мы имеем дело с *комплексными волнами* вероятностей. Комплексные числа образуются из действительных чисел и так называемой мнимой единицы $i = \sqrt{-1}$. Их удобно изображать на двумерной плоскости, откладывая по оси x чисто действительные, а по оси y — чисто мнимые числа. В общем случае мы имеем комбинацию типа $2 + 3\sqrt{-1} = 2 + 3i$, которая изображается точкой на плоскости, как показано на рис. 2.3 (такое геометрическое представление комплексных чисел иногда называют диаграммой Аргана, а также комплексной плоскостью Весселя или Гаусса).

Для комплексных чисел, представленных точками на такой диаграмме, определены разнообразные правила сложения,

64

Рис. 2.3.

a — представление комплексных чисел на комплексной плоскости Весселя—Аргана—Гаусса; *б* — геометрическое представление операции сложения комплексных чисел; *в* — геометрическое представление операции умножения комплексных чисел.



65

умножения и т. д. Например, для сложения таких чисел используется правило параллелограмма, в соответствии с которым действительные и мнимые части этих чисел просто складываются по отдельности (рис. 2.3, *б*), для умножения — так называемое правило подобия треугольников (рис. 2.3, *в*) и т. п. Для специалистов, привыкших работать с такими диаграммами, комплексные числа быстро перестают казаться чем-то абстрактным и таинственным, поэтому читатель не должен думать, что их использование в квантовой механике делает эту теорию

особенно сложной или трудно воспринимаемой. В действительности комплексные числа широко используются в самых различных областях науки и техники, они являются достаточно простыми, и очень многие люди воспринимают их весьма конкретно. Так что читателя не должна беспокоить их кажущаяся (мнимая) сложность.

Однако проблемы квантовой механики не сводятся только к суперпозиции состояний с использованием комплексных чисел. До сих пор мы говорили лишь о квантовом уровне (правила которого я обозначил выше буквой U), на котором состояние системы действительно задается суперпозицией всех возможных состояний, усредненных посредством некоторых комплексных множителей. Временная эволюция такого квантового состояния называется шредингеровской или *унитарной* (именно поэтому я использовал в обозначениях букву U). Важнейшим свойством эволюции такого типа является *линейность*, т. е. для эволюции суперпозиции двух состояний можно считать, что каждое из состояний изменяется по индивидуальному закону, однако комплексные коэффициенты, по которым осуществляется усреднение, остаются *постоянными*. Такая линейность является характерной особенностью уравнения Шредингера, и на квантовом уровне это условие действительно выполняется для любой суперпозиции состояний.

Однако при увеличении масштаба какой-либо характерной величины происходит *изменение правил*. В теории увеличение масштабов соответствует переходу от квантового уровня U к классическому уровню C (этот переход обозначен на рис. 2.1 буквой R), а для физического эксперимента это означает, например, рассмотрение участка на экране. При таком переходе мелкомасштабное, квантовое событие срабатывает в качестве триггера, «запуская» значительно более крупное событие (какое только и может наблюдаться на классическом уровне!). Обычно этот переход в квантовой механике называют *коллапсом волновых функций* или *редукцией вектора состояний*.

66

В детали этого процесса (который я на рис. 2.1 обозначил буквой R) физики вдаваться не любят, поскольку при этом осуществляются операции, не имеющие ничего общего с упомянутой мною унитарной эволюцией. В суперпозиции двух возможных состояний необходимо рассматривать два комплексных числа и квадраты их модулей (это сводится лишь к вычислению квадратов расстояний до соответствующих точек на диаграмме Аргана), а вероятность этих состояний определяется просто отношением квадратов этих модулей. Однако эту операцию можно осуществить лишь после проведения «измерения» или «наблюдения», и вы можете считать, что этот процесс соответствует эффекту изменения масштаба при переходе от уровня U к уровню C на рис. 2.1. При этом вам необходимо изменить «правила игры», поскольку перестает сохраняться линейность суперпозиции. Именно в этот момент отношения квадратов модулей мгновенно обращаются в вероятности, т. е. при переходе от уровня U к уровню C система становится (вы делаете ее) недетерминированной. На уровне U все было в порядке, и система была детерминирована, но вы сами делаете ее недетерминированной, как только осуществляете «измерение».

Эта схема обычна для квантовой механики, но она весьма необычна для теории, претендующей на звание фундаментальной. Описываемый переход был бы полон глубокого смысла, если бы он выступал в качестве приближения к некоей более общей фундаментальной теории, но проблема состоит в том, что именно эта странная процедура рассматривается физиками-профессионалами в качестве основы фундаментальной теории!

Мне хочется рассказать еще кое-что о комплексных числах. На первый взгляд они действительно представляются довольно отвлеченными понятиями, которые витают где-то рядом, а потом неожиданно, как только кому-то вздумается вычислить квадраты их модулей, обращаются в привычные нам вероятности. В действительности они имеют, как я уже пытался показать, очень простой геометрический смысл, который легко продемонстрировать на следующих простых примерах. Для этого мне придется ввести еще некоторые простые обозначения из квантовой механики. Речь пойдет, в частности, о так называемых скобках Дирака, форма записи которых может показаться кому-то из вас даже забавной. Они представляют собой своеобразные профессиональные «стенографические» значки. Например, выражение $|A\rangle$ означает, что система находится в квантовом состоянии A , а внутри скобки заключено просто некое описание

67

этого состояния. Очень часто полное квантовомеханическое состояние системы (которое принято обозначать греческой буквой ψ) является суперпозицией других состояний, вследствие чего, например, для описанного выше эксперимента с двумя щелями имеет место соотношение

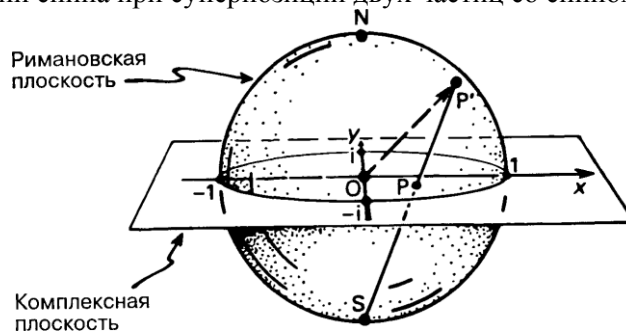
$$|\psi\rangle = w|A\rangle + z|B\rangle.$$

В квантовой механике нас интересуют не столько значения каких-то чисел, сколько их отношения. Поэтому в ней существует и правило, в соответствии с которым умножение состояния на любое комплексное число (за исключением нуля, разумеется) не изменяет общей картины. Другими словами, физический смысл имеют лишь отношения комплексных чисел. При переходе R мы должны рассматривать вероятности (т. е. отношения квадратов модулей); однако, оставаясь на квантовом уровне, мы еще можем надеяться на какую-нибудь прямую физическую интерпретацию самих комплексных чисел и их отношений, даже не переходя к вычислению модулей. Для этого можно воспользоваться, например, описанной выше так называемой *сферой Римана* (см. рис. 1.10, в), которая, строго говоря, относится не к самим комплексным числам, а к их *отношениям*. Разумеется, используя отношения, мы всегда должны заботиться о том, чтобы знаменатель не обращался в нуль (в результате чего вся дробь будет стремиться к бесконечности). На такой сфере может быть представлено все множество комплексных чисел (включая значения на бесконечности), причем в результате изящного метода проекции (рис. 2.4) экваториальное сечение такой сферы представляет собой окружность единичного радиуса на плоскости Аргана. Очевидно, что, используя южный полюс сферы в качестве центра проекции, мы можем перевести каждую точку из экваториальной плоскости на сферу Римана. При этом, как видно из рисунка, сам полюс *соответствует бесконечно удаленным точкам* на этой плоскости.

Сфера Римана (пока мы будем рассматривать ее в качестве абстрактного, математического объекта) очень удобна для описания квантовых систем, которые могут находиться в двух разных квантовых состояниях или являться суперпозицией таких состояний. В этом примере мне очень нравится то, что для частиц с половинным спином (а такими являются электроны, протоны, нейтроны) различные комбинации спиновых состояний легко могут быть представлены в геометрическом виде. Частицы с полуцелым спином могут находиться в двух спиновых состоя-

Рис. 2.4. Сфера Римана.

Проекция южного полюса сферы S через точку P (соответствующую отношению $u = z/w$ на комплексной плоскости) обозначается точкой P' на сфере. Направление OP' от центра сферы O соответствует ориентации спина при суперпозиции двух частиц со спином $1/2$.



ниях (эти состояния соответствуют двум направлениям момента собственного вращения), которые можно назвать просто верхним и нижним состояниями. Суперпозицию двух состояний при этом можно символически записать в виде уравнения

$$|\mathcal{G}\rangle = w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$$

Различные комбинации таких спиновых состояний соответствуют вращениям относительно других осей, положение которых зависит от отношения комплексных чисел w и z , дающего нам еще одно комплексное число $u = z/w$. Направление спиновой оси определяется прямой, проведенной через центр сферы Римана и точку на сфере, соответствующую числу u , так что комплексные числа в данном случае имеют совершенно конкретный физический смысл. Вообще говоря, уловить этот смысл бывает иногда достаточно трудно, но для частиц с полуцелым спином он очевиден.

Мне хотелось бы обратить ваше внимание на следующее обстоятельство. Конкретная направленность спинов (вверх-вниз) в рассмотренном примере несущественна, и спины в принципе могут быть направлены как угодно (влево-вправо, вперед-назад), т. е. исходное значение двухчастичного состояния не игра-

ет никакой роли (исключение составляет выделенное начальное состояние с противоположно направленными спинами). В соответствии с одним из законов квантовой механики все спиновые состояния одинаково удобны для рассмотрения, что и было показано выше.

Квантовая механика представляет собой непростой объект. Эта очень красивая и элегантная теория содержит также много таинственного и является, в сущности, весьма загадочной, обескураживающей и парадоксальной наукой. Мне хотелось бы особо подчеркнуть, что тайны можно довольно четко разделить на *два разных класса*, которые я буду далее обозначать буквами *Z* и *X*.

Термином *Z*-тайны, или тайны-головоломки (я выбрал для их обозначения букву *Z* из соответствующего английского слова *puZZle*), я называю некоторые явления физического мира, а именно, те прекрасные эксперименты, которые наглядно демонстрируют нам загадочное поведение квантовых объектов. Некоторые из этих явлений даже не изучены до конца, но они не оставляют сомнений в правильности квантовой механики. В частности, к *Z*-тайнам можно отнести *корпускулярно-волновой дуализм*, уже упоминавшийся *спин*, а также *нуль-измерение* и *нелокальные эффекты*, о которых я расскажу позднее. Эти явления действительно загадочны и непонятны, но почти никто не отрицает их реальность — они являются частью окружающего нас мира.

Существуют, однако, проблемы совсем другого типа, которые можно назвать тайнами-парадоксами или *X*-тайнами (от последней буквы в слове *paradox*). На мой взгляд, их существование наглядно показывает нам, что разработанная теория не является полной или даже в чем-то ошибочна, т. е. нуждается в существенной дальнейшей доработке. Наиболее важной *X*-тайной является так называемая *проблема измерения*, о которой я уже упоминал. Она заключается в том, что при переходе *R* (от квантового уровня к классическому) правила изменяются. Пока нам неясно даже то, станет ли природа операции *R* понятнее при глубоком понимании поведения более сложных и больших квантовых систем (т. е. возникает ли она из-за некоторой приблизительности нашего подхода или является вообще иллюзорной). Наиболее известным вариантом *X*-тайны выступает знаменитый парадокс, связанный с *котом Шредингера*. В этом эксперименте (разумеется, мысленном, поскольку сам Шредингер был весьма гуманным человеком) несчастный кот находится в

70

странном (полуживом-полумертвом) состоянии. Разумеется, вы не встретите таких котов в реальности, но связанная с этим задача имеет глубокий смысл, и я расскажу о ней подробнее ниже.

Я считаю, что мы вполне можем «ужиться» с *Z*-тайнами, однако *X*-тайны не дают нам возможность создать достаточно серьезную физическую теорию (я подчеркиваю, что это мой подход к проблеме). Есть много других точек зрения на существующие (или кажущиеся?) парадоксы квантовой механики или (как мне иногда кажется) много разных подходов к *точкам зрения!*

Мне бы хотелось еще немного рассказать о *Z*-тайнах, а затем перейти к обсуждению более серьезных проблем, связанных с *X*-тайнами. Я попробую описать две наиболее известные проблемы, связанные с *Z*-тайнами. Первая из них относится к *квантовой нелокальности* или, как предпочитают говорить некоторые физики, квантовой запутанности (иногда ее называют взаимосвязанностью или переплетенностью). Идея этого весьма необычного эффекта была выдвинута Эйнштейном, Подольским и Розеном, вследствие чего его часто называют просто ЭПР-парадоксом или ЭПР-экспериментом. Простейший вариант этого эксперимента был предложен Дэвидом Бомом и выглядит следующим образом. Предположим, что частица со спином 0 распадается на две частицы со спином $1/2$ (например, на электрон и позитрон), которые разлетаются в противоположных направлениях. Затем в какой-то момент времени экспериментатор измеряет значения спинов этих частиц, когда они уже находятся в весьма удаленных друг от друга точках *A* и *B*.

Существует знаменитая теорема Джона Белла, которая утверждает, что смешанная вероятность, соответствующая результатам измерений в точках *A* и *B* (и любой другой «локально-реалистической» модели), будет противоречить предсказаниям квантовой механики. Под «локально-реалистической» моделью я подразумеваю любую модель, в которой электрон и позитрон (находящиеся в разных точках *A* и *B*) соответствуют двум различным и разделенным объектам, т. е. никак не связаны друг с другом. Джон Белл весьма убедительно показал, что смешанные вероятности после измерения будут противоречить квантовой теории. Это обстоятельство является весьма важным, поскольку результаты дальнейших экспериментов (проведенных, например, в Париже Аленом Аспектом) действительно соответствовали

квантовомеханическим предсказаниям. В этом эксперименте (схема которого показана на рис. 2.5) измерялись поляризации-

71

Рис. 2.5.

a — частица со спином 0 распадается на две частицы со спином $1/2$, например, на электрон E и позитрон P. Измерение спина одной из этих частиц, очевидно, приводит к *мгновенной* фиксации точного значения второй частицы; b — эксперимент группы Алена Аспекта. Два противоположно направленных фотона испускаются источником в запутанном состоянии. Решение о том, поляризацию какого из фотонов следует измерить, принимается только тогда, когда они уже удалены друг от друга на значительное расстояние, не позволяющее никаким образом передать информацию о результате измерения.



онные состояния двух фотонов, вылетающих в противоположных направлениях из одного источника.

Решение о том, какое из направлений поляризации фотонов будет измерено, принималось лишь после того, как фотоны удалялись от источника на значительное расстояние и попадали в детекторы *A* и *B*. Результаты измерений показали, что смешанная вероятность поляризационных состояний фотонов, зарегистрированных в детекторах *A* и *B*, согласуется с квантовомеханическими предсказаниями (как ожидали почти все, включая и самого Белла), но противоречит естественному предположению о том, что эти два фотона являются отдельными, совершенно независимыми объектами. Эксперимент Аспекта продемонстрировал наличие эффектов квантовой запутанности на расстоянии около 12 метров, но я уже слышал, что в некоторых экспериментах по квантовой криптографии аналогичные эффекты зарегистрированы на расстояниях порядка километров.

Я еще раз хочу подчеркнуть, что в таких *нелокальных* эффектах события, происходящие в различных точках *A* и *B*, оказываются каким-то таинственным образом связанными друг с дру-

72

гом. Квантовая запутанность (*entanglement*) — штука довольно тонкая. События оказываются связанными таким образом, что характер связи исключает всякую возможность передачи сигнала из точки *A* в точку *B* (этот факт существенно важен для согласования квантовой механики с теорией относительности). В противном случае квантовую запутанность можно было бы просто использовать для передачи сигнала со скоростью большей, чем скорость света. Этот эффект является чисто квантовым, и в классической механике мы не можем даже представить себе его аналог (т. е. ситуацию, когда объекты одновременно следует считать и совершенно независимыми, и связанными друг с другом). Все это в самом деле весьма необычно.

Еще один пример *X*-тайн связан *нуль-измерением*, которое можно проиллюстрировать на примере так называемой *задачи Элиура—Вайдмана об испытании бомб*. Предлагаю читателю вообразить себя членом группы террористов, которая захватила склад с большим количеством бомб. Головная часть каждой из них снабжена сверхчувствительным детектором, к которому прикреплено зеркальце. Детонатор срабатывает при попадании на зеркальце даже одного-единственного кванта света. При этом известно, однако, что во многих бомбах детонаторы испорчены, т. е. рычажки-плунжеры, соединенные с зеркальцем, заржавели и уже не срабатывают при воздействии только одного фотона. К зеркальцу на головной части такой бомбы можно относиться как к обычному отражателю, а не как к подвижной детали детонатора. Поведение бомб при воздействии фотонов показано на рис. 2.6, *a*. Задача террористов заключается в том, чтобы найти среди набора одинаковых по виду бомб именно такую, у которой детонатор заведомо исправен. Классическая физика вообще не позволяет решить эту задачу, поскольку единственный

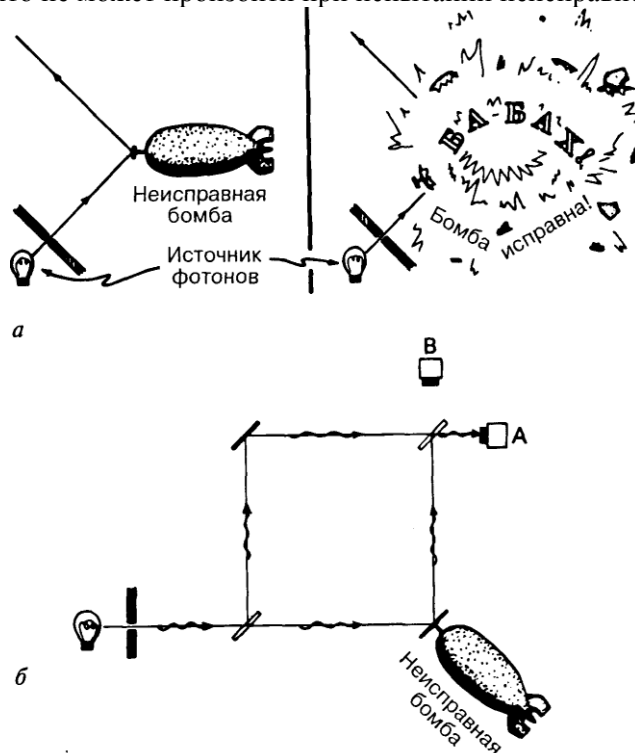
способ определить исправность детонатора заключается в каком-либо воздействии на него (его можно, например, потрогать, осветить и покачать), после чего исправная бомба должна просто взорваться.

Возможно, следующее утверждение покажется вам очень странным, но квантовая механика позволяет нам провести испытание того, что *могло бы* случиться, но не произошло (философы называют такую ситуацию *противофактической*). Сейчас я продемонстрирую, каким замечательным образом квантовая механика дает нам возможность получать реальные результаты из некоторых противофактических данных! На рис. 2.6, б приведена схема эксперимента, предложенного Элицуром и Вайдманом в 1993 г. для решения поставленной задачи. Предполо-

73

Рис. 2.6.

а — задача Элицура—Вайдмана о выборе исправных бомб. Сверхчувствительный детонатор исправной бомбы срабатывает при воздействии одиночного фотона видимого света, а в неисправной бомбе детонатор «заедает». Задача заключается в нахождении исправной бомбы среди большого числа неисправных; б — схема тестирования бомб. При испытании исправной бомбы зеркало внизу справа срабатывает как простое измерительное устройство. Если это измерение показывает, что фотон прошел по другой траектории, то детектор в точке В зарегистрирует фотон, что не может произойти при испытании неисправной бомбы.



жим, что мы имеем дело с бомбой-болванкой, зеркальце которой из-за дефекта не реагирует при отражении фотона. Фотон от источника сначала проходит через полупрозрачное (иногда его называют полупосеребренным) зеркало, которое пропускает только половину попадающего на него света и отражает другую половину. Вы можете считать, что зеркало просто пропускает

74

половину падающего на него светового потока и отражает другую половину. Однако на квантовом уровне с одиночными фотонами могут происходить очень странные вещи. Действительно, каждый отдельный фотон, испускаемый индивидуальным источником, можно представить в виде квантовой суперпозиции двух возможных траекторий фотона, описывающих пропускание и отражение. Зеркало на бомбе установлено под углом 45° к траектории пропускаемого пучка фотонов. Отраженная часть пучка еще раз отражается (на этот раз целиком) от другого, полностью посеребренного зеркала (также расположенного под углом 45°), после чего оба луча (или, точнее, обе половинки исходного пучка) соединяются при помощи еще одного полупосеребренного зеркала, как показано на рис. 2.6, б. Детекторы при этом располагаются в точках А и В.

Рассмотрим, что происходит с одиночным фотоном, испущенным источником, при попадании Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

на головную часть неисправной бомбы. На первом полупосеребряном зеркале квантовое состояние фотона расщепляется на два отдельных состояния, одно из которых соответствует фотону, пропущенному через полупосеребряное зеркало к неисправной бомбе, а второе — фотону, отраженному по направлению к неподвижному зеркалу (такая суперпозиция возможных траекторий фотона в точности совпадает с суперпозицией, рассмотренной выше для эксперимента с прохождением фотона через две щели на рис. 2.2, а также, что имеет особое значение, наблюдается при сложении спинов). Предположим, что длины траекторий между двумя полупрозрачными зеркалами совершенно одинаковы. Для определения состояния фотона в момент достижения им регистрирующих устройств необходимо сравнить траектории обеих составляющих суперпозиции состояний. Легко заметить, что траектории «взаимопогашаются» в точке В, но одна из них продолжается дальше до точки А, вследствие чего в схеме должен иногда срабатывать только детектор А, в то время как детектор В не должен ничего регистрировать во всех случаях. Это весьма похоже на интерференционную картину, наблюдаемую в экспериментах рис. 2.2, когда интенсивность облучения некоторых участков постоянно равна нулю вследствие взаимного гашения квантовых состояний в этих точках. Таким образом, при тестировании (т. е. облучении) неисправной бомбы детектор А должен срабатывать постоянно, а детектор В — столь же постоянно не выдавать никаких сигналов.

Рассмотрим далее ситуацию с тестированием исправной бомбы. В этом случае зеркало на бомбе перестает быть простым

75

отражателем, а его сдвиг превращает саму бомбу в некоторое *измерительное устройство*, которое регистрирует одно из двух возможных событий (наличие или отсутствие падающего фотона). Если фотон проходит через полупрозрачное зеркало и попадает на зеркало детонатора, то событие регистрируется и... бомба взрывается с оглушительным «Ба-бах!!!». Тем самым мы определяем исправную бомбу, но, к сожалению, тут же теряем ее, так что нам не остается ничего иного, как установить на стенд следующую бомбу. Однако существует возможность, что при проведенном измерении (напоминаю, что измерительным прибором фактически является сама бомба) взрыва не произойдет из-за того, что фотон не попадет на зеркальце, а пройдет по другой траектории (именно эту ситуацию и обозначает термин «нуль-измерение»). В этом случае фотон попадает на второе полупрозрачное зеркало, где может быть с одинаковой вероятностью отражен или пропущен. В последнем случае он достигает точки В, где и регистрируется детектором. Таким образом, при тестировании исправной бомбы каждый случай регистрации фотона детектором В можно рассматривать как следующее событие: «бомба сработала в качестве измерительного устройства и выделила одну из двух возможных траекторий фотона». Существенно важным при этом является то, что испытываемая исправная бомба сама является измерительным устройством, участвует в процессе «компенсации» длин траекторий и позволяет зарегистрировать фотон в детекторе В даже без непосредственного взаимодействия с этим фотоном (это и есть *нуль-измерение!*). Ведь если фотон не прошел по одной из двух возможных траекторий, то он прошел по другой! Когда детектор В регистрирует поступление фотона, мы понимаем, что бомба сработала в качестве измерительного прибора и является исправной. Более того, каждая регистрация фотона детектором В, не сопровождающаяся взрывом, означает, что тестируемая бомба *однозначно* является исправной. Наша уверенность связана с тем, что фотон действительно прошел по другой траектории.

Описанный эксперимент может показаться весьма странным, однако в 1994 г. во время визита в Оксфорд Зейлингер рассказал мне, что он и его коллеги действительно провели предложенный выше эксперимент по тестированию бомб (разумеется, бомбы не были боевыми, а наши коллеги-физики не террористы). Зейлингер и его друзья (Квят, Вайнфуртер и Касевич) обнаружили еще один, более эффективный вариант решения этой задачи, при котором тестирование осуществляется вообще без

76

расхода бомб. Я не помню, за счет каких осложнений измерительной установки им удалось этого добиться, но в целом можно констатировать, что задача о тестировании бомб фактически уже решена — при очень небольшом числе взрывов (или даже вообще без взрывов) можно гарантированно выделить из некоторого множества бомб заведомо исправную.

Давайте пока остановимся на этих рассуждениях, так как приведенные примеры, как мне кажется, уже наглядно продемонстрировали совершенно необычный характер тех квантово-механических явлений, которые я выше назвал *Z*-тайнами. На мой взгляд, какие-то проблемы

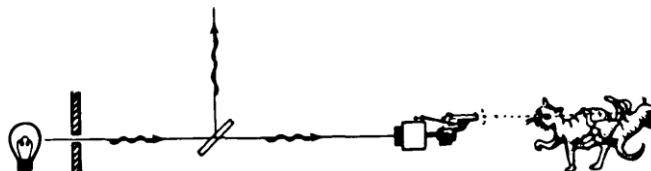
возникают вследствие того, что некоторые люди, размышляя о таких задачах, приходят в восторг («Ах, боже мой, как изумительна квантовая механика!»). Все это совершенно правильно, и квантовая механика — действительно замечательная вещь (хотя бы потому, что она включает в себя описанные *Z*-тайны в качестве реальных явлений), однако те же люди далее начинают считать, что сказанное относится и к *X*-тайнам, а это, на мой взгляд, совершенно ошибочно!

Вернемся к знаменитой задаче о коте Шредингера. Схема мысленного эксперимента, представленная на рис. 2.7, не совсем совпадает с первоначальным замыслом самого Шредингера, но это несущественно для общего рассмотрения. Мы вновь имеем дело с источником фотонов и полупрозрачным зеркалом, которое переводит квантовое состояние падающего фотона в некоторую суперпозицию состояний (одно, как и прежде, соответствует проходящему фотону, а второе — отраженному). При срабатывании регистрирующего устройства, расположенного на траектории пропускаемого фотона, выстрел из пистолета убивает несчастного кота. Этого кота можно рассматривать в качестве конечного измерительного устройства, т. е. считать, что мы просто переходим от квантового уровня измерения к макроскопическому (а именно, к коту, который может быть живым или мертвым). Проблема заключается в том, что если вы считаете такой переход (от квантов к коту) законным, то должны также считать, что актуальное (реальное?) состояние кота тоже представляет собой некоторую суперпозицию двух состояний (жизни и смерти). Действительно, если фотон описывается суперпозицией двух состояний (двух траекторий), а детектор — суперпозицией двух состояний (включен/выключен), то было бы естественным (и последовательным) описывать кота суперпозицией двух состояний (жизнь/смерть). Проблема была сформулирована очень давно, но найти ее удовлетворительное

77

Рис. 2.7. Кот Шредингера.

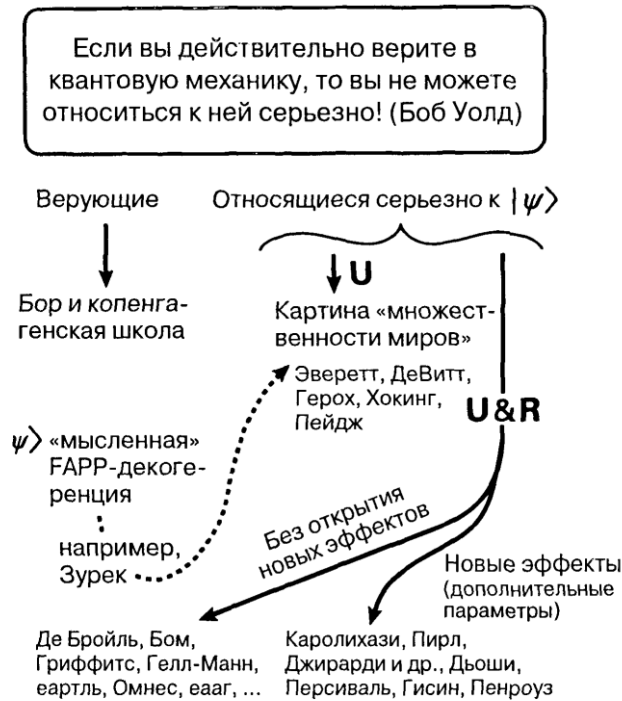
Квантовое состояние системы представляет собой линейную суперпозицию отраженного и пропущенного фотонов. Пропущенный фотон запускает некоторое устройство, убивающее кота, вследствие чего в соответствии с *U*-эволюцией состояние кота представляет собой суперпозицию жизни и смерти.



