



NATURA CUPIDITATEM INGENUIT HOMINI VERI VIDENDI
Marcus Tullius Cicero
(Природа наделила человека стремлением к познанию истины)

Мысли Об Истине

Альманах «**МОИ**»
Электронное издание, ISBN 9984-688-57-7

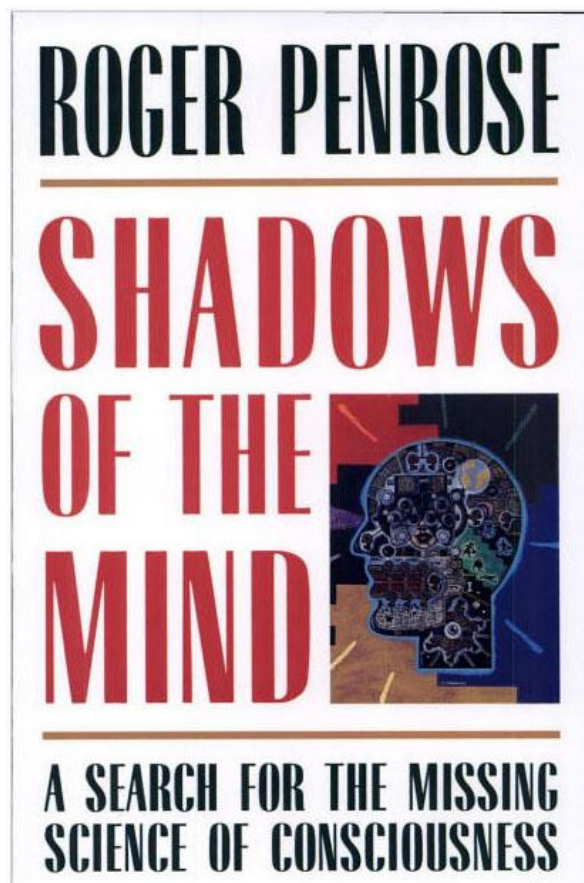
Альманах «Мысли об Истине» издается для борьбы с лженаукой во всех ее проявлениях и в поддержку идей, положенных в основу деятельности Комиссии РАН по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований. В альманахе публикуются различные материалы, способствующие установлению научной истины и отвержению псевдонаучных заблуждений в человеческом обществе.

Альманах издается с 8 августа 2013 года
Настоящая версия тома выпущена **2016-06-25**

© 2014 Марина Ипатьева (оформление и комментарии)

Файл PENRS3

<http://vekordija.narod.ru/R-PENRS3.PDF>



Английское издание

Роджер Пенроуз. «Тени разума»

(Продолжение; предыдущее в файле {PENRS2 = МОИ № 17})

Глава 5. Структура квантового мира

§5.1. Квантовая теория: головоломки и парадоксы

Квантовая теория дает нам превосходное описание физической реальности на микроскопическом уровне, однако полна при этом тайн и загадок. Нет никакого сомнения: разобраться в том, как именно работает эта теория, чрезвычайно трудно; еще труднее отыскать какой-либо смысл в той «физической реальности» (или нереальности), которая, как утверждает квантовая теория, и составляет основу нашего мира. На первый, неискушенный, взгляд может показаться, что эта теория способствует формированию мировоззрения, которое многие (включая и меня) находят в высшей степени неудовлетворительным. В лучшем случае, буквально понимая все положения и определения теории, мы получаем, мягко говоря, очень странную картину мира. В худшем – столь же буквально воспринимая заявления некоторых из наиболее знаменитых приверженцев квантовой теории, никакой картины мира мы не получаем вовсе, а та, что была, рассыпается на глазах.

Я думаю, все те загадки, что ставит перед нами квантовая теория, можно четко разделить на два совершенно различных класса. Одни я называю загадками-головоломками, или Z-загадками (от слова *puzzle*¹). К этому классу я отношу те квантовые истины об окружающем нас мире, которые действительно способны кого угодно привести в замешательство и заставляют изрядно поломать над собой голову – и в то же время находят непосредственное экспериментальное подтверждение. Сюда же можно включить и те общие предсказания квантовой теории, которые не подтверждены экспериментально, но – ввиду уже подтвержденного – очень похожи на правду. Среди наиболее поразительных Z-загадок упомяну те, что известны под общим названием феномены Эйнштейна–Подольского–Розена (или ЭПР-феномены; подробнее о них мы поговорим позднее, см. §5.4, §6.5). Второй класс составляют квантовые загадки, которые я называю загадками-парадоксами, или X-загадками (от слова *paradox*²). Согласно квантовому формализму, эти утверждения о мире вроде бы должны быть истинными, однако они настолько невероятны и парадоксальны, что мы просто не можем в них поверить, не можем признать их «действительно» истинными. Именно эти загадки и не дают нам принять предлагаемый формализм всерьез, препятствуют образованию на рассматриваемом уровне сколько-нибудь достоверной картины мира. Самая знаменитая X-загадка – парадокс шрёдингеровой кошки, в рамках которого, по всей видимости, утверждается, что макроскопические объекты (например, кошки) способны существовать в двух совершенно различных состояниях одновременно (этакое подвешенное состояние, в котором кошка и «жива», и «мертва» сразу). К подобным парадоксам мы еще вернемся в §6.6 (см. также §6.9, рис. 6.3, и НРК, с. 290–293 {= МОИ № 15, с.114}).

Нередко утверждают, что все трудности, которые возникают у наших современников с восприятием квантовой теории, происходят исключительно от того, что мы чересчур крепко цепляемся за наши старые физические концепции.³ С каждым же последующим поколением

¹ Головоломка (англ.). – Прим. перев.

² Парадокс (англ.). – Прим. перев.

³ В.Э.: Веданская теория в общем-то не оспаривает теории физики (в отличие от некоторых теорий математики), поэтому я особенно не собираюсь комментировать текст Пенроуза, относящийся к физике. Здесь сделаю только общеприкладное примечание. Человеческий разум, согласно Веданской теории, представляет собой работу определенной (биологической) операционной системы. В устройство этой операционной системы (Естественным отбором) заложены некоторые фундаментальные ее принципы. Одним из таких принципов является то, что при построении отображения пространства в этой системе