решение пока не удалось. Число мнений и предлагаемых решений чуть ли не превосходит число физиков, связанных с квантовой механикой (такое превышение вполне возможно, поскольку многие физики меняли свои мнения в процессе обсуждения). Мне хочется привести весьма общее мнение, высказанное однажды в приятной дружеской беседе за ужином Бобом Уолдом: «Если вы действительно *верите* в квантовую механику, то вы не можете относиться к ней *серьезно*». Это замечание представляется мне очень глубоким и верным по отношению не только к самой квантовой механике, но и к ученым, связанным с нею. Я даже попытался как-то разделить физиков, работающих в этой области, на несколько групп, как это показано на рис. 2.8. Прежде всего в соответствии со сказанным выше я разделил их на *верующих* и *серьезных*. Разумеется, вы вправе спросить, что я подразумеваю под серьезностью? Мне кажется, что серьезные люди для описания реального мира используют вектор состояний $|\psi\rangle$, поскольку этот вектор является *реальным*. С другой стороны, те специалисты, которые действительно «верят» в квантовую механику, не считают этот подход правильным. Я попытался классифицировать по этому признаку большое число известных физиков. Насколько мне удалось выяснить, Нильс Бор и многие другие представители так называемой копенгагенской школы могут быть отнесены к «верующим». Сам Нильс Бор верил в квантовую механику, но не относился к вектору $|\psi\rangle$ как к серьезному описанию мира. Для него этот вектор оставался чисто мысленной конструкцией, т. е. он считал, что этот вектор является способом описания мира, но не самим миром. Именно это обстоятельство заставило Джона Белла обозначить квантовую механику аббревиатурой FAPP (*For All*

78

Рис. 2.8.



Practical Purposes, т. е. для всех практических целей). Самому Беллу это сокращение очень нравилось (мне кажется, потому что оно имеет слегка уничижительный или обидный характер). Этот подход связан с концепцией «декогеренции», о которой я очень кратко расскажу позднее.

Вы можете заметить, что многие ревностные сторонники FAPP (например, Зурек) помещены в центре диаграммы рис. 2.8. Впрочем, возможно, мне еще надо объяснить, что я подразумеваю под центром диаграммы. Дело в том, что я разделил «серьезных» физиков на разные группы. Часть из них верит в U-эволюцию, т. е. воспринимает ее в качестве единого процесса (эту точку зрения можно назвать верой в картину *множественности миров*). В такой картине рассматриваемый кот действительно является одновременно живым и мертвым, однако следует учитывать, что два состояния кота при этом в некотором смысле относятся к двум разным мирам или вселенным (ниже я

79

расскажу об этом подробнее). Именно поэтому я выделил физиков, придерживающихся (придерживавшихся когда-то раньше) этой точки зрения, в особую группу и поместил ее в центре диаграммы.

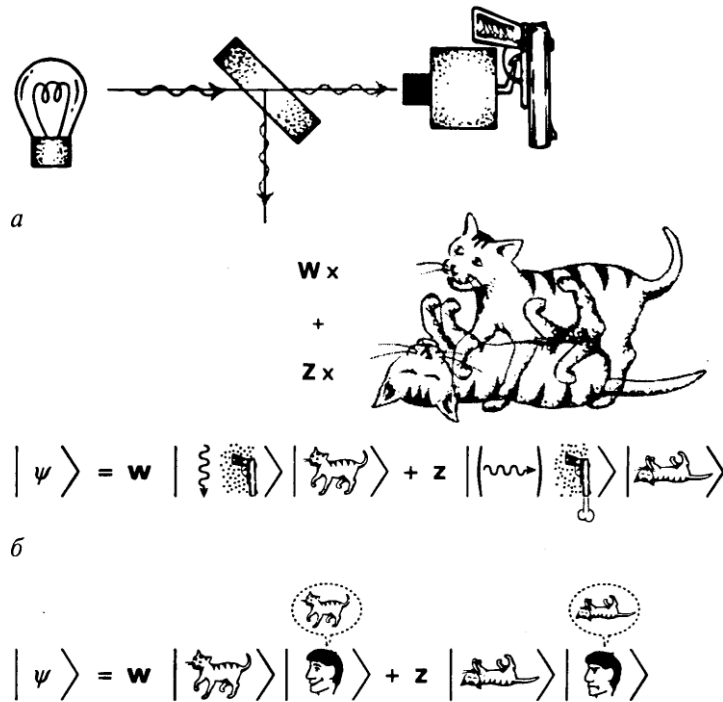
Физики, которые, по моему мнению, *действительно серьезно* относятся к вектору состояний $|\psi\rangle$ (я лично вхожу в их число), верят, что процессы U и R являются реальными. При этом не только осуществляется унитарная эволюция U (до тех пор, пока система остается в каком-то смысле малой), но и происходит то, что я обозначил через R-процесс (это не точно R, но нечто ему подобное). Если вы относите себя к группе верующих, то можете выбрать для себя, по-видимому, одну из следующих точек зрения. Прежде всего вы можете считать, что никакие новые физические эффекты учитывать не следует (к этой группе я отношу де Бройля и Бома, а также некоторых очень далеких от них по идеологии физиков — Гриффитса, Гелл-Манна, Хартля, Омнеса). При таком подходе операция R играет какую-то вспомогательную роль по отношению к стандартной U-эволюции квантовой механики, однако открытия новых эффектов ожидать не стоит. И наконец, существует группа физиков (к ней отношусь и я лично), придерживающихся второй «действительно серьезной» точки зрения, которые полагают, что в будущем произойдет нечто новое, способное изменить всю структуру квантовой механики. Подходы R и U действительно противоречат друг другу — им на смену должно прийти нечто новое. Имена физиков этой группы я собрал в правом нижнем углу диаграммы.

Мне хочется чуть подробнее остановиться на роли математики и некоторых других проблемах, связанных с котом Шредингера. Давайте еще раз рассмотрим ситуацию с котом и попробуем ввести нормировку (вес состояний) при помощи комплексных чисел w и z (рис. 2.9, *a*). Фотон расщепляется на два состояния, поэтому, если вы серьезно относитесь к квантовой механике и верите в реальность вектора состояний, вам следует также поверить в то, что кот действительно представляет собой некоторую суперпозицию состояний, в которых он одновременно и жив, и

мертв. Эти состояния (жизнь/смерть) очень удобно записать через скобки Дирака, как показано на рис. 2.9. Отметьте для себя, что в скобки Дирака коты помещаются точно так же, как обычные символы! В рассматриваемом случае кот не представляет собой целостный объект, поскольку в его описание входят пистолет, фотон и окружение, причем каждый элемент описания представляет собой произведение всех эффектов одновременно

80

Рис. 2.9.

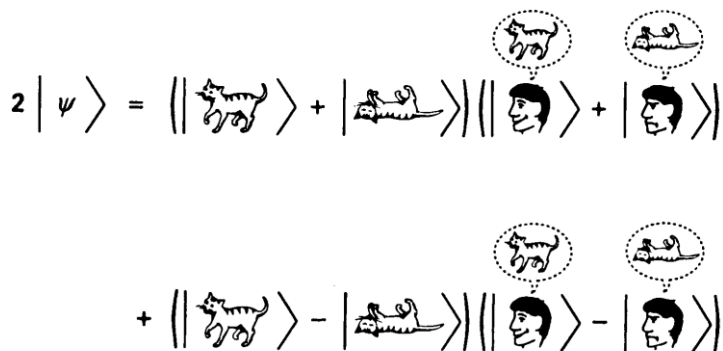


(воздух и т. п.), что вы можете представлять в виде некоторой суперпозиции (рис. 2.9, б).

Каким образом все это можно согласовать в рамках концепции *множественности миров*? Почему, собственно, рассматривая кота, мы не видим его в виде суперпозиции этих самых состояний? Физики, придерживающиеся теории множественности миров, предлагают для этой ситуации картинку, показанную на рис. 2.9, в, на которой существуют состояния и с живым, и с мертвым котом (в каждом случае со своим наблюдателем). На рис. 2.9, в я и показал такую суперпозицию, поместив в скобки Дирака кота (в двух весьма разных состояниях) и наблюдателя (я попробовал придать его лицу выражение, подобающее квантовому состоянию кота). В рамках концепции множественности миров все сходится, и мы имеем просто копии наблюдателя, однако при этом следует помнить, что обитатели этих картинок

81

Рис. 2.10.



живут в «разных мирах», т. е. если вы являетесь одной из этих копий, то другая копия (из параллельного мира) наблюдает за тем, как вы реализуете имеющиеся возможности. Разумеется, вы посчитаете такой метод описания Вселенной не очень удобным и экономичным, однако я думаю, что дела обстоят значительно хуже и трудности вовсе не ограничиваются сложностью или

неудобством описания.

Основная проблема состоит в том, что все сказанное фактически оказывается недостаточным для решения поставленной проблемы. Например, остается непонятным, почему наше сознание не воспринимает такие макроскопические суперпозиции. Давайте рассмотрим особый случай, когда величины w и z равны друг другу, т. е. когда состояние системы можно записать в виде некоторого простого алгебраического соотношения, изображенного на рис. 2.10, где показаны живой кот *плюс* мертвый кот (вместе с наблюдателем, который воспринимает живого кота), *плюс* наблюдатель, воспринимающий мертвого кота, *плюс* живой кот, *минус* мертвый кот вместе с наблюдателем, воспринимающим живого кота, *минус* наблюдатель, воспринимающий мертвого кота. Вы заявите, конечно, что все эти операции бессмысленны, поскольку они совершенно не похожи на наше восприятие действительности. А почему, собственно, такое описание является неверным? Ведь мы не знаем, что означает слово «восприятие», и не можем отрицать, что оно может подразумевать одновременное восприятие живого и мертвого кота. До тех пор, пока мы не поймем точно, что означает слово «восприятие», и не разработаем достаточно убедительную теорию, запрещаю-

82

щую такое смешанное восприятие (для этого нам необходимо выйти далеко за пределы теории, описанной ниже в гл. 3), предлагаемый подход не позволит нам понять восприятие столь разных состояний или их суперпозиций. Для теоретического описания необходимо иметь хотя бы какую-то теорию восприятия. Кроме того, существующая теория не может объяснить, почему для произвольных чисел w и z получаемые вероятности должны совпадать с квантовомеханическими вероятностями, определенными через квадраты модулей соответствующих величин. Следует помнить, что в конечном счете все эти вероятности должны представлять собой очень точно измеряемые величины.

Давайте вернемся к проблеме квантовых измерений и, в частности, к вопросу о *квантовой запутанности*. На рис. 2.11 приведена запись ЭПР-эксперимента в версии Боба, относящаяся, как уже отмечалось, к *Z*-тайнам квантовой механики. Проблема сводится к возможностям описания состояния двух частиц со спином $1/2$, которые разлетаются в разные стороны. Полный спин системы равен нулю, поэтому, если мы вдруг узнаем, что спин одной из частиц направлен вверх, то из этого следует, что спин второй частицы направлен вниз. В этом случае квантовое состояние полной системы описывается произведением членов «вверх-здесь» и «вниз-там». Аналогично, состоянию «вниз-здесь» соответствует «вверх-там» (подразумевается, что для проекции спина частицы в состоянии «здесь» мы можем выбрать направления вверх/вниз). Для описания квантового состояния полной системы мы должны внести в рисунок знаки плюс-минус для этих положений (буквы Н и Т на рисунке означают «здесь» и «там», соответственно). В сущности, например, нам следовало бы использовать знак минус для того, чтобы полный спин пары частиц равнялся нулю при любом выборе направления проекции.

Предположим, что мы измеряем спиновое состояние частицы, попавшей в наш детектор «здесь», а вторая частица за это время улетела очень далеко, и точка «там» находится где-то на Луне! Пусть далее мой коллега на Луне включил детектор и измерил проекцию спина в направлении вверх/вниз. Если спин этой частицы направлен вниз, то это означает, что у первой частицы он был направлен вверх, поскольку обычно предполагается, что вектор состояний частицы представляет собой смесь равновероятных состояний (спин-вверх и спин-вниз).

Для описания систем с такими смешанными состояниями в квантовой механике применяется стандартный метод, основан-

83

Рис. 2.12.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ \text{T} \end{array} \right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{T} \end{array} \right\rangle$$

Полный спин

Рис. 2.11.

$$D_H = \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{H} \end{array} \right| + \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \downarrow \\ \text{H} \end{array} \right|$$

ный на использовании так называемой *матрицы плотности*. В нашем случае матрица плотности, которую должен ввести первый наблюдатель (его можно условно назвать «я/здесь»), имеет вид, показанный на рис. 2.12. Множители $1/2$ в правой части относятся к вероятности обнаружить, что спин «здесь» направлен соответственно вверх и вниз. При этом речь идет о совершенно обычных, классических вероятностях, отражающих степень нашего незнания относительно реального состояния изучаемой частицы. Эти вероятности представляют собой, как обычно, просто действительные числа (лежащие в интервале между 0 и 1), так что комбинация на рис. 2.12 представляет собой стандартную сумму вероятностей с заданным весом, а не сложную квантовую суперпозицию с комплексными коэффициентами. Отметим еще, что величины типа $|\rangle$ и $\langle|$ (с угловыми скобками, направленными вправо и влево), которые умножаются на соответствующие вероятности (равные $1/2$), были введены Дираком и названы им *кет*-вектором и *бра*-вектором, соответственно. В общем случае бра-вектор представляет собой комплексно сопряженный кет-вектор.

Я не буду рассказывать даже в самых общих чертах о серьезнейшем математическом аппарате теории матриц плотности. Для нашего рассмотрения достаточно знать, что матрица плотности содержит всю информацию, необходимую для расчета вероятностей результатов измерений, производимых над одной частью квантовой системы, в тех случаях, когда информация о другой части квантового состояния недоступна. Например, в нашем случае полное квантовое состояние относится к *паре* час-

84

Рис. 2.13.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{T} \end{array} \right\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{T} \end{array} \right\rangle$$

a = как и выше

$$D_H = \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \rightarrow \\ \text{H} \end{array} \right| + \frac{1}{2} \left| \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{H} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \leftarrow \\ \text{H} \end{array} \right|$$

b = как и выше

тиц (запутанное состояние), причем предполагается, что при измерении «здесь» мы не можем ничего знать о результатах измерения «там» (на Луне) состояния частицы-партнера.

Я позволю себе немного изменить рассматриваемую ситуацию и предположу дополнительно, что мой коллега на Луне при измерении спина выбрал направление влево/вправо, а не вверх/вниз, как раньше. В этом случае запись состояний примет вид, показанный на рис. 2.13. В сущности, эта запись совпадает с записью рис. 2.11 (та же алгебраическая схема, основанная на геометрии рис. 2.4), однако в ней использованы другие обозначения состояний. В момент измерения мы еще не знаем результатов, полученных коллегой на Луне, однако ясно, что он с одинаковой вероятностью может получить для спина левое направление (в этом случае я должен получить правое направление) или правое (в этом случае я получаю левое). Матрица плотности D_H , приведенная на рис. 2.13, при этом будет полностью совпадать с введенной ранее матрицей рис. 2.12. Предлагаемые рассуждения пока кажутся безупречными, поскольку представляется очевидным, что измерения, проводимые коллегой на Луне, не должны изменять вероятностей, получаемых при измерениях на Земле (в противном случае коллега мог бы передавать мне сообщения со скоростью больше скорости света; для этого он мог бы кодировать свои сообщения просто выбором направления регистрации).

Алгебраически легко проверить, что матрицы плотности действительно одинаковы. Не беда, если вы не знаете, о каких алгебраических приемах я говорю. Вам следует лишь помнить, что матрица плотности — наиболее совершенный аппарат для описания состояния, о части которого вы ничего не знаете. Используемые в этой матрице вероятности имеют обычный смысл, но применяются для квантовомеханического описания, при ко-

85

Рис. 2.15.

$$|\psi\rangle = w \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right\rangle + z \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right\rangle$$

Рис. 2.14.

$$D = |w|^2 \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right| + |z|^2 \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right|$$

тором в неявной форме учитываются квантовые вероятности. Короче говоря, если вы ничего не знаете о происходящем «там», матрица плотности даст наилучшее описание состояния «здесь».

Однако из сказанного очень трудно заключить, что матрица плотности описывает *реальность*. Дело в том, что я позднее могу (или не могу) получить с Луны послание, где будет сказано о том, что мой коллега осуществил измерения состояния второй частицы и получил такие-то и такие-то результаты. Лишь после этого я буду знать о *реальном* состоянии моей частицы. Матрица плотности не содержит *всей информации* о моей частице, и я должен определять актуальное состояние связанной пары частиц. Следовательно, матрицу плотности следует рассматривать лишь в качестве средства вспомогательного, временного описания, вследствие чего ее и обозначают иногда сокращением FAPP («для всех практических целей»).

Матрицы плотности гораздо чаще применяются для описания ситуаций типа изображенной на рис. 2.14. Их намного сложнее применять для запутанных состояний, при которых что-то доступно нам и «здесь» (например, живой или мертвый кот), а что-то — коллегам «там» (на Луне или за соседним столом, это не принципиально), и лишь сочетание «здесь» и «там» может дать полное описание среды, связанной с многострадальным котом. Именно поэтому я вынужден при построении полного вектора состояний учитывать живого кота (с некоторым окружением) *плюс* мертвого кота (с другим окружением). Сторонники FAPP-подхода утверждают, что вы никогда не можете иметь полную информацию об окружении и поэтому всегда вынуждены пользоваться не вектором состояний, а матрицей плотности (рис. 2.15). Матрица плотности ведет себя подобно смеси вероятностей различных состояний, вследствие чего сторонники FAPP-под-

86

Рис. 2.16.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} \left(\left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right\rangle \right) + \frac{1}{2} \left(\left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right\rangle - \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right\rangle \right)$$

а

$$D = \frac{1}{4} \left(\left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \right| \right) + \frac{1}{4} \left(\left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{живой кот} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \end{array} \right\rangle \left\langle \begin{array}{c} \text{живой кот} \\ \text{мертвый кот} \right| \right)$$

б

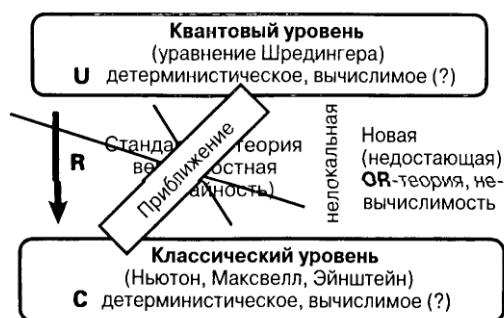
хода могут утверждать, что «для всех практических целей» кот либо мертв, либо жив. Это звучит совсем неплохо именно «для всех практических целей», но не дает нам картины реальности, т. е. не сообщает ничего о том, что могло бы произойти, если бы кто-то (предположим, что такие мудрые люди существуют!) подошел к вам раньше и посоветовал, как извлечь (или, точнее, выделить) информацию из окружения. В каком-то смысле описываемый подход действительно является временным — он полезен до тех пор, пока никто не умеет

выделять и получать такую информацию. Однако вы можете применить к ситуации с котом рассуждения, приведенные выше для частицы в ЭПР-эксперименте. Мы уже говорили, что использование проекций спина в направлениях вверх/вниз и влево/вправо является совершенно эквивалентным. В принципе мы можем найти эти «левые» и «правые» состояния, комбинируя состояния «вверх» и «вниз» в соответствии с законами квантовой механики, что должно привести нас к тому же «запутанному» состоянию (показанному на рис. 2.13, *a*) и к той же самой матрице плотности (рис. 2.13, *b*).

Ситуация с котом и его окружением (я по-прежнему буду рассматривать только случай равных амплитуд w и z) математически описывается точно так же, как эксперимент со спином (выражение «живой кот плюс мертвый кот» играет роль «правого» спина, «живой кот минус мертвый кот» — роль «левого» спина), и мы получаем то же состояние (рис. 2.14 с $w = z$) и ту же матрицу плотности (рис. 2.15 с $w = z$). Естественно возникает

87

Рис. 2.17.

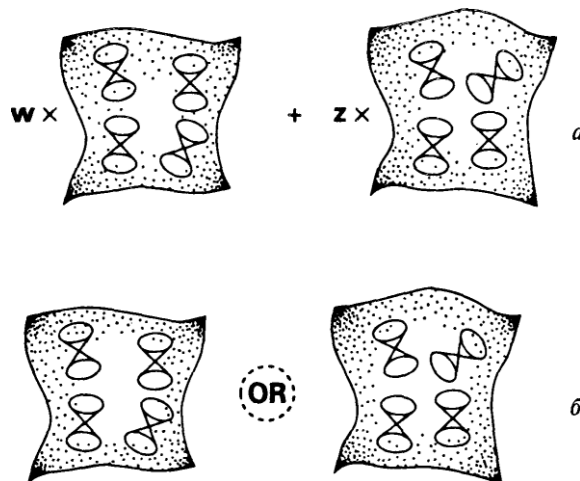


вопрос, являются ли комбинации слов «живой кот плюс мертвый кот» и «живой кот минус мертвый кот» столь же точными и удобными, как привычные термины «живой кот» и «мертвый кот». Это вовсе не представляется очевидным, однако используемая математика достаточно ясна — матрица плотности для кота не изменяется (рис. 2.16), так что даже знание о характере матрицы не помогает нам выяснить вопрос о его состоянии. Другими словами, матрица плотности не содержит данных о жизни и смерти кота, и мы должны найти их где-то еще.

Из всего сказанного остается неясным не только поставленный вопрос о состоянии кота (является ли он живым, мертвым или пребывает в некоторой комбинации этих состояний), но даже и то, каким образом мы можем воспринимать кота живым или мертвым. Более того, в более общем случае неравных друг другу амплитуд w и z остается совершенно неясным, почему вероятности должны составлять именно $|w|^2$ и $|z|^2$. Мне такое описание очень не нравится, и поэтому я вновь обращусь к общей диаграмме состояния физики (рис. 2.1) и попробую улучшить ее, добавив необходимые, на мой взгляд, элементы будущего развития (рис. 2.17). Операция, обозначенная мною ранее буквой R, фактически представляет собой лишь приближенную форму более важной и необходимой операции, которую следовало бы обозначить аббревиатурой OR (я подразумеваю Objective Reduction — восстановление объективной картины). Речь идет действительно о восстановлении объективности, ведь, в конце концов, объективно может происходить одно или другое событие. Именно эта часть теории представляется мне недостающей или отсутствующей, а сокращение OR представляется мне весьма удачным, поскольку оно не только записывается и

88

Рис. 2.18.



звучит, как английское слово «или», но и действительно соответствует ситуации, где происходит одно **ИЛИ** другое.

Но почему возникают все эти проблемы? Моя личная точка зрения сводится к тому, что трудности связаны с какой-то ошибкой в использовании принципа суперпозиции для сильно различающихся *пространственно-временных геометрий*, с представлением о которых мы уже сталкивались в гл. 1. На рис. 2.18, *a* показаны две такие геометрии, причем я специально представил их в виде некоторой суперпозиции, характерной для обсуждения частиц и фотонов. Рассматривая суперпозиции пространственно-временных состояний, мы сразу столкнемся с массой проблем, поскольку их временные конусы могут иметь разную направленность. В сущности, мы здесь имеем дело с одной из важнейших задач квантования в общей теории относительности. Я лично убежден, что все трудности построения физических теорий связаны именно со странностями суперпозиций пространственно-временных состояний.

На мой взгляд, сложностей можно избежать лишь при полном отказе от создания таких суперпозиций. Так или иначе, но любая такая суперпозиция должна воплотиться в одно из возможных **ИЛИ**, что означает наличие некоторого события на уровне пространства-времени (рис. 2.18, *б*). Разумеется, вы можете возразить мне примерно следующим образом: «Все сказанное в принципе выглядит убедительным, но ведь при любой по-
89

Рис. 2.19. Как связана планковская длина (10^{-33} см) с задачей редукции квантовых состояний?

Очень упрощенно идея состоит в следующем: связь проявляется в том случае, когда перемещение масс между двумя состояниями, участвующими в суперпозиции, становится настолько значительным, что соответствующие пространства-времена различаются на величину порядка 10^{-33} см.



пытке объединения квантовой механики с общей теорией относительности мы должны столкнуться с этими смешными, нелепыми величинами (планковское время и планковская длина), на много порядков меньшими любых промежутков времени и пространства, с которыми приходится сталкиваться в физике (даже в физике элементарных частиц). Это совершенно не те масштабы, в которых можно описывать нечто реальное, типа людей или котов. Причем тут квантовая гравитация?» Но я убежден, что именно на этом уровне определяются

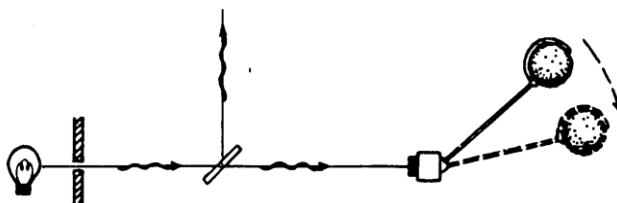
фундаментальные законы всех происходящих в природе процессов.

Что связывает длину Планка (10^{-33} см) с процессом редукции (коллапса) квантового состояния? На рис. 2.19 приведена очень простая схема бифуркации пространства-времени, соответствующая суперпозиции двух пространственно-временных состояний, в одном из которых кот Шредингера является живым, а в другом — мертвым. При этом почему-то кажется, что эти два пространственно-временных состояния могут образовывать суперпозицию. Мы должны спросить сами себя: «Что необходимо изменить в правилах игры, если мы видим, что эти состояния стремятся стать совершенно различными?» Взгляните на рисунок еще раз и отметьте, что в некотором (кстати, вполне разум-

90

Рис. 2.20.

Вместо рассмотрения судьбы кота можно провести измерения параметров движения достаточно массивного шара и ответить на несколько простых вопросов. Какова должна быть масса шара? Какова величина смещения? Сколь долго может существовать суперпозиция до наступления момента R ?



ном) смысле разница этих геометрий имеет порядок планковской длины! Когда геометрии состояний начинают различаться на эту величину, нам следует задуматься самим об изменении правил и законов. Я хочу подчеркнуть, что мы имеем дело с пространствами-временами, а не только с пространствами. При «разделении пространства-времени в планковских масштабах» очень малые пространственные различия соответствуют большим временам, и наоборот, чрезвычайно большие пространственные изменения — малым временам. Основная проблема при этом состоит в том, чтобы оценить и уловить тот момент, когда разница между двумя пространствами-временами становится настолько значительной, что Природа сама отбирает какое-то одно *пространство-время*. Я хочу сказать, что Природа выбирает одно из возможных состояний в соответствии с некоторым, пока неизвестным нам законом.

За какое время Природа осуществляет этот выбор? Мы можем рассмотреть некоторые совершенно определенные ситуации, для которых удовлетворяется ньютоновское приближение в теории Эйнштейна и одновременно четко определено различие двух гравитационных полей, связанных с членами квантовой суперпозиции (т. е. двух комплексных амплитуд, примерно равных по величине). Я могу предложить вам, например, следующий эксперимент. Давайте пожалеем уставшего кота и рассмотрим движение массивного шара в эксперименте, показанном на рис. 2.20. Насколько велика должна быть масса шара, сколь далеко он может отклониться и каково будет пространство-время после редукции вектора состояний? Я буду рассматривать суперпозицию двух состояний как некоторое неустойчивое

91

состояние, немного напоминающее нестабильную частицу типа ядра урана или чего-либо похожего, способного распасться или превратиться в нечто другое, причем это превращение связано с каким-то определенным временным масштабом. Предположение о неустойчивости подразумевает какие-то неизвестные нам физические законы. Для оценки временного масштаба рассмотрим энергию E , необходимую для мгновенного перемещения шара из одного гравитационного поля в другое. Характерный масштаб времени T такого перехода можно найти из отношения величины \hbar (постояная Планка, деленная на 2π) к гравитационной энергии:

$$T = \frac{\hbar}{E}.$$

Существует много подходов, приводящих к такой оценке, которые различаются лишь деталями, но сохраняют нечто общее, характерное для всех гравитационных теорий.

Можно привести много доводов в пользу предлагаемой гравитационной модели. Прежде всего отметим, что все другие схемы, которые в явной форме описывают редукцию (коллапс) квантовых состояний за счет введения новых физических явлений, сталкиваются с проблемой сохранения энергии. Кажется, что закон сохранения энергии при квантовой редукции нарушается (возможно,

так оно и происходит на самом деле), однако я думаю, что предлагаемая гравитационная модель дает нам прекрасный шанс полностью освободиться от этой сложной проблемы. Я не могу пока объяснить все это в деталях, позвольте изложить некоторые соображения по этому поводу.

В общей теории относительности масса и энергия представляют собой довольно необычные величины. Прежде всего масса эквивалентна энергии (деленной на квадрат скорости света) и, следовательно, энергия гравитационного потенциала вносит в массу свой вклад (причем отрицательный!). Соответственно, если два массивных объекта достаточно удалены друг от друга, то система в целом оказывается несколько массивнее, чем та же система с более близко расположенными объектами (рис. 2.21). Хотя плотность энергии-массы (измеряемой в единицах тензора энергии-импульса) равна нулю лишь внутри объема массивных объектов, а энергия каждого из них очень слабо зависит от другого, тем не менее некоторая разница в *полной* энергии двух систем, показанных на рис. 2.21, должна существовать. Полная энергия является нелокальной характеристикой, т. е. в общей

92

Рис. 2.21. Полная масса-энергия гравитирующей системы с учетом различной локализации масс.



теории относительности есть что-то принципиально нелокальное, связанное с энергией. Именно этим объясняется знаменитый эффект поведения двойных пульсаров, о котором я упоминал в гл. 1 (гравитационные волны уносят из системы положительную энергию и массу, однако энергия сохраняется нелокально за счет внешнего пространства). Вообще говоря, гравитационные волны представляют собой какой-то странный объект, ускользающий от наблюдателя. Мне кажется, что мы могли бы легко избавиться от всех ужасных проблем, связанных с поведением энергии при редукции вектора состояний, если бы нашли какой-то разумный метод объединения квантовой механики с общей теорией относительности. Проблема заключается в том, что при суперпозиции мы должны учитывать и гравитационный вклад состояний, однако никто не представляет, какой смысл имеет локальный вклад гравитации в энергию системы, вследствие чего и возникает существенная неопределенность в величине гравитационной энергии (эта неопределенность по порядку величины совпадает с предложенным выше значением E). Именно с такой ситуацией мы сталкиваемся при рассмотрении процессов распада частиц. Неопределенность в энергии-массе нестабильных частиц обычно оказывается связанной с их временем жизни.

Вопрос о явных или очевидных временных масштабах очень важен для рассматриваемых нами проблем, и я еще вернусь к нему в гл. 3. Каковы времена распада для реальных систем и какие пространственно-временные суперпозиции этому соответствуют? Считается, например, что время жизни протона (который условно можно считать просто твердым шариком) составляет несколько миллионов лет (оценка представляется весьма разумной, поскольку экспериментально распад одиночных про-

93

тонов никогда не наблюдался). Для капельки воды время распада может составлять несколько часов (при радиусе $\sim 10^{-5}$ см), $1/20$ секунды (при радиусе $\sim 10^{-4}$ см) или одну миллионную долю секунды (при радиусе $\sim 10^{-3}$ см). Эти цифры наглядно показывают связь между масштабами и характером физических явлений.

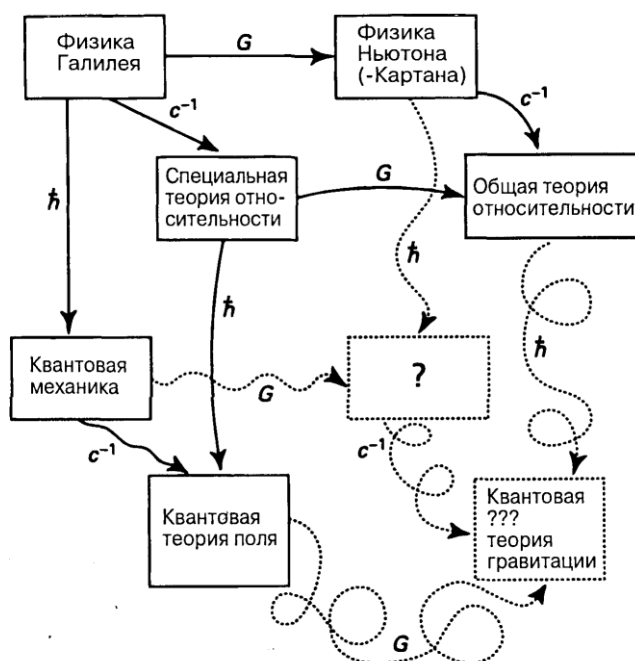
Существует еще одно довольно важное обстоятельство, которое следует упомянуть. Ранее я немного подшучивал над сторонниками подхода FAPP (квантовая механика для всех практических целей), однако в этом подходе содержится и очень важный аспект, а именно: учет окружения, о котором я пока почти ничего не говорил. В реальных ситуациях учет окружения существенно важен для рассматриваемых нами задач. В сущности, мы не имеем права говорить просто «шар здесь» или «шар там», а должны каждый раз говорить о суперпозиции типа «этот шар

плюс окружение» или «другой шар плюс его окружение» и т. д. Кроме того, необходимо очень внимательно проверять, связаны ли основные наблюдаемые эффекты с движением именно шаров и других тел или с их окружением. Если какая-то проблема связана с окружением, то наблюдаемый эффект будет случайным, а его описание будет иметь привычный вид. Однако если система достаточно изолирована и ролью окружения можно пренебречь, то в поведении системы, возможно, проявится нечто выходящее за рамки обычной квантовой механики. Было бы очень интересно предложить какие-либо разумные эксперименты этого типа (у меня имеются некоторые идеи на этот счет), которые доказали бы справедливость предлагаемой схемы или, наоборот, продемонстрировали, что привычные квантовые эффекты в этих условиях сохраняются, и мы действительно должны всерьез рассматривать существование суперпозиции состояний таких шаров (или, если угодно, котов).

На рис. 2.22 я попытался обобщить все приведенные выше рассуждения и свести их в некоторую схему. Для этого я расположил различные фундаментальные физические теории в вершинах некоторого абстрактного куба с несколько деформированными гранями (чуть ниже я поясню, что заставило меня использовать такой непривычный художественный прием). Три измерения этого куба соответствуют трем основным физическим константам: гравитационной постоянной G (горизонтальная ось), обратной скорости света c^{-1} (поперечная ось) и постоянной Дирака—Планка \hbar (вертикальная ось, направленная вниз). В привычных нам единицах все упомянутые константы очень малы и их можно приравнять нулю при любых разумных

94

Рис. 2.22.



приближениях. При равенстве нулю всех трех констант мы имеем картину мира, которую я называю физикой Галилея (верхний левый угол рисунка). Введение отличной от нуля гравитационной постоянной приводит нас вдоль горизонтальной оси к ньютоновской теории гравитации (геометрическое определение пространства-времени для этой теории было дано позднее Картаном). И наконец, использование неравной нулю величины c^{-1} приводит нас к специальной теории относительности в формулировке Пуанкаре—Эйнштейна—Минковского. Верхнюю «грань» нашего деформированного куба можно «достроить», считая отличными от нуля оба указанных выше коэффициента, что приводит нас к общей теории относительности Эйнштейна. Однако такое обобщение никак нельзя признать «честным», и поэтому я на рисунке изобразил соответствующую вершину куба несколько деформированной. Считая величину \hbar отличной от нуля (но полагая при этом $G = c^{-1} = 0$), мы получаем обычную квантовую механику. Используя уже менее ясные варианты обобщения и вводя отличную от нуля величину c^{-1} , мы можем

95

получить квантовую теорию поля и замкнуть левую грань куба (она тоже немного искажена,

чтобы подчеркнуть недостаток «прямоты» и ясности используемой методики).

Мы не можем завершить построение указанного куба и получить общую картину связи различных теорий, так как принципы теории гравитации и квантовой механики существенно противоречат друг другу. Это противоречие проявляется даже в случае ньютоновской теории гравитации (где подразумевается, что $c^{-1} = 0$), если мы попытаемся получить соответствующую (картановскую) геометрию, в которой мог бы выполняться *эйнштейновский принцип эквивалентности* (напомню, что в соответствии с этим принципом постоянные гравитационные поля нельзя получить в ускоренных системах). На это обстоятельство указал мне Джой Кристиан, который также увлеклся построениями типа рис. 2.22. Однако пока у нас нет никакой возможности объединения квантовой механики и ньютоновской гравитации (объединения, в котором эйнштейновский принцип эквивалентности будет учитываться совершенно строго, как в классической геометрической теории Картана), вследствие чего, по моему глубокому убеждению, мы должны искать пути такого объединения, пользуясь эффектом редукции квантовых состояний, что соответствует в основных чертах идеям теории OR, о которой я говорил в начале главы. Картина такого объединения пока еще очень туманна, и поэтому передняя грань куба (в отличие от задней!) пока выглядит совершенно бесформенной. Полная теория, в которой все три основные константы (\hbar , G и c^{-1}) не равны нулю и которая позволит нам правильно замкнуть грани предлагаемого «куба», должна включать в себя изящные и сложные математические схемы, которые нам еще предстоит разработать.

Глава 3. Физика и разум



Первые две главы были посвящены окружающему нас физическому миру и математическим приемам (иногда поразительно точным, иногда весьма странным), используемым для его описания. В гл. 3 мне хочется рассказать о *мысленном мире*, мире идей и его связях с физическим миром. Мне кажется, что епископ Беркли должен был бы считать, что физический мир в каком-то смысле возникает из мысленного, в то время как стандартная научная точка зрения сводится к тому, что мышление является всего лишь одной из особенностей некоторых физических структур.

Карл Поппер когда-то ввел в науку представление о так называемом «третьем мире», *мире культуры* (рис. 3.1). Рассматривая его в качестве продукта мышления, Поппер также предложил некоторую иерархию миров, в которой мысленный мир связан с физическим (возникает в нем?) и культура соответственно каким-то образом возникает из мысленного мира (рис. 3.2).

Мне хочется взглянуть на эти проблемы с несколько иной точки зрения. Вместо того чтобы считать (вслед за Поппером) культуру порождением мышления, я предпочитаю рассматривать и связывать миры по схеме рис. 3.3, в которой «третий мир» относится не к культуре, а к миру абсолютов, или платоновских идей, т. е. к представлениям некоторых абсолютных математических истин. Такому подходу соответствует приведенный ранее рис. 1.3, отражающий глубокую связь законов физического мира с точными математическими законами.

В этой главе речь пойдет в основном об отношениях между указанными мирами. Мне кажется весьма спорной сама идея возникновения мышления из каких-либо физических структур или сущностей (кстати, философы всегда относились к этой

97

Рис. 3.1. «Третий мир», предложенный Карлом Поппером.

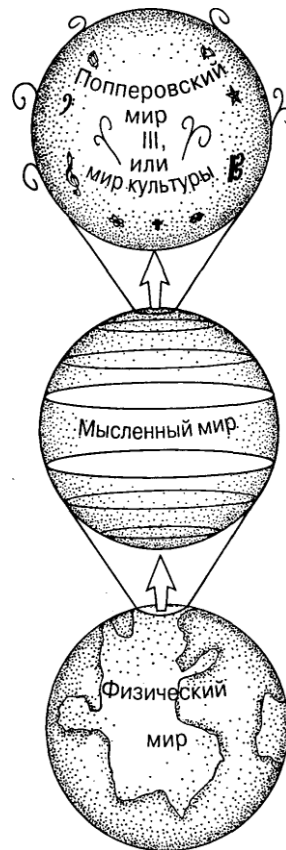


идее с недоверием). В физике мы говорим о веществах, предметах, частицах, пространстве, времени, энергии и т. п. Для меня всегда оставалось загадкой, каким образом физика, изучающая эти объекты, может быть связана с обычными человеческими чувствами, например с восприятием красного цвета или ощущением счастья. В сущности, таинственными и непонятными представляются все отношения между тремя мирами, показанные пронумерованными стрелками на рис. 3.3. В первых двух главах я уже говорил о связи математики и физики (Тайна 1), которую когда-то знаменитый Е. Вигнер (см. список литературы) назвал непостижимой, необычной и даже странной (я целиком разделяю эту точку зрения). Действительно, давайте попробуем задуматься о том, почему физический мир столь четко следует некоторым математическим законам? Более того, при этом математика (которая, по предположению, управляет поведением физического мира) является сама по себе исключительно полезной и важной наукой, если рассматривать ее просто в качестве *отдельной* науки. Эти сложные отношения представляются мне таинственными и глубокими.

В этой главе я буду говорить о Тайне 2, связанной с отношениями физического и мысленного миров, однако в этой связи нам придется задуматься и о Тайне 3: на чем, собственно говоря, основана наша способность воспринимать математические истины? Когда я упоминал о мире платоновских идей в первых

98

Рис. 3.2.

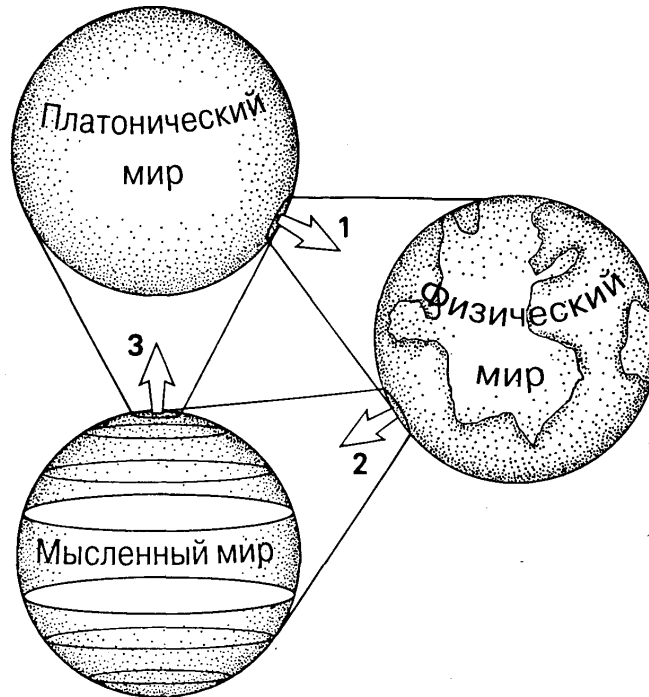


двух главах, я говорил в основном о математике и математических понятиях, которые требуются для описания физического мира. Мы чувствуем, что математика необходима для этого описания, однако, с другой стороны, существует распространенное мнение, что сами математические структуры являются всего лишь порождением нашего сознания, т. е. математика представляет собой некий продукт человеческой мысли. Должен сразу отметить, что сами математики (и я лично тоже) относятся к математическим истинам совсем по-другому. Поэтому наличие на рисунке стрелки, связывающей мысленный мир с платоновским (как, впрочем, и других стрелок), не подразумевает, что какие-то из миров просто порождаются другими. В каком-

то

99

Рис. 3.3. Три мира и три тайны.



смысле мы можем говорить о таком порождении, однако стрелки на рис. 3.3 означают лишь то, что между этими мирами существуют некоторые связи.

Гораздо важнее, что на рис. 3.3 представлены три моих собственных предрассудка или предубеждения. Первый из них заключается в том, что весь физический мир в принципе может быть описан математически. Я не утверждаю, что любая математика описывает какие-то физические процессы, а всего лишь думаю, что правильно выбранные разделы математики позволяют очень точно описывать физические явления, т. е. физический мир ведет себя в соответствии с законами математики. Таким образом, некоторая малая часть платоновского мира идей заключает в себе законы физического мира. Точно так же я не утверждаю, что все в физическом мире обладает какой-то ментальностью, а скорее предполагаю, что все существующие мыслительные объекты основаны на каких-то физических сущностях. Это утверждение можно назвать моим вторым предубеждением. И наконец, третье предубеждение состоит в том, что наше восприятие математики (по крайней мере, в принципе) связано

100

Рис. 3.4.



с тем, что наше сознание в определенном смысле способно воспринимать какие-то отдельные объекты в мире платоновских идей. Я сознаю, что у некоторых людей последнее утверждение может вызвать недоумение или раздражение, однако все три высказанных предположения требуют обсуждения и размышления. Кстати, только нарисовав эту диаграмму, я осознал, что она отражает мои собственные предубеждения. Я еще вернусь к этим вопросам в конце главы.

Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

Позвольте мне начать с некоторых общих соображений о *человеческом сознании*. Прежде всего мы должны решить, следует ли нам искать для этого явления какие-то научные объяснения? Я не только убежден, что это необходимо, но и весьма серьезно отношусь к стрелке, связывающей физический и мысленный миры. Иными словами, мы обязаны понять мысленный мир на основе физического.

На рис. 3.4 я попытался выделить и обобщить некоторые характеристики этих двух миров. С правой стороны отмечено, что *физический мир* воспринимается нами как нечто подчиняющееся точным математическим и физическим законам (я об этом довольно много говорил в первых двух главах книги). Слева мы имеем сознание, принадлежащее *мысленному миру*, и связанные с ним понятия типа «душа», «настроение», «религиозность» и т. п.,

101

часто употребляемые бессистемно. В наши дни люди предпочитают давать всему научные объяснения и, более того, полагают, что любое научное описание можно в принципе каким-то образом внести в компьютер (т. е. считают, что если математическое описание чего-то существует, то оно может быть записано в память ЭВМ). Опровержению именно этого утверждения и посвящена в основном данная глава (при этом я по-прежнему остаюсь сторонником так называемого физикализма).

В качестве характеристик физических законов я выписал в правой части рис. 3.4 некоторые термины (предсказуемость и вычислимость), возможность использования которых напрямую зависит от того, описывается ли окружающий нас мир *детерминистическими* физическими законами и можем ли мы пользоваться компьютерами для моделирования действия этих законов. Существует точка зрения, что для объектов мысленного мира (например, для перечисленных слева понятий *эмоции, чувство прекрасного, творчество, вдохновение, искусство*) почти невозможно получить описания, пригодные для расчета. С другой стороны, существует и некоторый «научный экстремизм», сторонники которого придерживаются примерно следующей точки зрения: «Все мы всего лишь компьютеры; просто мы еще не знаем, как правильно описывать некоторые вещи, однако если бы нам были известны необходимые правила вычисления, то мы смогли бы описать и все мысленные явления, перечисленные в левой части рис. 3.4». Для описания мысленных процессов часто используются термины *появление* или *возникновение* (эмерджентность), но сторонники вычислительного подхода полагают, что свойство *возникать* тоже может быть получено в результате правильно используемых вычислительных операций.

Так чем же является *сознание*? Разумеется, я не знаю, как определить сознание, и даже не считаю, что стоит пытаться найти такое определение (поскольку мы не понимаем, что оно означает). Я уверен, что можно найти физически обоснованную концепцию, однако думаю, что любое определение окажется неверным. Поэтому вместо определения я попытаюсь дать вам описание сознания, насколько это возможно. При этом мне кажется, что существуют, по крайней мере, два аспекта сознания. С одной стороны, имеется *пассивное* проявление сознания, включающее *осознание* или *восприятие (awareness)*. Я включаю в эту категорию нашу способность воспринимать цвет и гармонию соотношений, способность запоминать и т. п. С другой стороны, существуют и *активные* проявления сознания, включаю-

102

щие в себя понятия типа свободы воли, целенаправленности действий и т. п. Использование столь различных терминов отражает многообразие и сложность понятий, связанных с сознанием. Однако я хочу обратить ваше внимание на еще один весьма специфический аспект сознания, отличный от упомянутых выше активных и пассивных проявлений (но, возможно, являющийся чем-то промежуточным, лежащим между активной и пассивной деятельностью). Я говорю о *понимании (understanding)*, для которого в английском языке есть еще понятие *insight*, которое кажется более глубоким и содержательным, поскольку включает в себя представление о проницательности, интуитивном постижении истины, озарении, мгновенном восприятии и т. д. В некоторых ситуациях используются еще и термины *осознание* и *интеллектуальность (awareness, intelligence)*, которые мне не очень понятны. Разумеется, вы вправе спросить, зачем я говорю о понятиях, реальный смысл которых мне неизвестен? Дело в том, что я — математик, а математики обычно не принимают в расчет такие возражения. Им вовсе не требуются точные определения объектов, с которыми они оперируют, а достаточно знать лишь что-то относительно *взаимосвязи* этих объектов. Мне представляется довольно важным тот факт, что интеллектуальность является чем-то, требующим объяснения и понимания. Мне кажется неразумным использование этого термина в контексте, где нет представления о «понимании». Впрочем, термин «понимание» также

выглядит малоосмысленным вне какого-либо «восприятия», так как понимание можно отнести к какому-то типу восприятия. Все сказанное просто означает, что интеллектуальность требует осознания. И хотя я не могу определить эти термины, я могу утверждать наличие некоторых отношений или связей между ними.

Существуют различные точки зрения на отношения между процессами сознательного мышления и способностью к вычислениям. Четыре основных подхода к этой проблеме (которые я обозначил через *A*, *B*, *C* и *D*) перечислены в табл. 3.1.

В первом подходе (*A*), который иногда называют *сильным принципом искусственного интеллекта* или (вычислительным) *функционализмом*, принято считать, что всякое мышление сводится просто к некоторым вычислительным операциям и, следовательно, правильно выполняя такие вычисления, мы получим в качестве результата способность к осознанию и восприятию.

В соответствии со второй точкой зрения (*B*) можно (по крайней мере, в принципе) моделировать ту часть работы мозга, ко-

103

Таблица 3.1

A	Всякое мышление есть просто некоторый вычислительный процесс; в частности, чувство осознанного восприятия также возникает в результате осуществления соответствующих вычислительных операций
B	Сознание является лишь одной из характерных особенностей физической деятельности мозга. Как и любая другая физическая деятельность, сознание может моделироваться вычислительными операциями, но такое моделирование не является, строго говоря, самим сознанием
C	Сознание вызывается определенными физическими действиями мозга, однако эти действия принципиально нельзя вычислительно моделировать правильным образом
D	Сознание не может быть объяснено с использованием каких-либо физических, вычислительных или других научных методов или понятий

торая относится к восприятию. Разница между подходами *A* и *B* заключается в том, что во втором случае речь идет лишь о частичном простом моделировании некоторых процессов в мозгу, а не о реальных чувствах и реальном восприятии (эти понятия в подходе *B* могут быть соотнесены с физическим строением мыслящего объекта). Таким образом, как бы принимается, что мозг создан из нейронов и сам может осознавать процесс восприятия, а моделирование этого процесса исключает именно процесс осознания мозгом своей деятельности. Насколько я могу судить, эту точку зрения активно развивал и поддерживал в своих работах Джон Сирл.

Сам я придерживаюсь точки зрения *C*, в соответствии с которой (как и в *B*) восприятие и сознание в какой-то степени связаны с физической активностью мозга (т. е. с какими-то физическими процессами), однако (что очень существенно для подхода *C*!) эти процессы не могут быть смоделированы никакой вычислительной процедурой. Я хочу сказать, что соответствующие физические процессы в мозгу принципиально не поддаются моделированию.

И наконец, всегда существуют сторонники подхода *D*, которые уверены, что ошибкой является сама попытка научного описания этих процессов и, возможно, восприятие и сознание вообще не могут быть объяснены с научной точки зрения.

Выше я уже говорил, что лично являюсь убежденным сторонником подхода *C*, однако должен сразу пояснить, что он

104

имеет много вариантов, из которых следует прежде всего выделить так называемые **слабое** и **сильное С-утверждение**. **Слабое С-утверждение** подразумевает, что рано или поздно проблема будет изучена достаточно подробно, в результате чего в задаче удастся выявить те типы действий, которые сейчас находятся вне, «по ту сторону» вычислений. Говоря об областях «вне моделирования», мне следует несколько уточнить свою мысль, что я попытаюсь сейчас сделать. Согласно **слабому С-утверждению** все «невыхислимые» операции могут быть найдены в пределах известных физических законов. **Сильное С-утверждение** гласит, что препятствием

является существование непознанных физических законов, т. е. наше понимание физики пока просто-напросто не соответствует сложности, требуемой для описания процессов сознания. Я полностью согласен с такой оценкой и в гл. 2 уже уделил много внимания именно неполноте существующей физической картины мира (в этой связи я рекомендую читателю еще раз взглянуть на рис. 2.17). Короче говоря, **сильное С-утверждение** связывает невозможность объяснения природы сознания с недостаточным уровнем науки и позволяет нам надеяться, что эту проблему удастся решить в будущем.

Поскольку я упомянул рис. 2.17, позвольте вернуться к нему и дать некоторые дополнительные пояснения. В частности, я бы хотел обсудить используемый на рисунке термин *вычислимость*. На квантовом уровне рассмотрения все физические процессы выглядят полностью вычислимыми. Похоже, что вычислимость сохраняется и на классическом уровне, хотя здесь у нас, конечно, могут возникнуть технические проблемы, связанные с переходом от дискретных систем к непрерывным. Эти проблемы кажутся мне непринципиальными, и я не буду их рассматривать, хотя сторонникам **слабого С-утверждения** следовало бы внимательно изучить возникающие при таком переходе неопределенности, поскольку в них может обнаружиться то, что невозможно описать и объяснить в рамках вычислительных подходов и понятий.

Для перехода от квантового уровня к классическому обычно используется процедура, обозначенная мною R, которая является полностью вероятностным действием, вследствие чего мы должны каким-то образом объединить вычислимость со случайностью и произвольностью. Я собираюсь дальше продемонстрировать, что весь этот подход недостаточно обоснован, и для объединения указанных уровней рассмотрения нам нужна совершенно другая, новая теория, которая должна быть «невычис-

105

лительной». Именно поэтому позднее я еще вернусь к проблеме определения вычислимости.

Таким образом, моя версия **сильного С-утверждения** выглядит следующим образом: мы должны искать в физике «невычислимость», позволяющую связать квантовый и классический уровни описания. Конечно, такая постановка вопроса представляется чрезвычайно сложной и трудной, ведь я говорю о необходимости построения не просто новой физики, а физики, относящейся к описанию работы мозга.

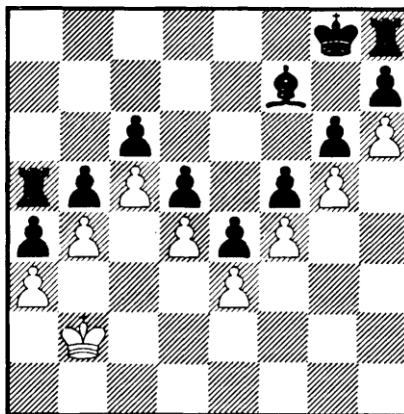
Прежде всего давайте подумаем о том, насколько вообще правдоподобно или вероятно существование чего-то невычислимого в нашем понимании. Позвольте мне привести в качестве примера очень простую и симпатичную шахматную задачу. Вы знаете, что компьютеры уже неплохо играют в шахматы. Однако самый мощный современный шахматный компьютер «ДипСот», решая приведенную на рис. 3.5 задачу, начинает делать очень глупые ходы. Легко видеть, что в этой позиции черные имеют огромное материальное преимущество (две лишние ладьи и слона), которое, однако, не имеет никакого значения для исхода партии, поскольку белые пешки «намертво» блокируют черные фигуры. Пока белый король спокойно «бродит» за барьером из своих пешек, белые просто не могут проиграть. Однако компьютер «ДипСот» первым же ходом за белых взял черную ладью, после чего положение белых стало безнадежным. Причина, конечно, состоит в том, что компьютер запрограммирован на действие (ход за ходом) до некоторой глубины расчета, после чего он вновь начинает считать пешки и т. п. В принципе приведенный пример не очень удачен, так как если бы компьютер мог считать на очень много ходов вперед, он не ошибся бы (в конце концов, шахматы относятся именно к «вычислимым» играм). Однако заметьте, что человек-шахматист практически сразу видит барьер из пешек, понимает его непроницаемость и значение, после чего легко находит стратегию игры. Компьютер не обладает таким общим «пониманием» и начинает просто рассчитывать ход за ходом. Этот пример демонстрирует огромную разницу между простым вычислением и способностью к пониманию.

Разумеется, вы можете обучить ЭВМ использованию пешечного барьера, но проблема имеет более сложный и глубокий характер. В еще одном шахматном примере (рис. 3.6) белым следует поставить слона на b4 и, используя его вместо пешки, вновь создать непреодолимый пешечный барьер (вместо весьма за-

106

Рис. 3.5. Белые начинают и добиваются ничьей.

Человек легко решает эту задачу, но компьютер «ДипСот» первым же ходом бьет ладью черных! (задача Вильяма Харстона из статьи Джейн Сермор и Дэвида Норвуда в журнале *New Scientist*, № 1889, с. 23, 1993).



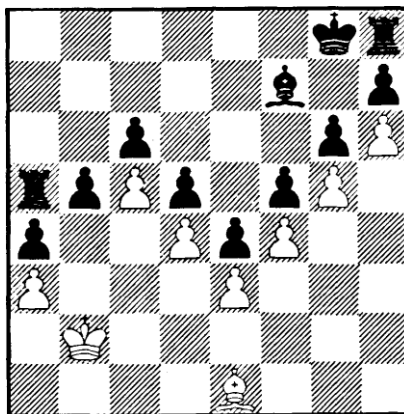
манчивого, но безнадежного взятия черной ладьи на а5). Задача очень похожа на предыдущую, но компьютер (даже если он умеет создавать пешечный барьер) опять начинает ошибаться, поскольку эта задача требует значительно более высокого уровня понимания. Вы можете возразить, что при желании в программу можно ввести все уровни понимания, и вы были бы правы, если бы рассмотрение относилось только к шахматным задачам. Повторю, что шахматы относятся к «вычислимым» играм, поэтому при достаточно мощном компьютере и хорошей программе можно (по крайней мере, в принципе) рассчитать до конца все вероятности. Пока это никому не удалось проделать, однако нас устроит и принципиальная возможность получения такого решения в будущем. Тем не менее я надеюсь, вы почувствовали, что в термине «понимание» содержится нечто, не сводящееся к прямому расчету. Совершенно определенно можно сказать, что человеческий подход к решению даже таких простых шахматных задач существенно отличается от компьютерного.

Можно ли привести еще более сильные доводы в пользу того, что наше понимание содержит в себе нечто большее, чем набор вычислительных операций? Мне не хочется тратить слишком много времени на доказательство этого утверждения, однако это настолько важно для всей моей концепции, что я

107

Рис. 3.6. Белые начинают и добиваются ничьей.

Человек легко решает и эту задачу, а шахматный компьютер вновь ошибается и первым ходом бьет слоном черную ладью (тест Тьюринга, рассматриваемый в цитированной статье Вильяма Харстона и Дэвида Норвуда).



приведу еще в качестве примера несколько чисто математических задач. Читателю, заинтересовавшемуся проблемой связи мышления и вычислительных операций, я рекомендую прочитать мою книгу «Тени разума», где первые 200 страниц посвящены детальному и всестороннему обзору аргументации сторон в многочисленных дискуссиях по этому поводу.

Давайте поговорим о *вычислениях* чуть подробнее. Вычислениями я называю то, что делают вычислительные машины. Реальные компьютеры имеют ограниченную память, но я буду рассматривать работу идеального компьютера (так называемой *машины Тьюринга*), который отличается от обычных компьютеров неограниченным объемом памяти и способностью осуществлять совершенно безошибочные вычисления сколь угодно долго, практически вечно. Рассмотрим конкретную вычислительную задачу, связанную с арифметическими и логическими операциями:

Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

- *Найти число, не представимое суммой трех квадратных чисел.*

Под числом я подразумеваю *натуральное число* (типа 0, 1, 2, 3, 4, 5, ...), а под «квадратным числом» — квадраты натуральных чисел (типа $0^2, 1^2, 2^2, 3^2, 4^2, 5^2, \dots$). Я покажу вам сразу, как решается эта задача. Метод может показаться очень простым и даже примитивным, но он как раз дает неплохое представление о сущности

108

того, что мы подразумеваем под вычислениями. Начнем с нуля и проверим, является ли он суммой трех квадратных чисел, для чего просто рассмотрим квадраты всех тех чисел, которые меньше или равны нулю. Естественно, мы имеем лишь одно такое квадратное число, а именно 0^2 , в результате чего можем записать

$$0 = 0^2 + 0^2 + 0^2,$$

т. е. 0 действительно можно представить в виде суммы трех квадратов. Перейдем затем к единице и выпишем все возможные комбинации чисел, равных или меньше 1, в результате чего получим

$$1 = 0^2 + 0^2 + 1^2.$$

В табл. 3.2 я выписал результаты всех этих скучных и утомительных операций до числа 7, которое (как легко видеть из таблицы, где просто перечислены все комбинации) нельзя записать в виде суммы трех квадратов. Таким образом, число 7 является ответом для нашей задачи — оно представляет собой наименьшее число, которое нельзя представить в виде суммы трех квадратов. Этот пример довольно типичен для вычислительного метода решения простой по формулировке задачи.

Мы можем считать, что нам несколько повезло с задачей, поскольку вычисления привели к ответу довольно быстро, однако ясно, что в других задачах расчет может занимать очень много времени или даже продолжаться до бесконечности. Например, предположим, что я несколько изменил условия и нам необходимо:

- *Найти число, не являющееся суммой четырех квадратных чисел.*

Еще в XVIII веке знаменитый математик Лагранж доказал теорему о том, что каждое число может быть записано в виде суммы квадратов четырех чисел. Поэтому если вы начнете поиск нужного числа по предложенному выше методу, то ваш компьютер будет бестолково «тарыхтеть» целую вечность, но так и не найдет ответа. Это пример задачи, решение которой простым вычислением может продолжаться бесконечно.

Доказательство теоремы Лагранжа довольно сложно, поэтому я приведу гораздо более доступный и легкий пример. Предположим, что мы хотим:

- *Найти нечетное число, представимое в виде суммы двух четных чисел.*

109

Таблица 3.2

Проверка 0	квадраты чисел ≤ 0 равны	0^2	$0 = 0^2 + 0^2 + 0^2$
Проверка 1	квадраты чисел ≤ 1 равны	$0^2, 1^2$	$1 = 0^2 + 0^2 + 1^2$
Проверка 2	квадраты чисел ≤ 2 равны	$0^2, 1^2$	$2 = 0^2 + 1^2 + 1^2$
Проверка 3	квадраты чисел ≤ 3 равны	$0^2, 1^2$	$3 = 1^2 + 1^2 + 1^2$
Проверка 4	квадраты чисел ≤ 4 равны	$0^2, 1^2, 2^2$	$4 = 0^2 + 0^2 + 2^2$
Проверка 5	квадраты чисел ≤ 5 равны	$0^2, 1^2, 2^2$	$5 = 0^2 + 1^2 + 2^2$
Проверка 6	квадраты чисел ≤ 6 равны	$0^2, 1^2, 2^2$	$6 = 1^2 + 1^2 + 2^2$
Проверка 7	квадраты чисел ≤ 7 равны	$0^2, 1^2, 2^2$	$7 \neq 0^2 + 0^2 + 0^2$ $7 \neq 0^2 + 0^2 + 1^2$ $7 \neq 0^2 + 0^2 + 2^2$ $7 \neq 0^2 + 1^2 + 1^2$ $7 \neq 0^2 + 1^2 + 2^2$ $7 \neq 0^2 + 2^2 + 2^2$ $7 \neq 1^2 + 1^2 + 1^2$ $7 \neq 1^2 + 1^2 + 2^2$ $7 \neq 1^2 + 2^2 + 2^2$ $7 \neq 2^2 + 2^2 + 2^2$

Компьютер может искать такое число вечность, хотя мы с вами прекрасно знаем, что сумма двух четных чисел всегда дает четное число. Но вот вам пример гораздо более сложной задачи:

- *Найти четное число больше 2, не являющееся суммой двух простых чисел.*

Как вы считаете, справится ли когда-нибудь компьютер с этим расчетом? Вообще-то считается, что эта задача (называемая проблемой Гольдбаха) не имеет решения, но она столь сложна, что у

математиков нет единого мнения об ее истинности. Я нарочно подобрал три задачи разной степени сложности (очень простую, достаточно сложную и настолько сложную, что никто не знает ее ответа), чтобы сформулировать следующий вопрос:

• *Пользуются ли математики некоторым алгоритмом вычислений (давайте обозначим его через A), который позволяет им убедиться, что некий вариант вычислений будет продолжаться бесконечно долго?*

Например, подумайте, сработало ли в мозгу Лагранжа нечто похожее на компьютерную программу, прежде чем он пришел в конечном счете к заключению о возможности представления каждого числа суммой квадратов четырех чисел? Для ответа на

110

этот вопрос вовсе не надо представлять себя Лагранжем, достаточно просто проследить за ходом его рассуждений. Заметьте, что меня совершенно не интересует проблема оригинальности мысли, я хочу лишь рассмотреть проблему самого процесса познания, вследствие чего и использовал в формулировке вопроса слово «убедиться» (подразумевая возникновение или создание какого-то понимания).

В науке вообще (а в логике, в частности) утверждения о том, что некоторые вычисления являются бесконечными, носят название *ΠΠ-высказываний*. Давайте рассмотрим такие высказывания несколько подробнее, так как я собираюсь доказать, что указанного выше алгоритма A не существует.

Я начну доказательство с некоторого обобщения рассмотренных выше задач, а именно попытаюсь выявить зависимость связанных с их решением вычислений от чисел n натурального ряда. Пусть, например, нам необходимо:

• *Найти натуральное число, не являющееся суммой n квадратных чисел.*

Нам уже известно, что для $n = 3$ ответ может быть получен очень быстро, а для чисел $n > 4$ вычислительные операции никогда не закончатся (в соответствии с теоремой Лагранжа). Попробуем далее решить следующую задачу:

• *Найти нечетное число, являющееся суммой n четных чисел.*

В этом случае нам нет даже необходимости говорить о зависимости от n , поскольку для любых n вычисления никогда не закончатся. Наконец, в качестве обобщения проблемы Гольдбаха я предлагаю задачу следующего вида:

• *Найти четное число больше 2, не являющееся суммой n простых чисел.*

Если утверждение Гольдбаха верно, то вычисления будут длиться бесконечно для всех n (кроме 0 и 1). В некотором смысле доказательство даже упрощается с ростом n . Я действительно верю, что существует достаточно большое число n , для которого вычисления «продолжаются вечно».

Важнейшей характеристикой вычислений такого типа является их зависимость от чисел натурального ряда n , и именно это обстоятельство стало центральным моментом для так называемой *теоремы Гёделя* о неполноте (в Англии ее иногда называют догад-

111

кой или конъектурой Гёделя). Я буду рассматривать ее в формулировке, предложенной Аланом Тьюрингом, однако незначительно изменю ход его рассуждений. Если вы не любите математические выкладки, то можете просто пропустить этот кусок текста. Получаемый результат очень важен, но особенно интересно то, что доказательство вовсе не является сложным — оно всего лишь поразительно и даже вызывает недоумение!

Вычисления, связанные с конкретным числом n , совершенно стандартны и привычны для большинства компьютерных программ. Вы можете, например, просто взять набор программ, пронумеровать их в соответствии с текущим номером (обозначив его через p), а затем запустить компьютер, заложив в него этот порядковый номер. Компьютер начнет добросовестно «тарыхтеть», последовательно осуществляя вычисления с числом n в соответствии с p -й программой. Вам необходимо лишь записать порядковый номер p в виде нижнего индекса справа, и тогда набор программ (или вычислений), связанных с числом n , примет простой и ясный вид

$C_0(n), C_1(n), C_2(n), C_3(n), \dots, C_p(n), \dots$

Предположим, что этот набор содержит *все* возможные вычисления $C_p(n)$ и что мы можем найти какой-то эффективный метод упорядочения этих компьютерных программ, так что индекс p означает p -ю по порядку программу вычислений в соответствии с некоторым правилом, вследствие чего $C_p(n)$ будет означать p -ю программу, примененную к числу n .

Предположим далее, что мы имеем какую-то вычислительную (т. е. алгоритмическую) процедуру A , относящуюся к паре чисел (p, n) , осуществление которой дает очевидное и

убедительное доказательство того, что работа программы $C_p(n)$ еще не закончена. При этом вовсе не требуется, чтобы алгоритм $A(p, n)$ работал постоянно, т. е. если вычисление $C_p(n)$ является бесконечным, то это не значит, что характеризующий его алгоритм $A(p, n)$ тоже будет выполняться за бесконечное время. Но я подчеркиваю, что алгоритм A (в соответствии с уже отмеченными свойствами компьютера) срабатывает без ошибок, т. е. если операция $A(p, n)$ не завершена, то это также означает, что вычисление $C_p(n)$ не закончено. А теперь представим себе, что какие-то математики, исходя из соображений типа описанного алгоритма A , сформулировали (или просто повторили) в строгом математическом виде некоторое утверждение (например, П1 - утверждение). Предположим также, что они *знают* о существовании

112

операции A и *уверены* в ее надежности и обоснованности. Представим себе далее, что процедура A включает в себя *все* операции, доступные математикам для того, чтобы убедить последних в бесконечном характере вычислений. Процедура A начинается с отбора программы, имеющей индекс p , а затем натурального числа n , к которому относится данная программа. Далее, если вычислительная операция $A(p, n)$ закончена, то это означает, что вычисление $C_p(n)$ не завершено, т. е.

Если операция $A(p, n)$ завершена, то вычисление $C_p(n)$ не закончено. (1)

Собственно говоря, в этом и заключается роль процедуры A — она должна давать неопровержимые доказательства того, что определенные вычисления не окончены.

Предположим далее, что $p = n$, в результате чего возникает хорошо известная и довольно забавная ситуация, известная под названием *диагонализации Кантора* (кстати, ее использование математически совершенно обоснованно), после которой мы вдруг приходим к следующему выводу:

Если операция $A(n, n)$ завершена, то вычисление $C_n(n)$ не закончено.

Но в данном случае $A(n, n)$ зависит лишь от одного параметра n и, следовательно, принадлежит к набору вычислительных программ $C_p(n)$ (поскольку этот список по определению включал в себя все вычисления, связанные с единственной переменной n). Предположим, что вычислительная программа, идентичная $A(n, n)$, имела индекс k , т. е.

$$A(n, n) = C_k(n).$$

Положив $n = k$, мы тут же получаем

$$A(k, k) = C_k(k),$$

что в сочетании с условием (1) сразу приводит к заключению:

Если операция $A(k, k)$ завершена, то вычисление $C_k(k)$ не закончено.

Вспомнив, что $A(k, k)$ совпадает с $C_k(k)$, мы попадаем в логическую ловушку. Раз вычисление $C_k(k)$ заканчивается, то оно не заканчивается (следовательно, оно заканчивается и т. д.). Ловушка заключается в том, что если мы доверяемся проверочной процедуре A , то должны верить и в то, что вычисление $C_k(k)$ не закончено. Однако при этом процедура A тоже никак не может

113

закончиться, т. е. «понять» наконец, что вычисление $C_k(k)$ не кончается. Поэтому вычислительная процедура никак не может замкнуть цепочку математических рассуждений и решить, что заданное вычисление не заканчивается, т. е. установить истину П1 -утверждения. В этом суть доводов Гёделя—Тьюринга в той форме, которая нужна мне для дальнейших рассуждений.

Вы можете подумать об общем смысле этого доказательства. Оно ясно демонстрирует, что математическое понимание и/или интуиция не могут быть закодированы в виде какого-то вычислительного процесса, *в справедливости которого мы можем быть абсолютно уверены*. Мне кажется, что приведенная формулировка наиболее ясным образом определяет сущность подхода Гёделя—Тьюринга, хотя некоторые придерживаются другой точки зрения. В этой связи интересно вспомнить, что писали сами эти авторы о полученном ими результате. Предлагаю вам одну из оценок Тьюринга:

«Другими словами, абсолютно безупречно работающая машина не может обладать интеллектом. Об этом свидетельствует ряд теорем, которые, однако, ничего не говорят о том, каким уровнем интеллекта может обладать машина, не претендующая на безошибочность и безупречность работы».

Таким образом, согласно Тьюрингу утверждения теоремы Гёделя—Тьюринга совместимы с идеей о том, что математиков можно действительно рассматривать в качестве компьютеров, если алгоритмические операции, выполняемые ими при выводе математических истин, *не являются* принципиально здравыми, обоснованными и разумными. Мы можем ограничиться рассмотрением

лишь арифметических утверждений, например, лишь П1-высказываниями, которые представляют собой интересный, но весьма ограниченный тип утверждений. Мне кажется, что на самом деле Тьюринг верил в то, что человеческий мозг использует алгоритмы, но эти алгоритмы являются совершенно нерегулярными (именно в этом смысле они *неразумны*). Такая ситуация представляется неправдоподобной, поскольку она не только обескураживает, но и просто не позволяет понять, каким образом можно обсуждать что-то и приходить к каким-то выводам вообще. В любом случае точка зрения Тьюринга не внушает мне доверия, а в предложенной выше схеме (см. табл. 3.1) его рассуждения следует отнести к *A*-подходу.

Рассмотрим далее точку зрения Гёделя, которая в моей схеме относится к *D*-подходу. Обращаю ваше внимание на то, что при

114

рассмотрении одних и тех же проблем Тьюринг и Гёдель приходят к совершенно противоположным выводам. И хотя Гёдель не верит, что математическое вдохновение можно свести к каким-то вычислительным операциям, он не отказывается от этой возможности достаточно четко и определенно. Он говорит:

«С другой стороны, на основе всего доказанного сохраняется возможность существования (и, может быть, даже эмпирического создания) машины, способной доказывать теоремы. В реальной жизни такая машина *стала бы* эквивалентом математической интуиции, однако это невозможно *доказать* аналогично тому, как в теории конечных чисел нельзя выводить только *правильные* теоремы».

Это высказывание явно намекает на существование «лазейки», позволяющей непосредственно использовать теорему Гёделя—Тьюринга для опровержения идей вычислимости (или функционализма). Лазейка заключается том, что математик может пользоваться некоторым здравым и логичным алгоритмом, не будучи полностью уверен в его разумности. Таким образом, Гёдель видел лазейку в *познавательной* части алгоритмов, в то время как Тьюринг выделяет в алгоритмах именно их *разумность*.

Ни один из этих подходов не кажется мне убедительным. Теорема Гёделя—Тьюринга всего лишь утверждает, что если доказана разумность какой-то алгоритмической процедуры (для доказательства П1-утверждений), то можно немедленно получить некий результат, выходящий за рамки данной процедуры. Мы можем сделать это и сами, используя какую-либо другую алгоритмическую процедуру (о разумности которой мы ничего не знаем). Кроме этого возможно существование некой обучающейся машины, которая поможет нам в этом поиске. Эта проблема (и целая куча связанных с нею задач) довольно подробно рассматривается в моей книге «Тени разума», и поэтому я не буду повторять все доводы и рассуждения, а отмечу только два из них.

Главный вопрос заключается в том, каким образом возникает этот предполагаемый алгоритм? Можно предположить, что в мозгу человека при этом происходит нечто подобное естественному отбору, в то время как в случае робота новый алгоритм создается какой-то специальной структурой, которую можно смело назвать AI (Artificial Intelligence, искусственный интеллект). Я не буду вдаваться в сложные рассуждения по этому поводу, а лишь приведу вам две простые карикатуры из упомянутой книги.

115

Рис. 3.7.

Едва ли способность к сложным математическим построениям давала нашим далеким предкам какие-то особые преимущества в процессах естественного отбора, однако общая способность к *пониманию*, безусловно, способствовала их выживанию.



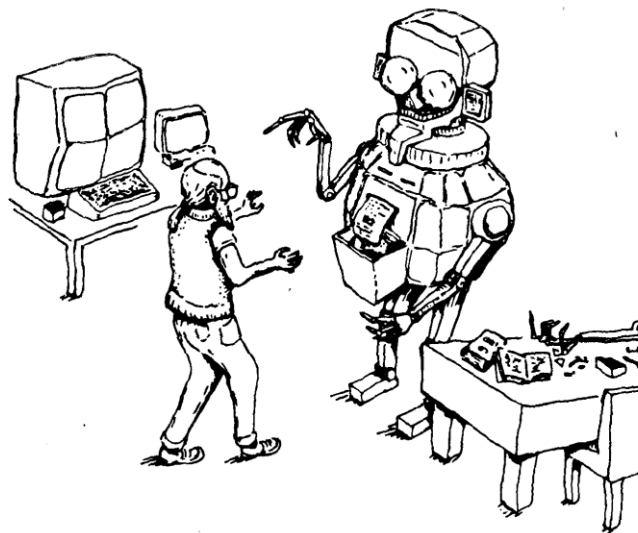
Первая из них (рис. 3.7) относится к связи понимания с естественным отбором. Любой первобытный математик с точки зрения естественного отбора и дарвиновской межвидовой борьбы за существование находится в весьма невыгодном положении (по сравнению, например, с показанным на рисунке саблезубым тигром). Однако на заднем фоне картинки можно видеть сородичей математика, которые успешно охотятся на мамонтов, строят дома, выращивают какие-то злаки и т. п. Все эти операции требуют от первобытных людей развития «понимания», но заметьте, что сам математик в этих действиях непосредственно не участвует. Таким образом, качество и уровень «понимания» могут существенно влиять на процессы естественного отбора видов, хотя сами математические алгоритмы не имеют к этим процессам никакого прямого отношения.

На другой карикатуре (рис. 3.8), связанной с одним из сюжетов книги «Тени разума», показан созданный по некоторому проекту робот с искусственным интеллектом. Сюжет относится к дискуссии между роботом и специалистом по AI, которая достаточно сложна и занимает в книге много места, вследствие чего я не буду ее пересказывать. В свое время моя точка зрения на доводы Гёделя—Тьюринга была подвергнута жестокой критике самыми различными людьми, с самых разных позиций и по самым разным причинам. Дискуссия в книге «Тени разума»

116

Рис. 3.8. Император Альберт в книге «Тени разума» спорит с Математически Обоснованной Киберсистемой.

Первые 200 страниц книги посвящены анализу и критическому рассмотрению различных идей, связанных с использованием доводов Гёделя—Тьюринга. Этому обсуждению придана форма диалога между AI-экспертом и роботом.















между AI-экспертом и роботом представляет собой мою попытку обобщения всех новых доводов и возражений.

Давайте вернемся к началу обсуждения. Доводы самого Гёделя относятся к конкретным утверждениям относительно чисел, но заметьте, что Гёдель говорит лишь о том, что не существует вычислительных процедур, которые позволяют описывать свойства *натуральных чисел*. Однако, несмотря на отсутствие вычислительных методов их описания, любой ребенок прекрасно понимает, что представляют собой такие числа. Для объяснения их сущности достаточно всего лишь показать ребенку разное число разных объектов (см., например, рис. 3.9), глядя на которые любой ребенок довольно легко и быстро приходит к абстрактному пониманию сущности натуральных чисел. При этом никто не излагает детям теорию и набор вычислительных правил, связанных с натуральными числами, — дети сразу прекрасно «понимают» сущность идеи натуральных чисел. Я хочу подчеркнуть, что они способны каким-то образом входить «в кон-

117

Рис. 3.9. Ребенок вполне способен воспринимать мир абстрактных платоновских идей, рассматривая простые рисунки.

					--
					--
					--
--	--	--	--	--	--
0	1	2	3	4	--

такт» с платоновским миром математических понятий и идей. Хотя многим людям такой подход к проблеме математического восприятия не очень нравится, мне лично представляется, что нечто подобное происходит на самом деле. В любом случае натуральные числа, существующие где-то в мире платоновских идей, одновременно присутствуют где-то «здесь», в результате чего наша способность «понимать» мир делает окружающую нас действительность более доступной. Мы не обладали бы этой способностью, если бы были просто неразмывляющими компьютерами. Теорема Гёделя свидетельствует как раз о том, что постижение сущности и природы натуральных чисел осуществляется не при помощи каких-то правил, а за счет их взаимодействия или контакта с платоновским миром, удачным примером чего может служить процесс понимания того, чем являются *натуральные числа*.

Я утверждаю, что математическое понимание вообще сводится вовсе не к вычислительной работе мозга, а к чему-то совершенно иному, связанному с нашей способностью осознавать или понимать окружающий мир. Разумеется, вы можете возразить мне, что «невывислимый» характер математического восприятия вовсе не означает, что и другие формы сознания явля-

ются «невывислимыми». Однако мне кажется, что предложенная идея достаточно обоснованна хотя бы потому, что не очень умно проводить разграничение между математическими и всеми остальными видами «понимания». Именно эту идею я пытался внушить, демонстрируя вам рис. 3.7. Понимание вовсе не следует считать характерной или даже профессиональной характеристикой математиков, оно является весьма общей чертой, присущей всем человеческим существам, и эта способность принципиально не является вычислительной по своей природе, вне всякой зависимости от математики. Нельзя также провести границу между пониманием и человеческим сознанием вообще, поэтому (несмотря на мои более ранние утверждения, что я ничего не знаю о человеческом сознании) мне кажется, что понимание является просто примером сознания (или хотя бы чем-то похожим на него). Впрочем, я также не могу провести четкую границу между сознанием человека и животного. Я прекрасно понимаю, что эта фраза может многим не понравиться, но я на самом деле думаю, что люди очень похожи на многих животных, и (хотя мы соображаем чуть лучше, чем некоторые наши биологические родственники) они также способны к пониманию и обладают основами сознания.

Поэтому «невывислимость» *каких-то аспектов* сознания (в частности, связанных с математическим пониманием) может служить, на мой взгляд, достаточно убедительным доказательством невычислимой природы *всех* процессов познания.

Что, в сущности, я подразумеваю под термином «невывислимость»? Я уже много говорил об этом, и мне хочется привести еще один конкретный пример, демонстрирующий невычислимость в моем понимании. Для этого я опишу некоторую *игрушечную модель вселенной* типа тех, которые изобретают физики, когда не могут найти себе лучшего занятия (вообще говоря, это не худшее занятие, которое можно придумать). Эта модель отражает некоторые особенности Вселенной, однако ее не следует, естественно, соотносить с реальной Вселенной. Роль этой скромной модели сводится лишь к иллюстрации некоторых, совершенно определенных характеристик.

В такой модели рассматриваются лишь дискретные моменты времени (мы можем обозначить их просто 0, 1, 2, 3, 4, ...), каждому из которых соответствует некоторое состояние Вселенной, описываемое некоторым набором так называемых *полимино*. Вы, естественно, вправе спросить

меня, что означает этот новый термин? Полимино представляет собой просто некий набор

119

Рис. 3.10. Невычисляемая, но детерминистическая игрушечная модель вселенной, различные состояния которой задаются парой конечных наборов полимино.

Если первый заполняет плоскость целиком, то временная эволюция осуществляется следующим образом: численный номер первого набора возрастает на единицу, а второй набор используется для «обозначения времени». Если же первый набор не покрывает плоскость целиком, наборы следует поменять местами и продолжить операцию. Эволюция системы, описываемая парой таких наборов полимино, должна выглядеть следующим образом: (S_0, S_0) , (S_0, S_1) ,

(S_1, S_1) , (S_2, S_1) , (S_3, S_1) , (S_4, S_1) , ..., (S_{278}, S_{251}) , (S_{251}, S_{279}) , (S_{252}, S_{279}) , ...

$$S_0 = \{ \square \}, \quad S_1 = \{ \square, \square \}, \quad S_2 = \{ \square, \square \}, \quad S_3 = \{ \square, \square \},$$

$$S_4 = \{ \square, \square \}, \quad S_5 = \{ \square, \square \}, \quad S_6 = \{ \square, \square \}, \dots,$$

$$S_{278} = \{ \text{[diagram]}, \dots \}, \quad S_{975032} = \{ \text{[diagram]}, \text{[diagram]}, \text{[diagram]} \}, \dots$$

квадратиков, способных заполнять плоскость, объединяясь друг с другом (рис. 3.10). Меня сейчас интересуют наборы таких полимино. Состояние вселенной в предлагаемой игрушечной модели задается только двумя реальными и конечными наборами полимино. На рис. 3.10 приведены все возможные конечные множества полимино, перечисленные в соответствии с некоторой вычислительной процедурой S_0, S_1, S_2, \dots . Как выглядит динамика или эволюция этой забавной игрушечной вселенной? Ее развитие начинается в некоторый начальный момент времени с набора полимино (S_0, S_0) , а затем продолжается в виде все новых пар множеств полимино, отбираемых по некоторому заданному правилу. В соответствии с правилом отбора учитываются только такие наборы плиток полимино, которые позволяют заполнить плоскость целиком. Отбор, следовательно, сводится лишь к решению следующей задачи: можно ли заполнить плоскость плитками заданного набора таким образом, чтобы на плоскости не было «зазоров» или «накладок»? Предположим далее, что в некоторый момент времени наша игрушечная вселенная свелась к двум конкретным наборам полимино (S_q, S_r) , определяющим всю дальнейшую эволюцию данной модели. Ес-

120

ли вы можете покрыть всю плоскость набором полимино S_q , то вы переходите к следующему полимино S_{q+1} , т. е. получаете для следующего момента времени пару множеств (S_{q+1}, S_r) . Если же вам это не удастся, вы должны поменять наборы местами, что дает вам новую пару (S_r, S_{q+1}) . Чем нам может быть интересна эта очень простая и даже несколько примитивная модель? Суть рассматриваемой модели в том, что хотя ее эволюция носит совершенно детерминистический характер (ведь выше я задал абсолютно ясную и полностью определенную процедуру развития), *она не является вычислимой*. Дело в том, что Робертом Бергером была доказана теорема, в соответствии с которой не существуют компьютерные операции, позволяющие моделировать развитие этой вселенной, поскольку можно строго показать, что не существуют алгоритмы, позволяющие решить задачу о заполнении плоскости набором полимино.

Рассмотренная модель наглядно демонстрирует различие между вычислимостью и детерминизмом. На рис. 3.11 приведены некоторые примеры заполнения плоскости плитками полимино различных размеров и форм. Легко видеть, что в случаях *a* и *b* полное заполнение плоскости осуществляется без труда. В случае *в* два типа плиток по отдельности не могут заполнить плоскость целиком (на рисунке указаны неизбежно возникающие «зазоры», или «дырки», в покрытии, однако вместе они легко заполняют плоскость). В случае *г* плоскость можно заполнить плитками одного типа, однако это достигается только за счет достаточно сложной «подгонки».

Задача значительно усложняется при попытке заполнения плоскости плитками полимино более сложной формы, показанными на рис. 3.12 (именно к этой ситуации относится теорема Роберта Бергера). Дело в том, что три типа показанных на рисунке плиток покрывают плоскость целиком, однако эту операцию нельзя осуществить таким образом, чтобы узор повторялся! На

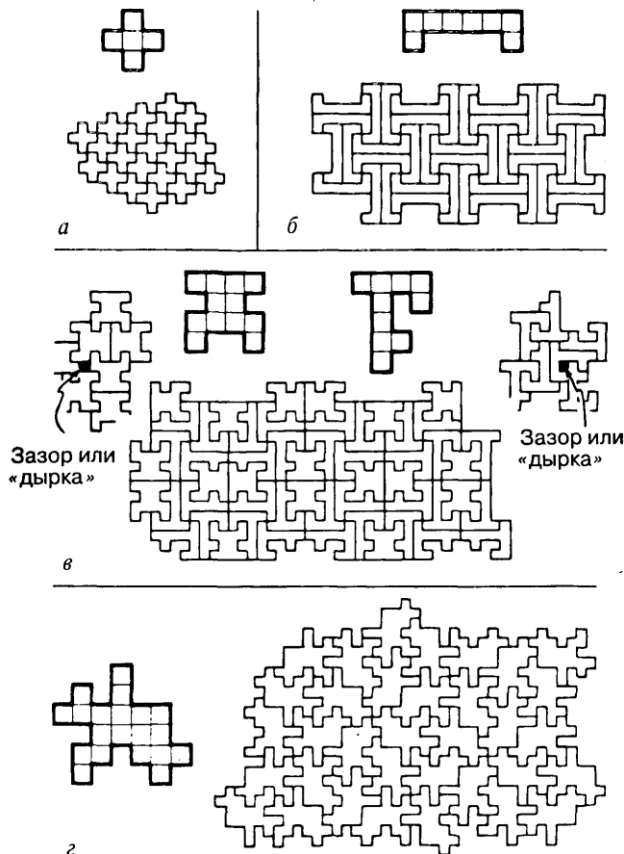
каждом этапе процесс заполнения определяется вашим выбором продолжения, в результате чего очень трудно установить порядок действий. Тем не менее операция, безусловно, выполнима, и именно существование таких вариантов заполнения плоскости привело Бергера к формулировке теоремы, из которой следует, что для моделирования развития даже этой игрушечной вселенной невозможно выработать вычислительную программу.

А как обстоят дела с описанием настоящей, большой Вселенной? В гл. 2 я уже немало говорил о фундаментальных недостат-

121

Рис. 3.11.

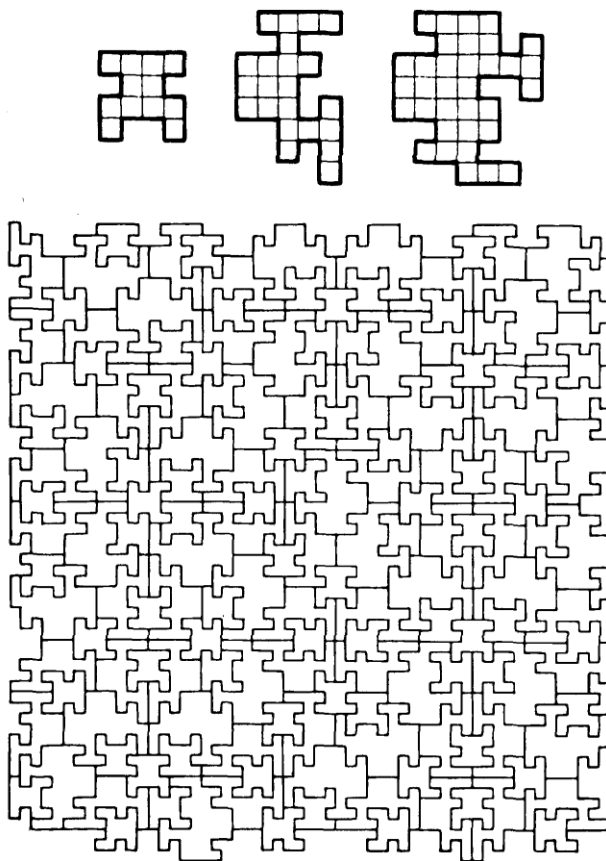
Покрывание бесконечной евклидовой плоскости различными наборами плиток полиоминно (разрешено также использование зеркальных «отражений» этих плиток). Ни один из двух типов плиток набора **в** не может заполнить плоскость целиком.



ках существующей физической картины мира. Подумайте, нет ли в физической теории каких-то проблем, заставляющих вспомнить о невычислимости некоторых операций? У меня есть основания считать, что квантовая теория гравитации в своем правильном виде должна быть именно невычислимой. Я говорю об этом вполне серьезно и продемонстрирую вам, что проблема невычислимости возникает, по крайней мере, в двух независимых направлениях развития квантовой гравитации, причем именно тогда, когда мы рассматриваем квантовые суперпози-

122

Рис. 3.12. Набор из трех типов плиток полиоминно может заполнить плоскость целиком, но заполняющий узор не обладает периодичностью.

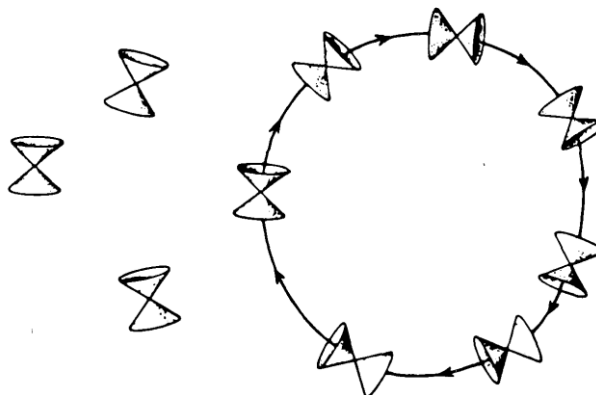


ции четырехмерных пространств-времен (в большинстве существующих теорий используется лишь суперпозиция трехмерных пространственных состояний).

Рассмотрим сначала так называемую схему Героха—Хартля для квантовой гравитации, которая с самого начала содержит элемент невычислимости, поскольку одним из используемых в ней математических положений является доказанная Марковым невозможность вычислительной классификации четырехмерных топологических складок. Я не буду вдаваться в сложные технические детали, но хочу еще раз подчеркнуть, что невычис-

123

Рис. 3.13. При достаточно строгом заполнении пространства-времени световыми конусами могут возникнуть замкнутые времениподобные мировые линии.



лимость возникает естественным образом при объединении общей теории относительности и квантовой механики.

В качестве второго примера появления невычислимости в теориях квантовой гравитации можно сослаться на результаты, содержащиеся в препринте одной из работ Дэвида Дейча. К моему глубокому удивлению, в полном тексте статьи, опубликованной позднее, я не обнаружил этих данных! Я специально беседовал с автором на эту тему, и он заверил меня, что опустил эти результаты не из-за их ошибочности, а лишь потому, что они были не очень важны для статьи в целом. Он считает, что забавные суперпозиции пространства-времени (которые мы должны рассматривать хотя бы в качестве гипотетически возможных) возникают вследствие того, что

некоторые из потенциально возможных вселенных могут образовывать замкнутые пространственно-временные линии (рис. 3.13). В таких ситуациях всякие каузальные (причинно-следственные) связи полностью теряют смысл, причины и следствия «бегут по замкнутому кругу», а прошлое и будущее просто перемешиваются друг с другом. Хотя все это выглядит совершенно нереальным и противофактическим, оно (как и в задаче гл. 2, связанной с испытанием бомб) может влиять на действительные события. Я не считаю эти рассуждения достаточно серьезными и убедительными, однако они показывают, что какие-то невычислимые операции могут легко обнаружиться и в совершенно правильных теоретических построениях.

124

Далее мне хотелось бы обсудить еще один достаточно сложный вопрос. Выше я подчеркивал, что детерминизм и вычислимость представляют собой разные понятия, и это подводит нас к проблеме *свободы воли*. В классической философии свобода воли всегда рассматривалась в теснейшей связи с детерминизмом. Вы и сами, наверняка, сталкивались с этой проблемой и размышляли о том, насколько наше будущее определяется нашим прошлым и т. п. Мне кажется, что есть масса других более интересных и важных вопросов, например: «Определяется ли наше будущее нашим прошлым *вычислимым образом?*».

Такие рассуждения связаны со столь многими и разнообразными проблемами, что я могу только упомянуть некоторые из них, не пытаясь даже как-то отвечать. Например, существует вечный спор о том, насколько наши поступки определяются *нашей наследственностью*, а насколько — *нашим окружением*. Интересно и странно, что в этой связи очень редко рассматривается *роль случайных факторов*. Ведь мы не можем контролировать все обстоятельства нашего окружения, поэтому, возможно, нам следовало бы задать себе простой вопрос: «Существует ли нечто (возможно, это именно то, что мы именуем Я), которое отличается от окружения и не зависит от посторонних воздействий?». Такая постановка вопроса, кстати, часто используется в обычной юридической практике. Например, проблема прав и обязанностей, безусловно, связана с действиями некоторого независимого субъекта, действительно именуемого «Я». Конечно, эта проблема очень сложна и деликатна. Прежде всего нам следовало бы, конечно, ввести ясные определения понятий *детерминизм* и *нетдетерминизм*. Обычно нетдетерминизм подразумевает именно наличие случайных факторов или элементов, однако этого явно недостаточно для решения проблемы, поскольку некоторые случайные элементы вполне могут контролироваться. Возможно, в таких случаях следует говорить о *невычислимости* или даже о *невычислимости более высокого уровня*. Удивительно, но доводы типа гёделевских оказываются реально применимыми на разных уровнях (даже на том уровне, который Тьюринг называл *машиной предсказаний*), т. е. они обладают значительно более общим смысловым содержанием, чем это было представлено мною выше. Поэтому следует считать что вопрос о наличии более высоких уровней невычислимости может быть связан с поведением реальной Вселенной или, возможно, с тем понятием, которое мы воспринимаем в качестве нашей свободы воли.

125

Рис. 3.14. Схема работы нейрона, связанного с другими нейронами через синапсы.

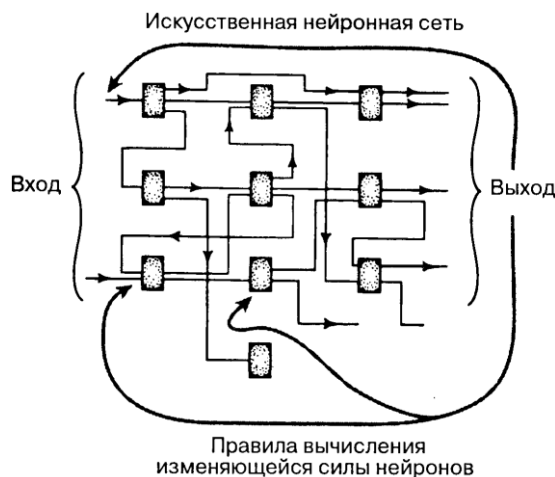


Следующий вопрос относится к уже упомянутому мной «контакту» с миром платоновских идей. В чем, собственно говоря, состоит этот контакт и каков его характер? В сущности, можно указать огромное количество так называемых «миров» с участием невычислимых элементов — судебное дело, здравый смысл, озарение, эстетическое чувство, сострадание, мораль... Мне представляется, что все эти области жизни и сознания характеризуются наличием элементов невычислимости. До сих пор я говорил о мире платоновских идей главным образом в математическом смысле, однако в идеях Платона есть и другая сторона, которую нельзя игнорировать. Абсолютные платоновские идеи ассоциировались не только с истиной, их другими характеристиками выступали добро и красота. Поэтому любой контакт с платоновскими идеями, доступный человеческому разуму и не сводящийся к вычислительным операциям (или вычисляемому поведению), представляется мне чрезвычайно важным.

А теперь давайте задумаемся о работе нашего собственного мозга. На рис. 3.14 представлен небольшой участок мозга, относящийся к очень важной структуре — *нейронной системе*. Важной частью каждого нейрона является так называемый *аксон*, представляющий собой очень длинное нервное волокно, которое расщепляется в различных местах на отдельные, более тонкие волокна, которые затем собираются или объединяются в специальных образованиях, называемых *синапсами*. Синапсы в основном играют роль узлов связи при передаче сигналов между нейронами посредством химических соединений (так называемых нейротрансмиттеров). Некоторые синапсы по природе являются возбуждателями (т. е. поступление в них веществ-нейротрансмиттеров приводит к возбуждению связанных с синапсом нейронов), а другие — ингибиторами, тормозящими передачу сигналов к нейронам. Работу синапса при передаче информации-

126

Рис. 3.15.



онного сигнала от одного нейрона к другому характеризуют параметром, именуемым *силой* синапса. Если бы все синапсы обладали одинаковой силой, то человеческий мозг действительно очень напоминал бы компьютер. Однако я сразу отмечу, что силы синапсов не являются постоянными величинами, и у специалистов есть множество теорий относительно закономерностей их изменений. В качестве примера можно привести одну из первых гипотез в этой области, механизм Хебба. Проблема заключается в том, что предполагаемые закономерности почти всегда являются вычислительными, и лишь очень редко (практически всегда безуспешно) исследователи пытаются учесть элементы случайности. Задавая какую-либо смешанную, вычислительно-вероятностную теорию изменения сил синапсов, можно моделировать поведение системы нейронов и синапсов на компьютере (напоминаю, что вероятностные элементы поведения моделируются очень легко), в результате чего мы можем получать некоторое описание рассматриваемой системы (типа схемы на рис. 3.15).

Элементы, обозначенные квадратиками на рис. 3.15 (вы можете считать их, например, транзисторами), способны играть роль нейронов мозга, что позволяет создавать и рассматривать специальные электронные устройства, называемые *искусственными нейронными сетями*. В таких сетях можно задавать различные правила изменения силы синапсов (обычно это делается для получения более качественных выходных сигналов). Ис-

127

пользуемые правила всегда носят вычислительный характер, поскольку исследователи вводят их для удобства моделирования на компьютере. Собственно говоря, всю эту ситуацию можно рассматривать в качестве теста (т. е. если вы можете моделировать поведение системы на компьютере, то она является вычислительной), однако применение этого теста носит иногда парадоксальный характер. Например, Джеральд Эдельман предложил учитывать в работе мозга некоторые функции, которые он считал «невычислимыми». Как он учел эти функции? Да очень просто — промоделировал выполнение этих функций на своем компьютере! Но ведь если компьютеру удалось их осуществить, то они относятся к вычислимым!

Мне бы хотелось рассмотреть еще некоторые вопросы, связанные с работой нейронов. Что делают отдельные нейроны? Являются ли они действительно своеобразными вычислительными элементами и т. п.? Следует помнить, что нейроны представляют собой биологические клетки, а биологическая клетка — настолько сложная и развитая структура, что она способна проделывать

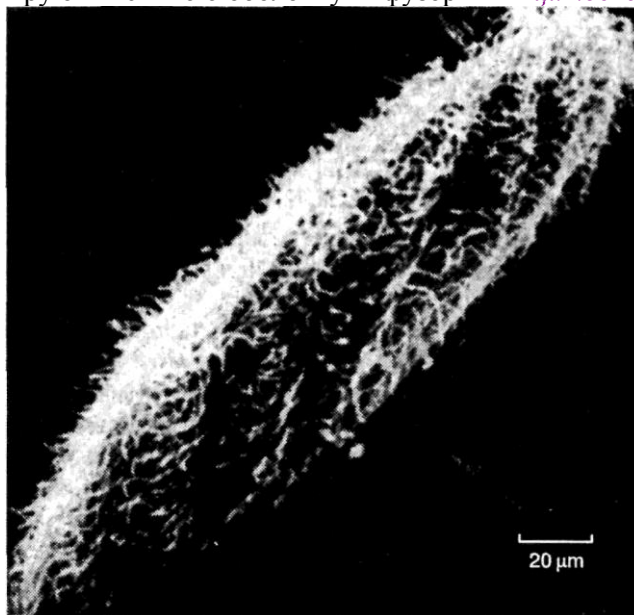
хитрые трюки даже в одиночку. Например, показанное на рис. 3.16 одноклеточное существо (инфузория-туфелька, парамеция) способно плыть к источнику пищи, убегать от опасности, преодолевать препятствия и даже учиться, т. е. приобретать «жизненный опыт». Наличие таких свойств, конечно, наводит на мысль о нервной системе, но именно нервной системы инфузория точно не имеет. Было бы просто великолепно, если бы, например, инфузории-туфельки и являлись интересующими нас нейронами! К сожалению, никаких нейронов инфузория иметь не может хотя бы потому, что она представляет собой одну-единственную клетку. Мне бы очень хотелось иметь возможность задать всем этим одноклеточным (включая амёбу) простой вопрос: «Как вам всё это удается?»

Предполагается, что выполнение сложных функций этих одноклеточных организмов обеспечивает так называемый *цитоскелет* (который помимо всего остального создает внешнюю форму клетки). Поверхность инфузории покрыта тонкими ворсинками, или ресничками, которые используются для плавания и состоят главным образом из маленьких трубчатых структур, называемых *микротрубками*. Цитоскелет (внешняя оболочка) тоже образуется этими микротрубками, а также белком-актином и промежуточными волокнами. По аналогичному механизму передвигаются и амёбы, эффективно использующие микротрубки для выдвигания своих псевдоподий.

128

Рис. 3.16. Инфузория-туфелька.

Обратите внимание на тонкие ворсинки (так называемые реснички), используемые для плавания, которые формируют внешнюю оболочку инфузории — *цитоскелет*.



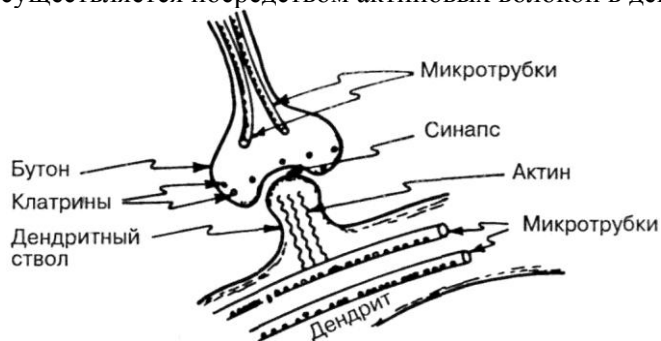
Микротрубки (иногда их называют микроканальцами) являются довольно необычными объектами. Например, реснички, посредством которых передвигается инфузория, представляют собой пучки таких микротрубок. Более того, очень часто микротрубки вовлекаются в процесс митоза (так биологи называют деление клеток). Впрочем, я хотел бы сразу подчеркнуть, что это происходит только с микротрубками в обычных клетках, а не в нейронах, так как нейроны вообще не делятся (возможно, это и является их главной особенностью). Цитоскелет управляется структурой, именуемой *центросомой*, в которой выделяются так называемые *центриоли*, представляющие собой два пучка (в виде цилиндров) микротрубок в виде разорванной буквы Г. На критической стадии разделения центросомы каждый из цилиндров разрастается, в результате чего образуются две центриоли в виде Г, отходящие друг от друга и вытягивающие за собой связки микротрубок. При этом волокна микротрубок каким-то образом присоединяют обе части разорванной центросомы к раз-

129

Рис. 3.17.

Клатрины (и окончания микротрубок) входят в состав так называемого синаптического окончания аксона, имеющего форму бутона, и существенным образом влияют на величину силы

синапса. Это влияние осуществляется посредством актиновых волокон в дендритных отростках.



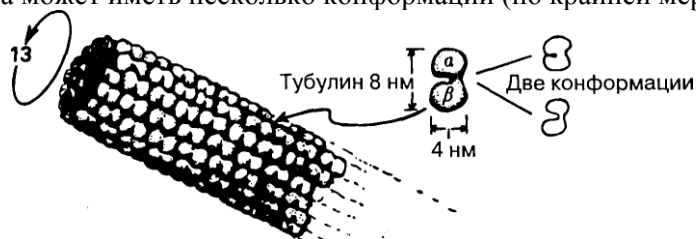
ным цепям ДНК ядра клетки, после чего эти цепи расходятся. С такого достаточно сложного процесса начинается упомянутый выше митоз (деление клетки).

Все это невозможно в нейронах (поскольку, как я уже отмечал, нейроны не могут делиться), поэтому в них микротрубки должны выполнять какие-то другие функции. Что делают микротрубки в нейронах? Похоже, что у них там масса дел (включая перенос молекул-нейропередатчиков внутри клетки), однако они почти точно связаны с уже упоминавшейся силой синапсов. На рис. 3.17 показаны (естественно, с очень большим увеличением) нейрон и синапс, а также упрощенная схема расположения микротрубок и присоединения актиновых волокон. Из рисунка можно понять, что микротрубки могут изменять силу синапса, воздействуя на так называемые *дендритные отростки*, которые часто присутствуют в синапсах и могут расти, сокращаться и видоизменяться различным образом. Воздействие может быть связано с состоянием особых белков (актинов), играющих важную роль в механизме сокращения мышц. Дело в том, что соседние микротрубки могут сильно влиять на актины, а актины, в свою очередь, меняют форму и диэлектрические свойства так называемых синаптических окончаний. Существует, по меньшей мере, еще два других механизма воздействия микротрубок на силу синапса. Во-первых, микротрубки участвуют в процессах передачи сигнала от одного нейрона к другому, так как

130

Рис. 3.18. Микротрубка имеет вид полого цилиндра, обычно составленного из 13 «колонок» димеров тубулина.

Молекула тубулина может иметь несколько конформаций (по крайней мере, две).



именно они обеспечивают перенос химических веществ вдоль аксонов и дендритов, и от их активности могут зависеть, например, концентрация этих веществ в окончаниях нервных волокон и в конечном счете сила синапса. С другой стороны, микротрубки участвуют в процессах роста и распада отдельных нейронов, а также в формировании системы связи в нейронных сетях.

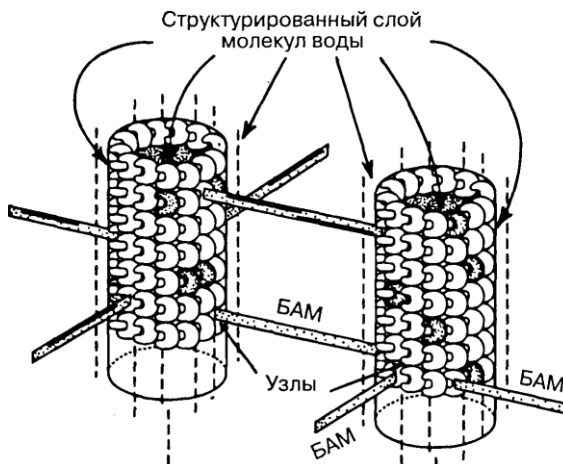
Устройство отдельной микротрубки схематически показано на рис. 3.18. Она построена, главным образом, из довольно своеобразного белкового вещества *тубулина*, способного существовать в нескольких (по крайней мере, в двух) конформациях (пространственных формах или состояниях), которые могут переходить друг в друга. Стюарт Хамерофф и его группа предложили очень интересный механизм передачи сигнала вдоль трубки, в соответствии с которым микротрубки при передаче ведут себя как хорошо известные связистам и кибернетикам *клеточные автоматы*. Две различные конформации тубулина соответствуют просто дискретным значениям 0 и 1, в результате чего микротрубка в целом может вести себя подобно обычному цифровому компьютеру. Такой подход позволяет нам частично понять работу нейронной сети, хотя, разумеется, каждый отдельный нейрон вовсе не похож на простой переключатель, поскольку в нем содержится много микротрубок, способных выполнять очень сложные функции.

Позвольте мне далее предложить собственную несколько неожиданную идею, заключающуюся в том, что квантовая механика может оказаться весьма полезной при рассмотрении процессов такого рода. В описываемых микротрубках меня более всего заинтересовало их строение, т. е.

факт, что они представ-
131

Рис. 3.19.

В системе микротрубок внутри нейронной сети могут происходить крупномасштабные квантовомеханические события, формирующие «разумные события» из отдельных **OR**-возможностей. Требуемая эффективная изоляция может обеспечиваться слоем упорядоченных молекул воды на стенках трубок. «Настройка» квантовой деятельности может осуществляться белками, ассоциированными с микротрубками (БАМ), соединяющими микротрубки в «узлах» нейронной сети.



ляют собой *трубки* и, следовательно, при определенных условиях могут обеспечить изоляцию происходящих в них процессов от любого случайного воздействия извне. Вспомните, что в гл. 2 я говорил о необходимости создания новой формы **OR**-физики, для эффективности которой необходимо иметь механизм массопереноса при передаче квантовых суперпозиций, обеспечивающий их надежную изоляцию от окружения. Именно трубка представляет собой структуру, в которой возможно осуществление крупномасштабных квантово-когерентных событий, в чем-то напоминающих квантовые эффекты в полупроводниках. Значительный перенос массы в трубках может происходить за счет согласованных изменений конформации тубулина (например, по предложенному Хамероффом механизму), при которых поведение «клеточных автоматов» будет соответствовать каким-то квантовым суперпозициям. Процесс такого типа схематически показан на рис. 3.19.

132

Для полноты предлагаемого описания необходимо еще изобразить когерентное квантовое колебание, происходящее в трубках и распространяющееся на большие области мозга. Много лет назад очень общую идею такого типа выдвинул Роберт Фрелих, предполагавший обнаружить такие структуры именно в биологических системах. Микротрубки представляются мне весьма удобной средой для проявления крупномасштабных квантово-когерентных явлений. Относительно термина «крупномасштабный» я бы хотел напомнить вам описанные в гл. 2 эффекты квантовой нелокальности (типа парадокса Эйнштейна—Подольского—Розена), которые наглядно демонстрируют нерасторжимую связь событий и эффектов, происходящих на очень больших расстояниях друг от друга. Нелокальные эффекты квантовой механики нельзя понять, рассматривая некоторые события в качестве совершенно независимых, поскольку они требуют учета каких-то глобальных связей.

Мне кажется, что сознание тоже представляет собой нечто глобальное, и любой физический процесс, ответственный за сознание, должен носить существенно обобщенный характер. Квантовая когерентность, очевидно, удовлетворяет всем требованиям в этом отношении. Для осуществления крупномасштабной квантовой когерентности необходима высокая степень изоляции, которая обеспечивается стенками микротрубок. Конформационные переходы тубулина могут потребовать дополнительной изоляции, которую создает слой упорядоченных молекул воды, покрывающих внешнюю сторону микротрубок. Эта упорядоченная, или структурированная, вода (ее наличие в живых клетках установлено совершенно точно) может и сама играть достаточно важную роль в процессах квантово-когерентных колебаний внутри трубок. Хотя всё сказанное может показаться чрезвычайно сложным, тем не менее его нельзя считать совершенно бессмысленным.

Квантовые колебания в трубках должны быть как-то связаны с функционированием самих микротрубок (а именно: с механизмом работы клеточных автоматов, который предлагал Хамерофф), однако для нашего рассмотрения важнее связать эту идею с квантовомеханическим поведением. Поэтому следует говорить не о вычислительных операциях в обычном смысле этого слова, а о так называемых квантовых вычислениях, в которых участвуют суперпозиции таких операций. При последовательном и целостном подходе мы должны были бы рассматривать вычисления только на квантовом уровне, однако в нашем слу-

133

чае квантовое состояние в какой-то момент оказывается «запутанным» с окружением, в результате чего мы должны, по-видимому, случайным образом «перескочить» на классический уровень в соответствии со стандартной **R**-процедурой квантовой механики. Было бы не очень разумно требовать возникновения истинной невычислимости на этом этапе, поскольку тогда должны со всей очевидностью проявиться и невычислимые особенности **OR**-перехода, требующие полной изоляции. Поэтому я считаю, что в мозгу должно существовать нечто, обеспечивающее изоляцию, достаточную для того, чтобы **OR**-физика могла сыграть свою важную роль. Короче говоря, для осуществления суперпозиционных вычислений в микротрубках требуется лишь одно: вычисления должны осуществляться в настолько изолированном состоянии, чтобы могли проявиться новые физические закономерности.

Таким образом, я предлагаю следующий механизм: квантовые вычисления осуществляются за достаточно длительное время, в течение которого система должна оставаться изолированной от окружения. За этот временной промежуток (который составляет около секунды и представляет собой один из критериев, о которых я упоминал, описывая стандартные квантовые операции) осуществляются невычислительные операции, в результате которых мы получаем некие результаты, существенно отличные от рассматриваемых в обычной квантовой теории.

Конечно, все приведенные рассуждения содержат много умозрительных и рискованных предположений, однако этот подход предлагает некий реальный прогресс в установлении связи между сознанием и биофизическими процессами. Предлагаемая модель дает значительно более специфическую, содержательную и количественно определенную картину, чем все существующие подходы. Мы можем, например, попытаться найти минимальное число нейронов, требуемых для осуществления **OR**-перехода. Необходимо также оценить величину временного интервала (или масштаба) T , о котором я говорил в конце гл. 2. Кстати, давайте задумаемся о том, какой смысл будет иметь оценка величины T в предположении, что «события сознания» действительно связаны с **OR**-переходами. Означает ли T оценку времени осознания? В этой связи можно отметить, что существуют две разные экспериментальные методики (обе развиты группой Б. Либета), позволяющие как бы раздельно изучать активное познание (связанное со свободой воли) и пассивное сознание (чувственные восприятия).

134

Рассмотрим сначала первую из этих методик, которую можно связать с проблемой свободы воли. В экспериментах Либета и Корнхубера на голове испытуемых укрепляли электроды, позволяющие регистрировать электрическую активность мозга, после чего испытуемому давалась возможность нажимать на заданную кнопку в любой момент времени по собственному желанию. Усредненные результаты многочисленных экспериментов (приведенные на рис. 3.20, *а*) наглядно демонстрируют, что каждому действию испытуемого (повторяю: он знает и верит, что поступает в соответствии лишь с собственным волевым решением) соответствует электрическое возбуждение длительностью около секунды, т. е. принятие спонтанных решений (актов свободной воли) связано с временной задержкой порядка одной секунды.

Очень интересные результаты были получены в экспериментах с пассивным осознанием (которые, кстати, оказались значительно более сложными при осуществлении). Выяснилось, что пассивное осознание или восприятие чего-либо требует возбуждения мозговой активности длительностью около половины секунды (рис. 3.20, *б*). В этих экспериментах применялась методика, позволяющая организовать *задержку* сознательного восприятия раздражения кожи на некоторое время. Очень интересно, что когда эта задержка не превышала половины секунды, испытуемые были уверены, что они воспринимают момент раздражения совершенно точно! Эти результаты выглядят довольно странными, особенно при их сопоставлении. Фактически получается, что «осознание воли» требует 1 секунды, а чувственное восприятие или осознание — около половины секунды. Если вы считаете, что осознание есть нечто, приводящее к какому-то действию, то сталкиваетесь со следующим парадоксом. Вам требуется примерно полсекунды,

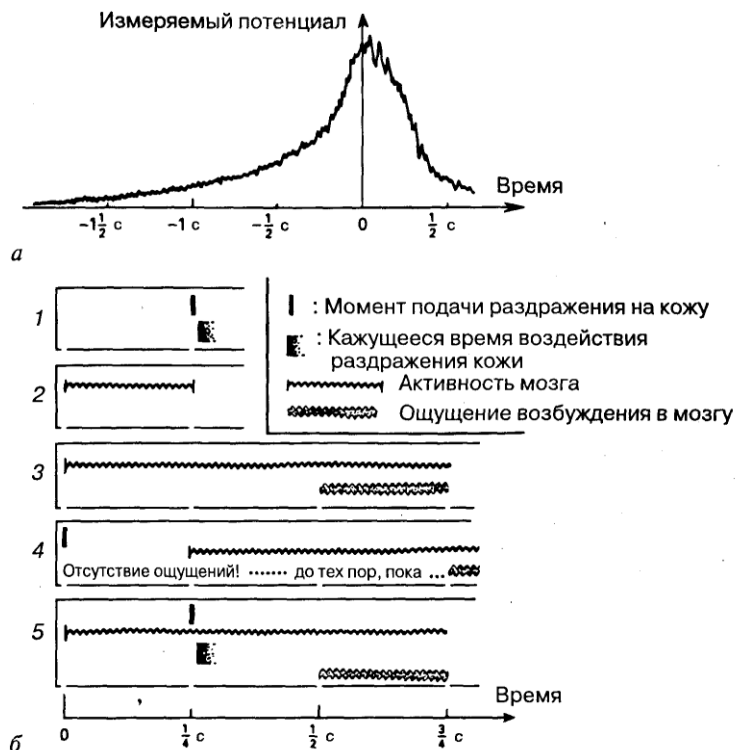
чтобы осознать некоторое событие. Затем вы должны заставить свое сознание реагировать и вам требуется примерно 1 секунда для принятия свободного решения по возникшей проблеме, т. е. весь процесс принятия осознанного и волевого решения займет около полутора секунд. Мне это представляется совершенно неправдоподобным! Даже с учетом очевидного факта, что большая часть многих разговоров происходит неосознанно и почти автоматически, срок в полторы секунды для *осознанного* ответа представляется очень длинным и странным!

Мне кажется, что в описанных экспериментах есть нечто, что неявно подразумевает и включает в себя основные представления классической физики. Вспомните предложенную выше задачу об испытании бомб, решение которой сначала кажется противоре-

135

Рис. 3.20.

a — результаты опытов Корнхубера, позднее модифицированных и повторенных Либетом и его группой. В момент $t = 0$ испытуемый принимает решение согнуть палец, однако предварительные сигналы (данные усреднены по многим испытаниям) показывают, что «предвиденье» намерения возникает в мозгу раньше; *б* — эксперименты группы Либета. *1* — испытуемому «кажется», что раздражение кожи совпадает по времени с истинным моментом подачи раздражающего сигнала; *2* — в кору мозга раздражение поступает на полсекунды раньше, чем истинный сигнал раздражения; *3* — в мозгу раздражение «обгоняет» сигнал истинного раздражения более чем на полсекунды; *4* — такое же раздражение в мозгу может обеспечить «обратную маскировку» ранее поданного раздражения кожи, демонстрируя, что это раздражение *якобы не происходит* одновременно с раздражением в мозгу; *5* — если реальное раздражение кожи осуществляется немного *позднее* сигнала в мозгу, то «кожное восприятие» сдвигается по времени назад в отличие от осознанного восприятия.



136

чащим фактам и здравому смыслу. Однако затем выяснилось, что противофазные события могут влиять на ситуацию даже тогда, когда они не происходят на самом деле. Обычная логика в таких случаях оказывается бессильной, если только ее не используют с особой осторожностью. При рассмотрении задач этого типа следует постоянно помнить о необычном поведении квантовых систем и об удивительных возможностях, связанных с квантовой нелокальностью и квантовой «противофактностью». Квантовую нелокальность очень трудно понять в рамках специальной теории относительности. Я твердо убежден, что ее удастся объяснить лишь после перехода к принципиально новой теории, которая не должна сводиться к незначительной модификации уже существующих построений. Новая теория должна отличаться от квантовой механики так же, как общая теория относительности отличается от ньютоновской теории

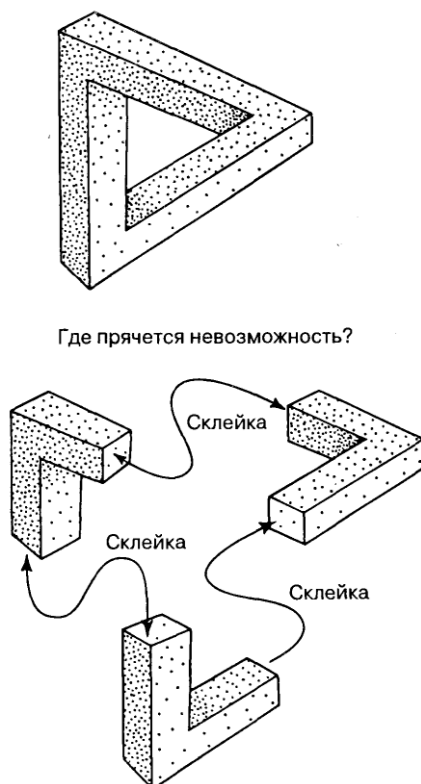
тяготения, т. е. представлять собой концептуально новую систему идей, в которую квантовая нелокальность должна входить естественным образом.

В гл. 2 я уже отмечал, что, хотя квантовая нелокальность является весьма необычным и даже загадочным эффектом, она может быть вполне адекватно описана математически. Я поясню свою мысль простой картинкой (рис. 3.21), на которой изображен так называемый «невозможный треугольник». Глядя на эту картинку, вы вправе спросить: «А где, собственно, скрыта невозможность?» Можно ли указать место локализации того, что мы называем невозможностью? Секрет изображения невозможного объекта в данном случае связан с тем, что стоит вам закрыть небольшой участок изображения (например, любой из углов), как рисунок становится вполне осмысленным и возможным, так что не следует даже искать ту его специфическую часть, которая содержит нечто невозможное. Невероятность или невозможность в этом случае — свойство всей структуры, рассматриваемой в качестве единого целого. Я подчеркиваю, однако, что такие объекты можно совершенно строго рассматривать с математической точки зрения. Среди прочего их можно разделять на части, склеивать эти части в ином порядке и делать какие-то конкретные математические выводы из детального анализа всего «склеенного» образца. Наиболее подходящим математическим понятием для описания предлагаемого объекта является *когомология*, которая позволяет нам даже вычислить «степень невозможности» этой фигуры. Именно такой тип нелокальной математики, возможно, требуется нам для развития новой физической теории.

137

Рис. 3.21. Невозможный треугольник.

Мы не можем указать на рисунке место, определяющее «невозможность» существования такой фигуры, но можем дать полное математическое описание объекта, исходя из «правил склейки» его деталей.



И наконец, явное сходство структуры рис. 3.21 и 3.3 вовсе не является случайным, поскольку на рис. 3.3 специально подчеркнут и выделен элемент парадоксальности. Действительно, изображенный механизм взаимодействия трех миров (когда каждый из миров почти полностью возникает из небольшой части другого) является странным и необычным, однако (как и в случае рис. 3.21) дальнейшее изучение может позволить нам получить хотя бы частичное решение общей проблемы. Важно лишь осознать и признать загадочность и странность некоторых явлений, таинственность и сложность которых вовсе не означают, что нам никогда не удастся понять их в будущем.

138

ЛИТЕРАТУРА

- Albrecht-Buehler, G. (1981) Does the geometric design of centrioles imply their function? *Cell Motility*, 1, 237-45.
- Albrecht-Buehler, G. (1991) Surface extensions of 3T3 cells towards distant infrared light sources, *J. Cell Biol.*, **114**, 493-502.
- Aspect, A., Grangier, P., and Roger, G. (1982). Experimental realization of Einstein—Podolsky—Rosen—Böhm *Gedankenexperiment*: a new violation of Bell's inequalities, *Phys. Rev. Lett.*, **48**, 91—4.
- Beckenstein, J. (1972) Black holes and the second law, *Lett. Nuovo Cim.*, **4**, 737-40.
- Bell, J. S. (1987) *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge).
- Bell, J. S. (1990) Against measurement, *Physics World*, 3, 33-40.
- Berger, R. (1966) The undecidability of the domino problem, *Memoirs Amer. Math. Soc.*, No. 66 (72 pp.).
- Böhm, D. and Hiley, B. (1994). *The Undivided Universe* (Routledge, London).
- Davenport, H. (1968) *The Higher Arithmetic*, 3rd edn. (Hutchinson's University Library, London).
- Deeke, L., Grötzing, B., and Kornhuber, H. H. (1976). Voluntary finger movements in man: cerebral potentials and theory, *Biol. Cybernetics*, 23, 99.
- Deutch, D. (1985) Quantum theory, the Church—Turing principle and the universal quantum computer, *Proc. Roy. Soc. (Lond.)*, **A400**, 97—117.
- DeWitt, B. S. and Graham, R. D., eds. (1973) *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. (Princeton University Press, Princeton).
- Diösi, L. (1989) Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations, *Phys. Rev.*, **A40**, 1165-74.
- Fröhlich, H. (1968). Long-range coherence and energy storage in biological systems, *Int. J. of Quantum. Chem.*, II, 641-9.
- Gell-Mann, M. and Hartle, J. B. (1993) Classical equations for quantum systems, *Phys. Rev.*, **D47**, 3345-82.
- Geroch, R. and Hartle, J. (1986) Computability and physical theories, *Found. Phys.*, 16, 533.
- Gödel, K. (1931) Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter System 1, *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38,173-98.
- Golomb, S.W. (1966) *Polyominoes* (Scribner and Sons, London).
- Haag, R. (1992) *Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras* (Springer-Verlag, Berlin).
- Hameroff, S.R. and Penrose, R. (1996). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules — a model for consciousness. In *Toward a Science of Consciousness: Contributions from the 1994 Tucson Conference*, eds, S. Hameroff, A. Kaszniak and A. Scott (MT Press, Cambridge MA).
- 139**
- Hameroff, S. R. and Penrose, R. (1996). Conscious events as orchestrated space-time selections. *J. Consciousness Studies*, 3, 36—53.
- Hameroff, S. R. and Watt, R. C. (1982). Information processing in microtubules, *J. Theor. Biol.*, **98**, 549-61.
- Hawking, S. W. (1975) Particle creation by black holes, *Comm. Math. Phys.*, **43**, 199-220.
- Hughston, L. P., Jozsa, R., and Wootters, W. K. (1993) A complete classification of quantum ensembles having a given density matrix, *Phys. Letters*, **A183**, 14-18.
- Károlyházy, F. (1966) Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies, *Nuovo Cim.*, **A42**, 390.
- Károlyházy, F. (1974) Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies, *Magyar Fizikai Polyoir Mat*, **12**, 24.
- Károlyházy, F., Frenkel, A. and Lukács, B. (1986) On the possible role of gravity on the reduction of the wave function. In *Quantum Concepts in Space and Time* eds. R. Penrose and C. J. Isham (Oxford University Press, Oxford) pp. 109-28.
- Kibble, T. W. B. (1981) Is a semi-classical theory of gravity viable? In *Quantum Gravity 2: A Second Oxford Symposium*; eds C. J. Isham, R. Penrose and D. W. Sciama (Oxford University Press, Oxford) pp. 63—80.
- Libet, B. (1992) The neural time-factor in perception, volition and free will, *Review de Metaphysique et de Morale*, **2**, 255—72.
- Libet, B., Wright, E.W. Jr. Feinstein, B. and Pearl, D.K. (1979) Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience, *Brain*, **102**, 193-224.
- Lockwood, M. (1989) *Mind, Brain and the Quantum* (Basil Blackwell, Oxford).
- Lucas, J. R. (1961) Minds, Machines and Gödel, *Philosophy*, 36,120-4; reprinted in Alan Ross Anderson (1964) *Minds and Machines* (Prentice-Hall, New Jersey).
- Majorana, E. (1932) Atomi orientati in campo magnetico variabile, *Nuovo Cimento*, **9**, 43-50.
- Moravec, H. (1988) *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence* (Harvard University Press, Cambridge, MA).
- Omnes, R. (1992) Consistent interpretations of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.*, **64**, 339-82.
- Pearle, P. (1989) Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localisation, *Phys. Rev.*, **A39**, 2277—89. Penrose, R. (1989) *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (Oxford University Press, Oxford). Penrose, R. (1989) Difficulties with inflationary cosmology, in *Proceedings of the 14th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*, ed. E. Fenves, *Annals of NY Acad. Sci.*, **571**, 249 (NY Acad. Science, New York). Penrose, R. (1991) On the cohomology of impossible figures [La cohomologie des figures impossibles], *Structural Topology [Topologie structurale]*, 17, 11-16.
- 140**
- Penrose, R. (1994) *Shadows of the Mind: An Approach to the Missing Science of Consciousness* (Oxford University Press, Oxford).
- Penrose, R. (1996) On gravity's role in quantum state reduction, *Gen. Rel. Crav.*, **28**, 581.
- Percival, I. C. (1995) Quantum spacetime fluctuations and primary state diffusion, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A451**, 503-13.
- Schrödinger, E. (1935) Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Naturwissenschaften*, **23**, 807-12, 823-8, 844-9. (Translation by J. T. Trimmer (1980) in *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **124**, 323-38).
- Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

- Schrödinger, E. (1935) Probability relations between separated systems, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 31, 555-63.
- Searle, J.R. (1980) Minds, Brains and Programs, in *The Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 3 (Cambridge University Press, Cambridge).
- Seymore, J. and Norwood, D. (1993) A game for life, *New Scientist*, **139**, No. 1889, 23-6.
- Squires, E. (1990) On an alleged proof of the quantum probability law, *Phys. Lett.*, **A145**, 67-8.
- Turing, A. M. (1937) On computable numbers with an application to the Entscheidungsproblem, *Proc. Lond. Math. Soc. (ser. 2)*, **42**, 230-65; a correction, **43**, 544-6.
- Turing, A. M. (1939) Systems of logic based on ordinals, *P. Lond. Math. Soc.*, 45, 161-228.
- von Neumann, J. (1955) *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton University Press, Princeton).
- Wigner, E. P. (1960) The unreasonable effectiveness of mathematics in the physical sciences, *Commun. Pure Appl. Math.*, **13**, 1—14 (имеется перевод: Е. Вигнер. Этюды о симметрии. М.: — Мир, 1971; «Непостижимая эффективность математики в естественных науках», с. 182).
- Zurek, W. H. (1991) Decoherence and the transition from quantum to classical, *Physics Today*, **44** (No. 10), 36-44.

Глава 4. О мышлении, квантовой механике и актуализации возможностей. Абнер Шимони



ВВЕДЕНИЕ

Я всегда восхищался общим настроением и духом исследований Роджера Пенроуза, в которых строгая наука сочетается со страстным желанием познать природу вещей. В своем творчестве он следует возвышенному призыву Гильберта: «Мы должны знать, и мы будем знать» [1]. Что касается постановки проблем, то я полностью согласен с автором в формулировке трех его основных тезисов: во-первых, проблема мышления может изучаться научными методами; во-вторых, квантовомеханические идеи каким-то образом соотносятся с классической философской проблемой связи души и тела; и, в-третьих, квантовомеханическая проблема актуализации возможностей действительно относится к чистой физике и требует для своего разрешения модификации существующего формализма квантовой механики. Однако мое согласие с автором ограничивается только этими формулировками. Я скептически отношусь к доводам, выдвигаемым Пенроузом в защиту указанных тезисов, и надеюсь, что моя критика будет учтена им в дальнейших исследованиях.

4.1. О РОЛИ И МЕСТЕ МЫШЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ

Приблизительно четверть объема трех первых глав этой книги и добрая половина предыдущей книги Пенроуза «Тени разума» (ниже я буду обозначать ее просто аббревиатурой TP) посвяще-

ны доказательствам неалгоритмической природы математических способностей человеческого мозга. В рецензии Хилари Патнам [2] на книгу TP уже подчеркивалось, что в доводах Пенроуза имеются явные пробелы. В частности, он не рассматривает возможность существования такой машины Тьюринга, которая может моделировать математические способности человека, но одновременно является настолько сложной, что человеческое сознание не может ее понять. Мне не показался убедительным ответ Пенроуза [3] на эту рецензию, хотя, должен сознаться, я не настолько знаком с так называемой теорией доказательств математической логики, чтобы судить о дискуссии с полной уверенностью. Однако мне кажется, что обсуждаемые доводы имеют прямое отношение к основной идее Роджера, так что, возможно, как говорят альпинисты, «он лезет не на ту вершину». Его основная идея состоит в том, что мысленные операции содержат нечто, недоступное для любого искусственного разума (т. е. любого компьютера, созданного человеком), но она оказывается несвязанной с предположением о неалгоритмическом характере математической деятельности человека. Интересно, что в TP Пенроуз не только подробно изложил

доводы Гёделя, но и добавил две страницы (ТР, с. 40-41) аргументов, почерпнутых из известной книги Джона Сирла *Chinese room* («Китайская комната»), доказывающих, что безупречная работа вычислительного автомата не «создает» понимания. Сущность доводов Сирла состоит в том, что человека подобно автомату вполне можно обучить повиноваться акустическим командам (подаваемым, например, на китайском языке, которым этот человек не владеет). Выполняя правильные вычисления по командам на незнакомом языке, человек может получить опыт работы в качестве автомата и сравнить его с нормальными ощущениями при вычислениях с пониманием их смысла. При этом не имеет никакого значения характер самих выполняемых математических действий (они могут быть, например, совершенно тривиальными) — разница между механическим вычислением и пониманием работы представляется очевидной.

Сирл доказывает (а Пенроуз подтверждает эту мысль), что математическое понимание применимо и к другим аспектам интеллектуального и психического опыта человека, например к сенсорному восприятию, чувству боли и удовольствия, ощущению желания и даже к интенциям (т. е. к направленности сознания, которая, в сущности, может быть сведена к переработанному опыту общения с реальными или воображаемыми объекта-

143

ми). В философском подходе, основанном на физическом описании мира (его обычно называют физикализмом), выработаны различные стратегии исследования таких явлений [4]. В так называемых двухаспектных теориях психический опыт связан со специфическими состояниями мозга, а в некоторых других теориях — с набором состояний мозга. При этом рассматриваемый класс состояний является настолько «хрупким», что его описание нельзя получить прямыми физическими экспериментами, вследствие чего необходима какая-то «редукция» психических и интеллектуальных понятий в физические. В теориях, основанных на функционализме, психические состояния идентифицируются с формальными программами, которые могут быть реализованы различными физическими системами, включая нейронные сети мозга (возможно, вследствие случайного стечения обстоятельств). Существующие физикалистские теории основаны главным образом на упомянутых двухаспектных подходах, характеризующихся тем, что в них некие сущности (обладающие одним набором свойств) считаются идентичными другим сущностям (обладающим совершенно другим набором свойств). Описание таких систем включает в себя разнообразные сенсорные модальности, а в некоторых случаях — одновременно сенсорные и микрофизические модальности. Обычно рассмотрение таких систем далее сводится к отождествлению ментальных состояний с конкретными состояниями мозга (либо с классом таких состояний или с определенной программой). Я думаю, что именно в этом переходе состоит серьезная ошибка всех указанных подходов. Идентифицируя один объект (характеризующийся некоторой сенсорной модальностью) с другим объектом (характеризующимся другой модальностью), мы «тайком» связываем две причинно-следственные цепочки. Мы имеем два соединения цепочек (одна пара на едином объекте, вторая — где-то в «театре сознания» воспринимающего субъекта), однако нельзя забывать, что они имеют совершенно разные причинно-следственные связи с окружением, а также с сенсорным и мыслительным аппаратом воспринимающего субъекта. Если состояния мозга и воспринимающего сознания действительно идентичны, то физикализм двухаспектного подхода вполне оправдан. В этом случае общий объект является завершением указанных цепочек, и состояние мозга получает необходимое онтологическое преимущество в физическом описании (что и является основным принципом физикализма). Однако при этом другой конец це-

144

почки («театр сознания» воспринимающего субъекта) фактически отсутствует. Можно даже считать, что двухаспектная теория построена на всеобщей молчаливой «договоренности» или условности (аналогично тому, как действие в обычном театре построено на договоренности относительно наличия некой комбинации физических и духовных обстоятельств), однако такой «театр» не может быть введен независимым образом в теории, основанные на физикализме.

Еще один довод против физикализма основан на философской идее, которую я называю феноменологическим принципом (я буду рад, если кто-то предложит или найдет в литературе более подходящее название), в соответствии с которым любая онтология, признаваемая последовательной и ясной философской системой, должна «нести ответственность за свои утверждения», из чего сразу следует, что физикализм является непоследовательной теорией. В онтологии физикалистов можно постулировать онтологическую иерархию (обычно именно это и происходит), где низший, или фундаментальный, уровень содержит элементарные частицы или

соответствующие поля, а более высокие уровни — объекты (сущности) из комбинаций элементов низших уровней. Такие комбинации могут быть охарактеризованы двумя методами (названия которых берутся из статистической физики): мелкозернистым описанием, дающим детальную картину микросостояния, или крупнозернистым описанием, при котором усредняются или интегрируются свойства, получаемые при мелкозернистом разбиении. Кроме этого существуют и так называемые смешанные (относительные) описания, зависящие от конкретного типа комбинированных элементов (или составленных из них систем), участвующих в процессе восприятия. Проблема связана с тем, как в эту концепцию могут вписываться чувственные (сенсорные) восприятия. Они могут быть согласованы с мелкозернистым описанием только при условии, что ментальные свойства «скрыты» в каких-то фундаментальных основах физики, что явно противоречит общей программе физикализма. С другой стороны, их нельзя «вписать» и в крупнозернистое описание без введения какого-либо искусственного приема типа двухаспектной теории (о недостатках которой я говорил в предыдущем разделе). И наконец, чувственные восприятия не могут быть связаны и с относительными описаниями, если только между объектом и воспринимающим субъектом не существует причинно-следственной зависимости. Таким образом, чувст-

145

венные восприятия никак не вписываются в онтологию физикализма.

Предложенные выше доводы могут показаться «простодушными», но их трудно опровергнуть именно вследствие простоты и «здравомыслия». Помимо этого существует и ряд других, достаточно сложных и серьезных аргументов, относящихся к философской несостоятельности онтологии физикализма. Первое возражение связано с тем, что у нас нет никаких доказательств существования какой-нибудь ментальности вне высокоразвитых нервных систем, на что, кстати, указывал ранее и сам Пенроуз: «Если понятие, называемое мышлением, является чем-то внешним по отношению к физическому телу, то совершенно непонятно, почему все его атрибуты столь тесно связаны со свойствами физического мозга» (ТР, с. 350). Второе важное возражение заключается в том, что мы имеем огромный фактический материал, неоспоримо доказывающий, что сами нервные структуры являются продуктом эволюции, которая начинается с примитивных организмов, лишенных таких структур. Строго говоря, если справедлива теория так называемой пребиотической эволюции, то генеалогия нервной системы может быть доведена до неорганических молекул и атомов (фундаментальная физика не может, конечно, приписывать неорганическому веществу на этом уровне какие-либо свойства, связанные с сознанием).

Примером онтологии ментализма, в котором учтены все три рассмотренных довода, может служить «философия организма», предложенная Уайтхедом [5], который считал своим предшественником Лейбница с его теорией монад (монадологией). В философии Уайтхеда конечными сущностями выступают «актуальные события», представляющие собой не объекты, а пространственно-временные «кванты» (обычно на очень низком уровне), обладающие ментальными или психическими характеристиками типа «опыт», «субъективное сознание» или «склонность». Значения этих понятий выводятся из характеристик ментальности более высоких уровней, которые мы познаем интроспективно (путем самоанализа или самонаблюдения), однако в крайне приблизительной или экстраполированной форме. Физические элементарные частицы, которые Уайтхед рассматривал в качестве временной цепочки событий, могут быть в этой схеме почти точно описаны понятиями обычной физики, поскольку «жизненный опыт» частиц является крайне скудным, смутным, однообразным и монотонным. Однако даже при опи-

146

сание таких частиц небольшая часть информации все же теряется, так как «понятие физической энергии, являющееся основой современной физики, должно рассматриваться лишь как часть более общего понятия составной или сложной энергии (эмоциональной и целенаправленной и способной к конечному синтезу в субъективной форме), которая и проявляет себя в каждом завершенном событии» [6]. Эволюция высокоразвитых сообществ таких «событий» позволяет примитивным зачаткам разума развиваться, превращаясь в интенсивный, согласованный и полностью осознающий себя разум: «Неорганическая материя продолжает функционировать независимым образом и внутри живых организмов. Кажется, что именно за счет координации таких функций и внешнего проявления внутренних завершенных событий достигается наблюдаемое разумное поведение живых организмов» [7].

Фамилии Уайтхеда нет в авторском указателе ТР, а в другой книге Пенроуза *The Emperor's New Mind* («Новый разум короля») [8] она упоминается лишь один раз в связи со ссылкой на известную

книгу Рассела и Уайтхеда *Principia Mathematica*. Я не знаю точно, почему Роджер не ссылается на идеи Уайтхеда, однако у меня есть некоторые соображения на этот счет. Выдвигая свою онтологию ментальности, Уайтхед хотел преодолеть «бифуркацию природы», ее расщепление на лишенный мысли и смысла мир физики и осознающий себя мир высокоорганизованных уровней материи. В соответствии с его основной теорией протоментальность на низших уровнях стремится посредством любых «событий» проявить себя и преодолеть чудовищную пропасть между уровнями. Но разве в этом случае не сохраняется огромный разрыв между примитивной ментальностью элементарных частиц и самосознанием высокоорганизованной материи в виде человеческих существ? А разве у нас есть хоть какие-нибудь прямые свидетельства наличия предполагаемой протоментальности на низших уровнях? Должны ли мы постулировать ее возможность лишь для того, чтобы объяснить «непрерывность» развития мыслительных форм Вселенной от начального состояния до появления разумных существ? Если же постулат вводится только для этого, то не является ли использование морфемы «ментальность» в слове «протоментальность» просто лингвистической двусмысленностью? Не превращается ли при этом вся описываемая философская система в семантический фокус, сводящийся к тому, что формулировка проблемы объявляется ее решением? Более того, концепцию актуальных событий (выступающих в

147

качестве предельных сущностей Вселенной) можно, конечно, рассматривать в качестве еще одной атомистической теории мироздания (кстати, гораздо более убедительной и выразительной, чем теории Демокрита или Гассенди), однако неясно, совмещается ли она с целостной (холистической) теорией сознания лучше, чем другие существующие представления?

В следующем разделе я попробую частично ответить на поставленные вопросы и сформулировать в общих чертах модернизированный «уайтхедизм» [9], основанный на квантовомеханических представлениях.

4.2. ПРИМЕНИМОСТЬ ИДЕЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ К ПРОБЛЕМЕ СВЯЗИ СОЗНАНИЯ И ТЕЛА

Одна из основных идей квантовой механики состоит в том, что комплексное состояние системы (которое соответствует ее максимально полному описанию) не исчерпывается списком реальных (актуальных) характеристик системы, но включает в себя ее некоторые потенциальные возможности и характеристики. Если свойство A и вектор состояний Φ квантовой системы определены (для простоты описания мы примем, что все функции нормированы на единицу), то Φ можно записать в виде $\sum_i c_i u_i$, где каждая из функций u_i представляет собой нормированный на единицу вектор состояния (в котором свойство A имеет значение a_i), а c_i — комплексные числа, удовлетворяющие условию $|c_i|^2 = 1$. Таким образом, вектор Φ записан в виде суперпозиции функций u_i с соответствующими весами и (поскольку в сумму входят лишь одиночные члены этого вида) значение свойства A в описываемом состоянии a_i остается неопределенным. При реалистической трактовке понятия квантового состояния (т. е. если оно рассматривается как представление системы, а не просто как набор ее описаний) эта неопределенность становится объективной и очевидной (я предполагаю, что квантовое описание является полным, и не рассматриваю проблему так называемых «скрытых параметров»). Кроме того, если взаимодействие с окружением делает систему определенной (например, таким взаимодействием выступает процесс измерений), то результат имеет вид объективной случайности, а экспериментатор «на выходе» получает соответствующий набор объективных вероятностей типа $|c_i|^2$. Объективная неопределенность, объективная случайность и объективная вероят-

148

ность являются отличительными особенностями квантового состояния и заставляют рассматривать его в качестве набора потенциальных возможностей.

Еще одной важной особенностью квантовой механики выступает наличие запутанности. Если u_i являются нормированными на единицу векторами состояний системы 1 (с некоторым значением свойства A в этих состояниях), а v_j — векторами состояний системы 2 (с некоторым значением свойства B), то вектор состояний $X = \sum_i c_i u_i v_i$ (где сумма $|c_i|^2$ нормирована на единицу) описывает смешанную систему (1 + 2) с особыми свойствами. Дело в том, что ни одна из систем 1 и 2 уже не находится в «чистом» квантовом состоянии. В частности, система 1 уже не описывается суперпозицией функций u_i , а система 2 — суперпозицией функций v_j , поскольку эти суперпозиции

не включают в себя корреляции между u_i и v_i . Следовательно, состояние X должно рассматриваться как некоторое целостное состояние, называемое запутанным, в результате чего в квантовой механике возникает новый тип составного, или смешанного, состояния, не имеющий аналогов в классической физике. Если в процессе актуализируется свойство A (например, со значением a_j), то автоматически актуализируется и свойство B (со значением b_j), т. е. вследствие запутанности состояний потенциальные возможности систем 1 и 2 актуализируются только совместно (попарно).

Модернизированный уайтхедизм, о котором я кратко упомянул в конце предыдущего раздела, учитывает потенциальные возможности и запутанность квантовых состояний довольно своеобразным путем. Потенциальные возможности рассматриваются в качестве «средства», позволяющего преодолеть «пропасть» между миром материи (обладающей только зачатками сознания, протоментальностью) и миром высокоразвитого сознания. Даже крупные организмы со сложным мозгом могут не обладать сознанием, поэтому переход между сознанием и бессознательностью должен рассматриваться не в качестве онтологического перехода, а как изменение состояния, при котором осуществляется преобразование свойств от определенности к неопределенности, и наоборот. В случае простой системы (типа электрона) такой переход можно рассматривать как трансформацию «полной неопределенности» в «слабое мерцание разума». Именно на этом этапе приобретает особое значение концепция запутанности состояний. В системе из многих тел запутанность состояний создает значительно более богатые возможности для проявления наблюдаемых свойств, чем в случае отдельной час-

149

тицы. Спектр наблюдаемых «коллективных» свойств смешанной системы оказывается значительно шире, чем у составляющих ее частиц. Вследствие квантовой запутанности элементарных систем (каждая из которых обладает лишь очень небольшим набором ментальных свойств) составная система проявляет весьма широкий спектр свойств, что позволяет материи постепенно пройти весь путь развития от полной бессознательности до высокоразвитого сознания.

Естественно возникает вопрос о том, каким образом модернизированный уайтхедизм может быть связан с идеями Пенроуза о квантовом состоянии систем многих тел. Обе упомянутые концепции (наличие потенциальных возможностей и существование квантовой запутанности состояний) широко используются Пенроузом при рассмотрении многих вопросов (гл. 2 и 3 данной книги, а также гл. 7 в ТР). Проявление потенциальных возможностей может быть напрямую связано с его предположением о «квантовых вычислениях», осуществляемых нейронной системой таким образом, что каждая «ветвь» суперпозиции осуществляет вычисления независимо от других (см. ТР, с. 355-6). Запутанность (которую Пенроуз предпочитает называть когеренцией) предположительно тоже играет важную роль на многих стадиях таких вычислений. В частности, предполагается, что микротрубки на границах клеток играют организующую роль в работе нейронов, для чего автор даже специально постулирует наличие запутанных состояний в микротрубках (ТР, с. 364-5). Предполагается также, что запутанные состояния присутствуют не только в микротрубках отдельных нейронов, но и в предполагаемом конечном состоянии ансамбля нейронов. Крупномасштабная необходимость существенно важна для идей Пенроуза, поскольку «отдельное сознание может возникать только в случае, когда какая-то квантовая когеренция существует в некоторой части мозга» (ТР, с. 372). Пенроуз считает, что эта идея вполне разумна в свете последних открытий в области сверхпроводимости и сверхтекучести, среди которых можно выделить последние достижения в высокотемпературной сверхпроводимости и расчеты Фрелиха, подтверждающие возможность наличия крупномасштабных запутанностей в биологических системах при обычных температурах (ТР, с. 367-8). Еще одна идея Пенроуза связана даже не с современной квантовой механикой, а с ее предполагаемым будущим вариантом, некоторые черты которого он пытается предсказать (этот вопрос рассматривается подробнее ниже, в

150

разд. 4.3). Идея заключается в том, что объективная редукция суперпозиции состояний (обозначаемая аббревиатурой OR) позволяет отбирать актуальное значение некоторой переменной A из широкого набора возможных значений. Такая актуализация существенно необходима для объяснения нашей несомненной способности к восприятию определенных чувственных и мыслительных процессов. Аналогичная актуализация необходима даже в предполагаемых Пенроузом квантовых вычислениях, так как после завершения параллельных расчетов в различных ветвях суперпозиции полученный результат должен быть каким-то образом прочитан (ТР, с. 356). И наконец, упомянутая выше операция OR является ключевой в предлагаемой

автором «невычислимой» схеме мыслительной деятельности.

В своих теориях Пенроуз не использует (намеренно или по невнимательности) одну из важнейших идей упомянутого мною модернизированного уайтхедизма, а именно: предположение о том, что ментальность является онтологически фундаментальным свойством Вселенной. Подход Пенроуза подозрительно напоминает квантовую версию физикализма (о нем я говорил выше, в разд. 4.1), в которой мыслительные способности рассматриваются как структурные свойства состояний мозга или как вычислительные программы нейронных ансамблей. Пенроуз вводит новые ингредиенты в программу физического (или физикалистского) обоснования ментальности, а именно: крупномасштабную квантовую когеренцию и возможную модификацию квантовой динамики, для учета редукции суперпозиций. Однако эти «ухищрения» вовсе недостаточны для серьезного ответа на несколько наивные и простые возражения против физикализма, предложенные выше в разд. 4.1. Проявления нашей умственной деятельности не «укладываются» в онтологию физикализма, даже если физикализм основан на квантовой механике. Предложенная Уайтхедом философия организма на самом деле является принципиально нефизикалистской, поскольку в ней ментальные свойства приписываются всем (даже самым элементарным) объектам Вселенной, что значительно расширяет и обогащает возможности физического описания таких объектов. В модернизированной версии уайтхедизма, предложенной мною выше, квантовая механика используется не в качестве «суррогатной» базы обоснования онтологии ментальности, а лишь как некий интеллектуальный инструмент, позволяющий рассматривать всю гамму проявлений ментальности, от полной бессозна-

151

тельности элементарных частиц до развитого сознания высших организмов.

Противоречивость позиций может быть сформулирована и другим образом. Квантовая теория содержит в себе некий набор понятий (таких, как состояние, наблюдаемая величина, суперпозиция, вероятность перехода и запутанность состояний). Физикалисты успешно используют этот набор в двух совершенно разных онтологиях — онтологии частиц в обычной, нерелятивистской квантовой механике (описание электронов, атомов, молекул и кристаллов) и онтологии физических полей (квантовая электродинамика, хромодинамика и общая квантовая теория поля). Затем физикалисты просто принимают на веру, что квантовая теория может быть применима и к онтологиям совершенно иного типа, таким как онтология мозга, дуальная онтология или онтология элементов и сущностей, обладающих протоментальностью. Обычно физикалисты очень успешно применяют квантовую механику для описания явлений в сложных системах (включая макроскопические) микрофизическими понятиями и характеристиками. Мне кажется, что Пенроуз осуществляет похожую операцию, изящно используя квантовые представления для описания ментальных явлений в рамках физикалистской онтологии. В отличие от этого подхода модернизированный уайтхедизм использует аппарат квантовой теории для онтологии, которая обладает ментальностью *ab initio* {лат. — с самого начала}. Поэтому такой модернизированный уайтхедизм выглядит зачаточной, импрессионистской концепцией, предназначенной для чисто теоретических рассуждений или для экспериментальной проверки утверждений, которые могут стать «верительными грамотами» будущей, более общей теории. Важнейшим преимуществом уайтхедизма перед всеми другими формами физикализма является то, что ментальность первична и «невыводима» из других понятий. Возможно, впрочем, что я недостаточно или неверно понял аргументацию Роджера, и он на самом деле является в большей степени «тайным уайтхедистом», чем мне кажется. В любом случае можно только пожелать, чтобы он представлял свою позицию более подробно и четко.

Если когда-нибудь модифицированная версия уайтхедизма (или любая другая квантовая теория сознания) действительно станет зрелой и единой научной дисциплиной, мы должны будем всерьез заняться психологическими явлениями. Дело в том, что ряд психологических эффектов явно имеет «квантовый при-

152

вкус». В качестве примеров можно привести переходы от периферического к фокальному зрению, переходы между сознательным и бессознательным состояниями, «распространение» сознания на тело в целом, возникновение намерений и желаний, аномалии во временных характеристиках психических явлений и, наконец, даже странные совпадения и неоднозначности в символике фрейдовского психоанализа. В некоторых серьезных исследованиях (например, в книгах Локвуда [10] и Стаппа [11]) специально исследуются проблемы взаимосвязи квантовой теории с такими психологическими явлениями. Пенроуз и сам рассматривает некоторые такие

проблемы при обсуждении, например, экспериментов Корнхубера и Либета по активному и пассивному механизмам сознания (см. также TP, с. 385-7).

Реальное применение квантовомеханических подходов к исследованиям мозга потребует также изучения математической структуры пространства психических состояний и множества наблюдаемых переменных. Ранее этим структурам уделялось явно недостаточное внимание, например, в стандартной квантовой механике и квантовой теории поля их определяют самым разным образом, используя представления пространственно-временных групп, эвристические оценки (основанные на классической механике и классической теории поля) или экспериментальные измерения. Эрвин Шредингер (в одной из статей знаменитого цикла 1926 г. по волновой механике) предложил замечательную и исключительно плодотворную аналогию — геометрическая оптика соотносится с волновой оптикой так, как механика частиц соотносится с гипотетической волновой механикой. Было бы интересно продолжить эту аналогию в следующей форме — не относится ли классическая физика к квантовой так, как классическая психология относится к гипотетической квантовой психологии? Использование этой интересной аналогии значительно осложняется тем, что «структуры классической психологии» мы представляем себе гораздо хуже, чем структуры классической механики.

Я рискну высказать еще одну идею. Предположим, что квантовые понятия действительно можно использовать в психологии, но соответствующие этому подходу геометрические структуры значительно отличаются от привычных. Можно представить себе пространство состояний мозга, но должно ли оно иметь знакомую нам структуру проективного пространства Гильберта? В частности, должно ли быть определено в этом пространстве внутреннее произведение двух психических состоя-

153

ний, соответствующее вероятности перехода между ними? Не обнаружатся ли в природе структуры «слабее» квантовых? В очень интересных работах Миелника [12] предлагается некая минимальная квантовая концепция, в рамках которой «смешанные» состояния могут быть выражены различными методами через так называемые выпуклые сочетания чистых состояний (в отличие от классической статистической механики, где смешанные состояния могут быть определены через чистые одним-единственным образом). В качестве примера возможного использования идей Миелника можно привести феноменологию цветового восприятия, поскольку известно, что создать «восприятие» белого цвета удастся несколькими комбинациями различным образом окрашенных световых лучей.

4.3. ПРОБЛЕМА АКТУАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

В гл. 2 Роджер Пенроуз отнес проблему актуализации потенциальных возможностей (называемую также проблемой редукции волнового пакета и проблемой измерения) к классу *X*-тайн, которые нельзя раскрыть без решительной ломки всей существующей теории (этим *X*-тайны отличаются от *Z*-тайн, из которых «дьявол таинственности» может быть изгнан привычкой к сосуществованию или известными заклинаниями). В этом вопросе я целиком согласен с Пенроузом. Если квантовая теория действительно описывает некоторую физическую систему, то это означает наличие параметров (наблюдаемых величин), которые в данном состоянии объективно не определены, но могут быть определены проведением соответствующих измерений. Однако линейная динамика квантовой механики препятствует актуализации при измерении, поскольку из-за линейности сложной системы (измерительный прибор + объект измерения) ее конечное состояние представляет собой суперпозицию условий, при которых «стрелка прибора» может указывать на разные значения. Поэтому я разделяю скептицизм Роджера относительно любых попыток раскрыть эту тайну за счет, например, так называемой «многомировой» концепции, декогеренции, скрытых параметров и т. п. Во всех этих подходах на какой-то стадии измерительного процесса унитарная эволюция квантового состояния нарушается, в результате чего и осуществляется актуализация вероятностей.

154

Вопрос заключается лишь в том, на какой стадии измерения это происходит, поскольку существует много вариантов актуализации. Например, она может происходить на физической стадии из-за того, что макроскопическая система «запутана» с микроскопическим объектом или пространственно-временная метрика «запутана» с материальной системой. С другой стороны, возможна актуализация на ментальной стадии, происходящая в *psyche** наблюдателя. Пенроуз

Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

считает актуализацию физическим процессом, происходящим вследствие нестабильности суперпозиции двух (или большего числа) состояний пространственно-временной метрики. При этом он полагает, что чем больше разница в энергии состояний, составляющих суперпозицию, тем короче время ее жизни (ТР, с. 339-346). Однако это предположение очень трудно совместить с другим утверждением, в соответствии с которым в сознании «учитывается» актуальный опыт. Суперпозиция состояний мозга, как отмечалось выше, нужна автору для объяснения глобальности сознания, однако существование суперпозиций, соответствующих, например, восприятию отдельных цветов (различению зеленых или красных световых сигналов), представляется нелепым или весьма маловероятным. Очень осторожно и сдержанно Пенроуз пытается доказать читателю, что разность энергий таких состояний мозга может быть достаточно велика, чтобы время существования суперпозиции было незначительным. Однако в своих рассуждениях он неоднократно попадает в ситуацию, когда когеренция одновременно должна сохраняться (для обеспечения глобальности сознания) и разрушаться (для учета конкретных актов сознания). В этих случаях автору, по его собственному признанию (см. ТР, с. 409, 410, 419, 342—3), приходится «балансировать на канате», однако его объяснения недостаточно убедительны, и вопросы взаимодействия мозга и сознания в обычных условиях остаются совершенно неясными.

В принципе квантовая динамика содержит много других, никем не рассмотренных возможностей введения объективной актуализации. Я отмечу лишь две из них, представляющиеся мне особо интересными. Пенроуз очень убедительно раскритиковал (ТР, с. 344) модель спонтанной редукции Джирарди—Римини—Вебера, однако она содержит и варианты, не учтенные его

* *Psyche* — символ души в греческой мифологии. — *Прим. перев.*

155

критикой. Еще одна возможность (о которой Пенроуз даже не упомянул) связана с возможным наличием в природе «правил суперотбора», препятствующих суперпозиции различных изомеров или конформаций макромолекул. Однако такая возможность очень важна, поскольку именно макромолекулы обычно осуществляют «переключение процессов» в клетках, направляя или прекращая их в соответствии с определенной структурой макромолекул. При суперпозиции двух различных конформаций в клетке постоянно возникал бы «клеточный аналог» кота Шредингера, и процессы попадали бы в некое «чистилище» (между сбывшимся и несбывшимся). Однако если в природе существует какое-то правило суперотбора, запрещающее такие суперпозиции, то процессы будут идти нормально. Правда, при этом возникают вопросы о том, почему природа запрещает суперпозицию состояний сложных молекул (каждое из которых по отдельности разрешено!), и где, собственно, проходит граница, соответствующая такому запрету. Однако наличие таких правил могло бы играть важнейшую роль в решении проблемы актуализации возможностей в наиболее вероятных ситуациях, а также создать условия экспериментального изучения соответствующих процессов, например, методами молекулярной спектроскопии [13].

И наконец, я хотел бы отметить, что уайтхедовская идея о том, что актуализация возможностей достигается в *psyche* воспринимающего субъекта, вовсе не является столь нелепой, антропоцентрической, мистической и ненаучной, как это кажется на первый взгляд. Уайтхед считал, что нечто, подобное ментальности, пронизывает всю природу, однако высокоорганизованное сознание возникает случайным образом при эволюции особых, «благоприятных» комплексов событий. Способность какой-либо системы к актуализации содержащихся в ней возможностей (посредством некоторой модификации линейной динамики квантовой механики) существует в природе, но осуществляется в заметной степени лишь в системах с очень высоким уровнем ментальности. Я бы назвал это утверждение принципом умеренности, отметив особо, что способность редуцировать суперпозиции в *psyche* серьезно проявляется лишь тогда, когда ее использование не только тщательно проверено на целом ряде психологических явлений, но и представляет собой единственный способ доведения гипотезы до уровня убедительной экспериментальной проверки.

156

ПРИМЕЧАНИЯ

1. На могиле Гильберта написано: «Мы должны знать, и мы будем знать». См. Constance Reid (1970). *Hilbert*, p. 220 (New York: Springer-Verlag).
2. Hilary Putnam (1994) Review of *Shadows of the Mind*. *The New York Times Book Review*, Nov. 20 1994, p. 1.
3. Roger Penrose (1994) Letter to *The New York Times Book Review*, Dec. 18 1994, p. 39.

4. Ned Block (1980) *Readings in Philosophy of Psychology*, Volume 1, Parts 2 and 3 (Harvard University Press, Cambridge, MA).
5. Alfred North Whitehead (1933) *Adventures of Ideas* (Macmillan, London) (1929); *Process of Reality* (Macmillan, London).
6. A. N. Whitehead, *Adventures of Ideas*. Chapter 11, Section 17.
7. Там же, Chapter 13, Section 6.
8. Roger Penrose (1989) *The Emperor's New Mind* (Oxford University Press, Oxford).
9. Abner Shimony (1965) 'Quantum physics and the philosophy of Whitehead', in Max Black (ed.), *Philosophy in America* (George Allen & Unwin, London): reprinted in A. Shimony (1993). *Search for a Naturalistic World View*, Volume 2, pp. 291-309 (Cambridge University Press, Cambridge); Shimon Malin (1988). A Whiteheadian approach to Bell's correlations, *Foundations of Physics*, 18, 1035.
10. M. Lockwood (1989) *Mind, Brain and the Quantum*. (Blackwell, Oxford).
11. Henry P. Stapp (1993) *Mind, Matter and Quantum Mechanics* (Springer-Verlag, Berlin).
12. Bogdan Mielnik (1974) Generalized quantum mechanics, *Communications in Mathematical Physics*, 37, 221.
13. Martin Quack (1989) Structure and dynamics of chiral molecules, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 28, 571.

Глава 5. Почему именно физика? Нэнси Картрайт

Я помню обсуждение книги Роджера Пенроуза «Тени разума» на совместных семинарах по теме «Философия: наука или теология» LSE (Лондонской школы экономики и политики) и Кингз Колледжа в Лондоне, и поэтому мне хочется начать с вопроса, который я еще тогда задала одному из участников семинара: «Почему, собственно, Пенроуз считает, что поиски ответов на вопросы, связанные с мышлением и сознанием, следует искать в физике, а не в биологии?» Насколько я помню, доводы Пенроуза можно разбить на три основные группы.

1. Мы, физики, разработали весьма многообещающую программу исследований в этом направлении. Такой довод, безусловно, является весьма весомым при обсуждении проектов подобного класса. Действительно, любой позитивист (к которым я отношу и себя) готов сразу прекратить метафизические и трансцендентальные споры, если перед ним возникает конкретная программа действий. Степень ценности проекта определяется не только общей перспективой, но и детальностью разработанной программы. Пенроуз постулирует наличие макроскопической квантовой когерентности в микротрубках цитоскелета. Он также надеется обнаружить некоторые невычислительные особенности нашего сознания и связать их с новым типом смешанного взаимодействия (квантовое и классическое). Эту программу трудно назвать детальной, и она вовсе не выглядит естественным этапом тщательно проверяемых и надежных научных исследований. Программа привлекает смелостью и оригинальностью идей, но она основана на убеждении (я бы даже сказала, на априор-

158
ной убежденности), что научное объяснение проблемы сознания обязательно должно быть основано на физике (я не затрагиваю вопрос о конкретных положениях квантовой механики, связанных с этой программой). Поэтому мне кажется, что, обсуждая программу Пенроуза, мы должны постоянно помнить, что никаких точных доказательств преимуществ физики перед другими науками в рассматриваемой области не существует.

2. Вторая группа доводов в пользу ведущей роли физики связана с тем, что некоторые ее разделы (в особенности электромагнитные явления) очевидно связаны с нашими представлениями о работе мозга и нервной системы, поскольку мы уже привыкли описывать передачу сигналов, пользуясь терминами электротехники. Кстати, многие положения книги Пенроуза тоже непосредственно связаны с электромагнитными исследованиями, поскольку именно описываемые им различные состояния электрической поляризации димеров тубулина создают различия в геометрической конфигурации, изгибая димеры в микротрубках. Однако хотелось бы сразу подчеркнуть слабость этих доводов, поскольку из того факта, что «физика участвует в процессах мышления», вовсе не следует, что «физика может объяснить процесс мышления полностью».

Иногда на роль ведущей науки в объяснении процессов сознания претендует химия, но именно те разделы химии, которые особенно важны для нашего рассмотрения, фактически относятся к физике. Вот что пишет об этом сам Пенроуз: «Химические силы, ответственные за взаимодействие атомов и молекул, являются квантовомеханическими по своей природе. Именно они обеспечивают основные химические механизмы, управляющие поведением *веществ*»

нейропередатчиков при пересылке сигнала от одного нейрона к другому через крошечные зазоры, называемые *синаптическими щелями*. Квантовомеханическое происхождение имеют также потенциалы действия, управляющие передачей нервного сигнала» (ТР, с. 348). Автор использует химию в приводимом отрывке текста всего лишь для «поддержки» физики, пытаясь заполнить тот огромный пробел в рассуждениях, который соответствует разнице между приведенными мною выше формулировками («физика участвует в процессах мышления» и «физика может объяснить процесс мышления полностью»). Но пробел сохраняется независимо от уровня рассмотрения.

159

Известно, что ничего похожего на реальную редукцию (иерархию наук) не наблюдается [1], например, при переходе от физической химии к физике (неважно, квантовой или классической). Квантовомеханические понятия, безусловно, важны для объяснения особенностей химических явлений, но они всегда используются *совместно* с фундаментальными понятиями из других областей науки. Квантовая механика никогда не объясняет явления целиком в своих собственных рамках и представлениях.

3. В цепочке рассуждений Роджера относительно того, что физика может объяснить сознание, просматривается также некий метафизический довод. Нам предлагается идея о том, что сознание *не является чем-то таинственным* (т. е. оно может быть объяснено *научно*), из чего якобы следует, что такое объяснение должно быть основано на языке и представлениях *физики*. Упомянутый выше вопрос («А почему не биология?») на семинаре был задан Джеймсом Дурбином, известным специалистом по статистике, и я считаю вопрос в высшей степени уместным. Мир статистики отличается пестротой и разнообразием, вследствие чего Дурбину постоянно приходится сталкиваться с образами и характеристиками из весьма далеких друг от друга сторон научной и практической деятельности. Мир Роджера, наоборот, представляет собой *единую систему*, в основе унификации которой лежат законы физики, и его философский подход можно назвать «физицизмом». На мой взгляд, он основан на убеждении, что «удовлетворительную метафизику» можно получить только на основе некоторой единой системы, в противном случае мы обречены на малопривлекательный и малопривлекательный (или даже таинственный, если воспользоваться терминологией самого Пенроуза) дуализм. Именно это утверждение я бы хотела оспорить [2], поскольку, на мой взгляд, для многих физиков отсутствие разумной альтернативы кажется почти очевидным. Им представляется, что любой человек, считающий физику способной описывать окружающий мир, должен тут же признать ее главенствующую роль в этом описании.

Почему, собственно, дела должны обстоять таким образом? Окружающий нас мир обладает огромным количеством разнообразных свойств и закономерностей, одни из которых изучаются отдельными науками, другие находятся на стыке

160

наук, а третьи вообще никем не изучаются. Можем ли мы допустить, что за всеми этими разнообразными проявлениями природы в действительности скрывается нечто единое? Мне кажется, что к такой мысли может привести, с одной стороны, лишь явно преувеличенное представление о роли систематизации наук и их взаимодействий, а с другой — избыточный оптимизм в отношении возможностей физики и используемых в ней методов.

Необходимо подчеркнуть, что такое ограничение метафизической перспективы (оно выглядит всего лишь разновидностью «физицистского» монизма) является широко распространенной философской позицией, которой придерживаются часто даже ученые, не считающие, что все остальные науки могут быть сведены к физике. В качестве примера можно привести биологию, в которой раньше идеи редукционизма не были особенно популярны. Однако в последние годы биологи вновь стали всерьез говорить о «внезапном появлении признаков», т. е. о возникновении новых свойств и законов развития при переходе к другим уровням сложности и организации систем. Многие биологи при этом никак не могут выйти за пределы монистического подхода, вследствие чего они чувствуют себя обязанными настаивать на порождении или вытекании свойств друг из друга. Говоря упрощенно, они считают, что биологические свойства «вытекают» из физических, т. е. если какие-то две системы одинаковы по своим физическим характеристикам, то они обязаны иметь и одинаковые биологические характеристики. Разумеется, продолжают такие биологи, сказанное вовсе не означает, что биологические законы могут быть сведены (редуцированы) к физическим, поскольку биологические характеристики не описываются физическими терминами. Одновременно из этого не следует и полная независимость биологических свойств, хотя бы потому, что мы регистрируем их физическими методами. Если

физическое описание системы задано, то биологическое описание не может не согласовываться с ним. Говоря юридическим языком, биологические характеристики не имеют независимого статуса, они являются как бы «гражданами второго сорта».

Следует совершенно четко признать, что биологические свойства являются независимым набором характеристик, обладающих собственными и достаточно эффективными причинно-следственными связями. Такое признание, кстати, вовсе не вле-

161

чет за собой какого-то отказа от обычного хода эмпирических исследований. Я всего лишь предлагаю признать наличие практически очевидной ситуации — в некоторых случаях физика помогает понять процессы, происходящие в биологических системах, однако в биологии (точно так же, как и в химии, о чем я упоминала выше) эта помощь очень редко имеет смысл без учета «нередуцированных», существенно биологических закономерностей. Сказанное легко выразить слоганом по *biology in, not biology out* («биология не является замкнутой наукой, но ее нельзя свести к другим наукам!»)*, который я неоднократно выдвигала в разной форме.

* При обсуждении этого вопроса Абнер Шимони высказал следующие соображения:

«Нэнси Картрайт предлагает рассматривать сознание скорее как биологическую, а не физическую проблему. Я полностью согласен с позитивной частью ее ответа и тоже уверен, что в изучении сознания еще очень многое предстоит выяснить исследованиями в эволюционной биологии, анатомии, нейрофизиологии, биологии развития и т. д. Однако я вовсе не считаю физические методы исследования столь бесплодными. Мы должны максимально углублять взаимодействие между научными дисциплинами, а также учитывать проблему взаимодействия целого и его частей. Никто не может сказать априори, куда приведут нас эти исследования. Кроме того, результаты, получаемые в различных направлениях исследований, могут оказаться неоднозначными. Например, теорема Белла (и основанные на ней эксперименты) показывает, что корреляции, возникающие между пространственно разделенными, но взаимосвязанными системами, нельзя учесть в рамках ни одной из теорий, описывающих определенные состояния индивидуальных систем. Этот результат, безусловно, следует считать блестящим триумфом идеи так называемого холизма (целостности). Однако, с другой стороны, Онзагер показал, что в двумерной модели Изинга происходят фазовые переходы, т. е. в бесконечной системе (с взаимодействием лишь ближайших элементов) может существовать дальний порядок структуры. Этот результат можно считать триумфом аналитического подхода, доказывающим сводимость макрофизики к микрофизике. Каждое такое достижение (независимо от того, свидетельствует ли оно в пользу холизма или аналитического подхода) обогащает наше представление о строении мира. Изучение связей научных дисциплин друг с другом, естественно, не отменяет феноменологических законов, существующих внутри дисциплин, но позволяет нам эвристически оценить возможности уточнения и обобщения этих законов, а также глубже понять их значение. Когда-то Пастер предположил, что вращение плоскости поляризации света, проходящего через вещество, обусловлено хиральностью молекул, и это предположение привело к возникновению новой науки — стереохимии».

162

Наблюдаемые нами явления можно совершенно естественно приписать взаимодействию биологических и физических свойств, воздействующих друг на друга. Кроме того, мы имеем биологическое и физическое описания (связанные с локальным контекстом описываемых систем), а также множество весьма показательных примеров наличия причинно-следственных связей между этими свойствами (я подразумеваю ситуации, когда совместное действие биологических и физических свойств приводит к эффектам, не наблюдаемым в каждой из этих дисциплин в отдельности). Пенроуз легко «перепрыгивает» от этой сложной картины к простому утверждению типа «всё это должно быть физикой», что вызывает очевидное беспокойство. Возможно, конечно, что всё нами наблюдаемое действительно «является физикой», однако пока у нас нет никаких оснований считать этот вывод однозначным или строгим. Более того, имеются веские доводы против такого утверждения [3].

Одна из причин, позволяющих считать, что «всё есть физика», связана с довольно общей идеей получения замкнутых описаний. В физике существует негласное правило, что понятия и законы любой «хорошей» теории должны составлять замкнутую систему, чтобы эта теория могла давать некоторые предсказания относительно рассматриваемых понятий. Такой подход к правильности теории представляется мне ошибочным (или, по крайней мере, излишне оптимистичным). Кстати, примерно одновременно «предсказательность» приобрела значение и в философии, придавая последней характер «специализированной», отдельной науки. В сущности, все науки, за исключением физики, являются специализированными, т. е. их законы выполняются в лучшем случае *ceteris paribus* (при прочих равных условиях) лишь до тех пор, пока не рассматриваются внешние проблемы, не входящие в круг вопросов, очерченных данной дисциплиной или теорией.

Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум / Пер. с англ. — М.: Мир, 2004. — 191 с, ил. — (Рубежи науки).

А теперь давайте спросим себя, что заставляет нас считать физические законы иными и не требовать для их выполнения упомянутого правила *ceteris paribus*. Доказательством выделенности физики не могут служить никакие блестящие лабораторные достижения, как, впрочем, и прекрасное ньютоновское описание устройства Солнечной системы, когда-то столь поразившее Канта. Нельзя принять в качестве доказательства и великолепные технические достижения (я подразумеваю все эти

163

вакуумные трубки, транзисторы, СКВИД-магнетроны и т. п.). Дело в том, что такие устройства созданы в предположении, что никаких внешних воздействий не существует, и они вовсе не предназначены для проверки справедливости законов при воздействии факторов, не учитываемых теорией. В случае физики почему-то негласно подразумевается, что такие факторы просто не могут существовать (если они вдруг возникают, то мы считаем, что они также могут быть описаны на языке физики и подчиняются этим законам). Но именно это на самом деле и является предметом нашего обсуждения.

Я хочу закончить свой ответ рассуждением о реализме. Я постоянно пропагандирую плюралистический взгляд на все науки, предлагая рассматривать науку в целом как ряд примерно равных по значению отдельных дисциплин, каждая из которых имеет собственное обоснование и занимается изучением различных классов взаимодействий, относящихся к исследуемой ею области и специфически характерных именно для этой области. Такой подход соответствует естественной точке зрения, что наука представляет собой некую созданную человеческим разумом конструкцию, а не истинное зеркало природы. Конечно, этот подход не является единственно возможным или обязательным. Например, Кант был сторонником диаметрально противоположной точки зрения и считал, что мы создаем науку именно потому, что единая система является необходимой (но не единственно возможной). Поэтому следует особо подчеркнуть, что плюрализм не означает антиреализма. Утверждение, что законы физики справедливы лишь при прочих равных условиях, отрицает не их истинность, а лишь претензии на «абсолютную власть». Плюрализм выступает не столько против реализма физики, сколько против своеобразного «имперского шовинизма», иногда проявляемого физикой по отношению к другим наукам. Я вовсе не желаю вовлечь всех нас в дискуссию о научном реализме, а скорее просто предлагаю Пенроузу еще раз обсудить утверждение о той метафизической роли, которую, по его мнению, должна играть именно физика. Такое обсуждение должно предшествовать дальнейшим спорам о том, какой будет эта физика. Предметом спора выступают не истинность законов физики и их возможная роль в описании природы, а вопрос о том, какова степень их истинности и какое бремя дополнительных объяснений следует возложить на законы физики.

164

ПРИМЕЧАНИЯ

1. См. Hendry R. F., "Approximations in quantum chemistry", in Niall Shanks (ed.), *Idealisation in Contemporary Physics* (Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and Humanities, Rodopi, Amsterdam) (forthcoming 1977).

Woolley R. G. (1976) "Quantum theory and molecular structure", *Advances in Physics*, 25, 27—52.

2. Подробности дискуссии по поводу существования «единой системы» можно найти в работах: John Dupre (1993) *The Disorder of Things: Metaphysical Foundations of Disunity of Science* (Harvard University Press, Cambridge MA); Otto Neurath (1987) *Unified Science*, Vienna Circle Monograph Series, trans. H. Kael (D. Reidel: Dordrecht).

3. Эти вопросы рассматриваются также в работах: Nancy Cartwright (1993) "Is natural science natural enough? A reply to Phillip Allport", *Synthese*, 94, 291. Более детальное обсуждение затронутой проблемы см. в: Nancy Cartwright (1994) "Fundamentalism vs the patchwork of laws", *Proceedings of the Aristotelian Society* и (1995) "Where in the world is the quantum measurement problem", *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaft, Philosophia Naturalis*, ed. L. Kreuger and B. Falkenburg (Spektrum: Heidelberg).

Глава 6. Возражения убежденного редукциониста. Стивен Хокинг

Я хочу сразу предупредить читателя, что являюсь убежденным (можно даже сказать твердолобым) редукционистом. Я верю, что законы биологии можно свести к законам химии (одним из доказательств этого может служить установление структуры ДНК) и, более того, что

химические законы могут быть сведены к физическим. Думаю, что большинство химиков согласятся со мной.

Мы с Роджером Пенроузом много лет занимались изучением крупномасштабных пространственно-временных структур, включая сингулярности и черные дыры. У нас почти никогда не возникало разногласий по поводу классической общей теории относительности, однако мы часто спорили по проблемам квантовой гравитации, а сейчас совершенно по-разному думаем о природе, физике и человеческом сознании. Пенроуз является убежденным платоником и верит, что существует лишь мир идей, который и описывает одну-единственную физическую реальность. Я же отношу себя к позитивистам и уверен, что физические теории являются всего лишь создаваемыми нами математическими моделями, вследствие чего вообще не имеет смысла говорить о соответствии теории и реальности. Теории следует оценивать лишь по их способности предсказывать наблюдаемые явления.

Из-за указанной разницы в принципиальных подходах я совершенно не согласен с тремя основными положениями книги Пенроуза (гл. 1—3). Первым является его предположение, что квантовая гравитация приводит к явлению, которое он обозначает аббревиатурой OR (речь идет об объективной редукции, или коллапсе, волновой функции). Второе принципиальное утверждение, с которым я не могу согласиться, заключается в том,

166

что Пенроуз считает этот процесс важным для объяснения работы мозга и связывает его с эффектом когерентности потоков в микротрубках. И наконец, в-третьих, я не согласен с тем, что для объяснения самосознания нам требуется (якобы из-за теоремы Гёделя) некая теория типа OR.

Я начну с наиболее знакомой мне темы, а именно с квантовой гравитации. Объективная редукция волновой функции по Пенроузу представляет собой некую форму декогеренции, которая может возникать из-за взаимодействия с окружением или из-за флуктуаций топологии пространства-времени. Однако Пенроуз, кажется, не желает замечать эти механизмы, а предпочитает говорить о «легкой ряби» пространства-времени, связанной с массой мелких объектов. А ведь такая «рябь» (в соответствии с существующими теориями), казалось бы, не должна была препятствовать самой обычной гамильтоновой эволюции, не требующей никакой декогеренции или объективной редукции волновых функций. Возможно, что общепринятые идеи неверны, но самому Пенроузу тоже не удалось разработать достаточно четкую теорию, позволяющую вычислять, когда должна происходить объективная редукция.

Предлагаемая Пенроузом объективная редукция, казалось бы, должна была, наконец, извлечь несчастного шредингеровского кота из полуживого-полудохлого состояния (в нашу эпоху всеобщей любви к природе давно пора перестать мучить бедное животное даже в мысленных экспериментах). Однако Пенроуз считает, что эффект объективной редукции столь мал, что его нельзя в эксперименте отделить от декогеренции, вызванной взаимодействием с окружением. Если дело обстоит действительно так, то для объяснения парадокса достаточно декогеренции окружения, и нет никакой необходимости привлекать для объяснения квантовую гравитацию. До тех пор, пока эффект объективной редукции не будет достаточно сильным для экспериментальной регистрации, он не может играть роли, которую пытается приписать ему Пенроуз.

Второе утверждение Пенроуза заключается в том, что объективная редукция играет важную роль в работе мозга, воздействуя на когерентность потоков через микротрубки. Я не являюсь специалистом в этой области, однако предлагаемый механизм кажется мне весьма маловероятным, даже если объективная редукция волновой функции действительно происходит (во что я тоже не верю). Я не могу представить себе мозг, содержащий настолько изолированные системы, что объективная редукция в

167

них может быть отделена от декогеренции окружения, поскольку такие изолированные системы не смогли бы обеспечить требуемую скорость мыслительных процессов.

Далее, Пенроуз полагает, что необходимость введения объективной редукции связана с тем, что из теоремы Гёделя вытекает невычислительный характер работы мозга вообще и сознания в частности. Иными словами, он просто верит, что сознание специфически присуще лишь живым существам и не может моделироваться на компьютере в принципе. Однако при этом ему не удается ясно связать объективную редукцию с сознанием, так что при чтении иногда возникает ощущение, что сознание и объективная редукция объединяются им лишь по общему признаку какой-то «таинственности» (и то и другое — тайна, следовательно, они должны быть как-то связаны).

Лично мне трудно обсуждать с другими людьми (а особенно с физиками-теоретиками) проблемы сознания, поскольку оно всегда представлялось мне понятием, которое невозможно оценить «снаружи». Говоря очень упрощенно, если передо мной вдруг появится космический пришелец, пресловутый «зеленый человечек», то я не думаю, что смогу из разговора с ним четко выяснить, является ли он роботом или мыслящим существом, обладающим самосознанием. Поэтому я всегда предпочитаю говорить об интеллекте, что является измеримой характеристикой. У меня нет оснований считать, что компьютер не может моделировать интеллектуальную деятельность, хотя, разумеется, сегодня он не способен моделировать ее полностью (что Пенроуз и продемонстрировал на примере решения шахматных задач). Однако далее он сам признает, что не существует четкой границы между интеллектом человека и животных, что позволяет нам в принципе говорить даже об интеллекте червяка. Надеюсь, что никто не сомневается в возможности моделирования мозга червяка на мощном современном компьютере. Доводы, основанные на теореме Гёделя, на мой взгляд, в данном случае совершенно неприменимы, поскольку черви не размышляют о природе П1-утверждений.

Считается, что эволюция от мозга червя до мозга человека произошла за счет естественного отбора по теории Дарвина, причем признаками, способствовавшими выживанию, выступали способность размножаться и избегать враждебного воздействия, а вовсе не математические способности. Теорема Гёделя в этой схеме вновь оказывается ненужной и бесполезной. Просто развитие «сообразительности» или интеллекта, необходимо-

168

го для выживания, попутно позволяет человеку создавать и доказывать сложные математические построения. Но любые рассуждения относительно этого являются слишком сложными, неопределенными и даже обманчивыми. Пока еще в нашем распоряжении нет сколько-нибудь «здоровых» идей относительно проблем сознания.

Я очень кратко изложил причины моего несогласия с тремя основными утверждениями Пенроуза (существует объективная редукция волновых функций, она играет некую роль в работе мозга, она необходима для объяснения сознания), и пусть теперь он ответит на мои возражения.

Глава 7. Ответы Роджера Пенроуза

Я благодарен Абнеру, Нэнси и Стивену за их комментарии к моим лекциям и хочу сделать некоторые дополнительные замечания по каждому из них в отдельности.

ОТВЕТ АБНЕРУ ШИМОНИ

Прежде всего хочу отметить, что я очень высоко оцениваю его замечания и считаю их исключительно полезными. Начну с утверждения, что, увлекшись проблемой невычислимости, я просто «лезу не на ту вершину»! Если эта фраза означает, что мышление проявляет себя множеством важных операций, не относящихся к вычислимым, то полностью соглашаюсь с Абнером. Я согласен также и с тем, что предлагаемая в книге Сирла ситуация с «китайской комнатой» является убедительным аргументом против «сильно-го-А1» утверждения (сводящегося к тому, что сознательная деятельность может быть сведена только к вычислимости). Исходные доводы Сирла относились к тому свойству сознания, которое называется «пониманием», и я говорил об этом, обсуждая теорему Гёделя, но в принципе аргументация «китайской комнаты» может быть использована (и, возможно, даже с большей убедительностью) при рассмотрении других ментальных качеств, например способности воспринимать музыкальные звуки или оттенки цвета. Я не пользовался такими доводами в собственных рассуждениях, поскольку эти доводы носят совершенно негативный характер и практически ничего не говорят нам ни о природе сознания, ни о возможных направлениях исследований, которые могли бы подвести нас к пониманию проблемы сознания.

Аргументация Сирла относится исключительно к различиям типа *A/B* в соответствии с терминологией гл. 3 (см. также с. 12-16 в книге «Тени разума»). Другими словами, Сирл стремится показать, что *внутренние аспекты* сознания не ограничиваются вы-

170

числимыми операциями. Для моих целей эта задача представляется явно недостаточной, поскольку я хотел продемонстрировать, что *внешние проявления* сознания также не сводятся к вычислениям. Я стремился не рассматривать сразу весьма сложную проблему внутренних проявлений, а попытаться понять, какого рода физические подходы могли бы убедительно

продемонстрировать внешние проявления сознания. На данном этапе это привело меня к задаче о том, как сознание внешне реагирует на различие ситуаций *A/C* или *B/C*. Мне кажется, что в этом направлении возможен некоторый прогресс, поэтому (соглашаясь с тем, что я еще не приступил к восхождению на *правильную* вершину) я продолжаю верить, что если мы сможем успешно преодолеть сложные маршруты предгорья, то у нас появится больше шансов наметить правильный маршрут к намеченной вершине.

Шимони пишет, что он не согласен с моими доводами в ответах на рецензию Хилари Патнам (в связи с книгой «Тени разума»), однако в этой переписке я и не пытался объяснять свою позицию, поскольку не считаю короткие письма в журнале хорошим средством для серьезной и аргументированной дискуссии. В письмах я всего лишь указывал, что, на мой взгляд, критика Патнам скорее представляет пародию на мои идеи, а раздраженный тон моих ответов объясняется именно тем, что Патнам, похоже, даже не читала те разделы книги, в которых рассмотрены обсуждаемые вопросы. Подробный ответ на рецензии, посвященные «Теням разума» (в котором, как мне кажется, содержатся ответы и на доводы Абнера), я представил в (электронном) журнале *Psyche**. Хотя многие исследователи и предпочитают не вспоминать о гёделевском подходе, я верю в его эффективность и не собираюсь отказываться от совершенно правильных, на мой взгляд, аргументов только потому, что они представляются кому-то трудными! Я утверждаю, что хотя этот подход не дает сам по себе ответа на интересующие нас вопросы, он позволяет нам понять, какого рода физика сможет в будущем объяснить феномен сознания.

Мне кажется, что я мог бы согласиться в главных чертах с позитивной частью критики Шимони. Его удивляет, почему ни в «Новом разуме короля», ни в «Тенях разума» я не упоминаю философские работы А. Н. Уайтхеда. Основная причина этого — мое невежество. Разумеется, я знал об общефилософской позиции Уайтхеда и о введенном им понятии некоего «панпсихизма», однако я не читал внимательно ни одной работы Уайтхеда

* См. January 1996; <http://psyche.cs.monash.edu.au/psyche-index-v2.1.html>, а также печатную версию, опубликованную издательством MIT в 1996 г.

171

по философии и поэтому предпочел просто не ссылаться на них или на близость предлагаемых им идей к моим собственным. Мне кажется, что Шимони правильно обрисовал основные положения моей теории, хотя я и не готов делать по ним какие-то определенные утверждения (частично из-за того, что я не совсем точно знаю, в чем именно я действительно убежден).

Я нахожу «модернизированный уайтхедизм» Шимони просто замечательным и весьма правдоподобным. Сейчас мне кажется, что ход моих подсознательных мыслей весьма близок к тому, что Абнер изложил с большим красноречием. Более того, он прав в том, что для возникновения отдельного разума (в качестве коллективного квантового состояния) необходимы крупномасштабные квантовые *запутанности*. Хотя ни в «Тенях», ни в «Новом разуме» я не делал прямых утверждений типа «разум является онтологически фундаментальным свойством Вселенной», однако полагаю, что нечто в этом роде должно быть справедливо. Мне представляется несомненным, что с каждым проявлением операции OR должна быть связана какая-то протоментальность, однако она является в каком-то смысле «крошечной». Без широкомасштабной квантовой запутанности с какой-то высокоорганизованной системой, обладающей способностью к «переработке информации» (типа мозга), настоящее сознание, по-видимому, никогда не могло бы возникнуть. Я не рискнул занять более четкую позицию по этому вопросу (возможно, потому, что мне не удалось найти удачные формулировки для указанных идей), и я благодарен Абнеру за его разъяснения и комментарии.

Я также соглашаюсь с тем, что более глубокое исследование аналогий с новейшими достижениями в области психологии могло бы быть полезным. Если квантовые эффекты действительно играют существенную роль в процессах сознания, то мы должны искать их проявления в особенностях мышления. С другой стороны, в дискуссии такого рода следует быть крайне осторожным, избегая соблазна поспешных заключений и ошибочных сравнений. Я убежден, что все рассуждения на эту тему полны опасных ловушек. Впрочем, возможно, что уже существуют или могут быть придуманы новые методы ясной и разумной экспериментальной проверки предлагаемых гипотез (например, относящихся к микротрубкам), и было бы очень интересно изучить связанные с ними возможности.

Шимони упоминает разработанную Миелником негильбертовскую квантовую механику. Обобщения квантовой механики всегда очень интересовали меня, и я полагаю, что их следует

172

всячески развивать и поддерживать. Я не совсем убежден, однако, что именно это конкретное обобщение является верным, так как в нем вызывают сомнения, по крайней мере, два момента. Прежде всего при этом подходе (как, впрочем, и во многих других вариантах обобщения квантовой механики) основное внимание уделяется матрице плотности, а не квантовым состояниям. Обычно в квантовой механике пространство матриц плотности образует выпуклое множество, а «чистые состояния» (соответствующие описанию отдельного вектора состояний) располагаются на границе этого множества. Такая картина соответствует обычному гильбертову пространству и представлению границы в виде подмножества тензорных произведений гильбертова пространства на свое комплексное сопряжение (т. е. дуальному, или спаренному, векторному пространству). В предлагаемом Миелником подходе сохраняется обычная «матрица плотности», однако ее описание не требует наличия линейного гильбертова пространства, из которого создается выпуклое множество. В таком обобщении мне нравится идея отказа от линейности гильбертова пространства, однако настораживает то, что при этом квантовая теория теряет голоморфность. Насколько я понимаю, при этом удастся сохранить не аналог вектора состояний, а лишь вектор состояний определенной фазы. Такой формализм почти полностью затемняет физическое содержание комплексных суперпозиций квантовой теории. Конечно, мне могут возразить, что именно эти суперпозиции и создают сложности на макроскопическом уровне, так что было бы благом избавиться от них раз и навсегда, однако нельзя забывать, что они существенно важны для квантового уровня описания, и при предлагаемом обобщении мы можем просто потерять все позитивные результаты квантовой теории.

Кроме того, я полагаю, что нелинейные аспекты обобщения квантовой механики вынуждают нас рассматривать процесс измерения как один из элементов *асимметрии времени* (см. «Новый разум короля», гл. 7), и меня беспокоит, что в предлагаемой Миелником схеме это соображение не играет никакой роли.

Мне бы хотелось завершить этот ответ призывом к поддержке любых поисков новых теорий, которые позволили бы модифицировать квантовую механику, и новых экспериментов, связанных с такими теориями. Пока я рискую предлагать конкретные эксперименты, позволяющие проверить обоснованность предложенной в гл. 2 схемы (поскольку считаю, что объем наших знаний о предмете является совершенно недостаточным), однако надеюсь, что в будущем кому-то удастся выдвинуть новые идеи на этот счет.

173

ОТВЕТ НЭНСИ КАРТРАЙТ

Меня очень обрадовало (и одновременно мне польстило) известие о том, что книга «Тени разума» серьезно обсуждалась на семинарах LSE и Кингз Колледжа, о чем упомянула Нэнси. Она скептически относится к попыткам объяснить сознание скорее физическими, чем биологическими факторами, и поэтому я начну ответ с заявления, что лично я всегда высоко оценивал роль биологии в указанных исследованиях. Более того, я тоже считаю, что ответ на интересующие нас вопросы мы получим, вероятнее всего, не из физики, а из биологии, однако полагаю, что для этого потребуются какие-то революционные открытия именно в физике. Впрочем, кто может знать, что ждет нас впереди!

Однако мне кажется, что Нэнси Картрайт хотелось бы получить от меня гораздо большую «уступку», т. е. что-то похожее на декларацию о признании «фундаментальной роли» биологии в научном описании процесса познания и т. п. В действительности моя точка зрения сводится к тому, что сущность сознания может вообще не относиться к биологии (по крайней мере, к биологии в ее современных рамках), однако я совершенно не могу себе представить, чтобы сознание не было связано с каким-то определенным типом *физических* процессов.

Я говорю об этом, не имея четкого представления о том, как Картрайт относится к условной границе, разделяющей биологию и физику. Мне кажется, что она будет в этом вопросе прагматиком и отнесет изучение процесса сознания к проблемам физики, если это будет полезным для дела. Она спрашивает, могу ли я сформулировать достаточно ясную и подробную исследовательскую программу, благодаря которой именно физики (а не биологи) смогут получить новые, принципиально важные результаты. Я же считаю, что мои предложения уже подразумевают проведение весьма целенаправленной программы, связанной с поиском структур мозга, обладающих некоторыми весьма специфическими физическими свойствами. Программа состоит в том, что мы должны искать особые структуры, способные сохранять и надежно «экранировать» крупные объемные квантовые состояния достаточно долго (по крайней мере, в

течение долей секунды), с тем чтобы связанные с этими состояниями квантовые «запутанности» могли распространяться по большим участкам мозга (возможно, охватывая одновременно десятки тысяч нейронов). Длительное сохранение указанных квантовых состояний требует наличия каких-то специализированных биологических структур, которые должны иметь весьма строгое внутреннее

174

строение (возможно, оно будет близко к кристаллическому) и обладать способностью значительно изменять силу синапсов. Обычная передача сигнала по нервным волокнам представляется мне совершенно недостаточным механизмом в этих условиях хотя бы в силу явно недостаточной изоляции нервных волокон. Возможно, роль требуемых структур могли бы играть так называемые пресинаптические везикулярные решетки (типа предложенных Бекон и Эклзом), но мне лично кажется, что наиболее подходящими свойствами обладают цитоскелетные микротрубки. Возможно также, что в живых организмах существует много других аналогичных структур того же масштаба (например, типа клатринов) с требуемыми характеристиками. Картрайт считает, что предложенная мною картина носит слишком общий характер, а мне кажется, что она значительно более детализирована, чем другие программы. Более того, предлагаемая схема может быть развита во многих направлениях и создает богатые возможности для экспериментальной проверки. Я согласен с тем, что мы еще очень далеки от «полного» понимания изучаемых процессов, но мне кажется, что нам следует осторожно двигаться вперед, не ожидая получить быстрые и исчерпывающие ответы на все вопросы. Нам предстоит большая и очень сложная работа.

Замечания Картрайт о роли физики в общей научной картине мира носят более серьезный характер, поскольку она считает, что физике придается излишне важное значение. Впрочем, возможно, дело обстоит именно так, и в будущем роль физики в научном описании мира будет существенно пересмотрена. Это может произойти, например, когда описание мира будет близко к завершению или хотя бы станет более точным!

Справедливо отмечая, что современная физическая теория напоминает «лоскутное одеяло» (я и сам так считаю), Картрайт полагает, что такое состояние будет сохраняться вечно (в чем я сомневаюсь). Возможно, что конечная цель физики (полное и целостное описание мира) действительно является несбыточной мечтой, и Картрайт считает саму постановку такой задачи метафизической. Мне трудно определить свое отношение к этой проблеме, однако я не уверен, что нам вообще стоит задумываться о столь далекой перспективе. Объединение знаний и научных дисциплин является ведущей тенденцией современной физики, и можно ожидать ее сохранения в будущем (предполагать обратное может только закоренелый скептик). На мой взгляд, «швы» на лоскутном одеяле современной физики (я подразумеваю и классическую, и квантовую теории) соединены плохо. Конечно, можно смириться с создавшимся положением и продолжать жить с

175

двумя принципиально разными теориями для различных уровней описания (мне кажется, что именно такой точки зрения в какой-то мере придерживался Нильс Бор), однако в последние годы наблюдался существенный рост точности экспериментальных наблюдений, что позволяет нам более четко провести границу между различными уровнями описания и изучать реальные процессы, происходящие в природе на этих уровнях. Возникает даже подозрение, что функционирование некоторых биологических систем существенно связано с границей раздела микро- и макромира. На мой взгляд, основной вопрос сейчас заключается в том, можем ли мы надеяться на появление красивой математической теории, которая изящно и строго объяснит существующий «беспорядок» в квантовой теории, или, наоборот, этот ужасный «беспорядок» и является реальной физической картиной процессов, происходящих на этом уровне. Разумеется, я верю в возможность описания мира! В конце концов, не может быть, чтобы меня обманывали собственные инстинкты!

От ответа Нэнси создается впечатление, что она готова смириться с неприятным беспорядком в физических законах, по крайней мере, на данном этапе*.

* В ходе обсуждения Нэнси Картрайт уточнила свою позицию в данном вопросе, заявив, в частности, следующее: «В отличие от Пенроуза (который считает плохой физикой ту, которая не рассматривает открытые системы) существующая физика кажется мне весьма удовлетворительной, поскольку я считаю, что совокупность законов природы действительно похожа на «лоскутное одеяло», и в окружающем нас мире много закономерностей, которые вовсе не сводятся к законам физики, но создают причинно-следственные связи. Поэтому даже «самая

точная физика» может давать при прочих равных условиях сколько-нибудь полное описание лишь замкнутых систем.

Что может служить подтверждением этой точки зрения? На мой взгляд, сама постановка такого вопроса относится к метафизике (под метафизикой я подразумеваю любую попытку выхода за пределы эмпирических знаний, включая те, которые относятся к истории науки). Я настаиваю на том, что мы обязаны избегать любой постановки метафизических проблем, а в тех случаях, когда необходимость такой постановки диктуется методологическими соображениями, мы обязаны тщательно взвешивать и оговаривать используемые формулировки. Мы также обязаны очень внимательно оценивать все возможности, не полагаясь целиком только на физические законы. Современная наука действительно является не целостной системой, а лишь «лоскутным одеялом», несвязным набором разнообразных теорий. Поэтому мне кажется, что, пытаясь понять структуру реальности, мы должны исходить прежде всего из наиболее ясных представлений, создаваемых современной наукой, а не фантазировать о том, какой эта наука может быть».

176

объясняется просто тем, что она считает законы биологии несводимыми к физике. Разумеется, в биологических системах имеется очень много сложных и непонятных параметров, играющих важную роль в их описании. Даже если бы были известны все основополагающие принципы физики, то для эффективного научного описания биологических процессов на их основе потребовалось бы провести огромную работу (проверка гипотез, нахождение приближенных оценок, развитие статистических методов и, возможно, совершенно новых математических идей). Сложность поведения биологических систем также создает малопривлекательный «беспорядок», однако с точки зрения физики он связан не с беспорядком в фундаментальных физических законах, и если бы нам удалось свести воедино физические законы, то «биологические свойства вытекали бы из физических».

Однако я сознаю, что физические законы еще далеки от завершенности. Более того, я утверждаю, что они плохо подходят для описания собственно биологических процессов. Например, в обычной формулировке квантовой механики существует операция, которая кажется относящейся к биологии (я имею в виду **R**-процесс, редукцию волновой функции). Считается, что **R**-процесс порождает «истинную» случайность, но совершенно непонятно, каким образом можно ввести некий «биологический» принцип, не нарушая «истинного» характера вносимой этой операцией случайности, т. е. не изменяя физической теории. Мне представляется, что реальная ситуация выглядит еще хуже, поскольку в принятой теории **R**-процесс *несовместим* с унитарной эволюцией **U**. Попросту говоря, процесс **U**-эволюции в стандартной трактовке квантовой механики нельзя совместить с фактом наблюдения. Обычно все стараются обойти это препятствие, используя хитроумные приборы и весьма правдоподобные рассуждения, однако уйти от этого «грубого» факта невозможно. Я не сомневаюсь, что указанная проблема относится к физике независимо от того, как она отражается в биологии. Конечно, можно предположить, что законы природы имеют столь причудливый, «лоскутный» характер, однако мне лично это представляется весьма маловероятным.

Помимо этого я иногда совершенно не могу вообразить, чем может быть биология (как, впрочем, и химия), если она не будет естественным образом вытекать из физики (надеюсь, что никто не воспримет это утверждение как проявление неуважения к упомянутым наукам). Забавно, но примерно в такой же форме некоторые люди высказывали свое недоумение по поводу моих

Далее книга оборвана

Сканирование и форматирование: Янко Слава (Библиотека Fort/Da) || slavaaa@yandex.ru || yanko_slava@yahoo.com || <http://yanko.lib.ru> || Icq# 75088656 || Библиотека: <http://yanko.lib.ru/gum.html> || Номера страниц - внизу. Книга издана без окончания
update 27.08.06
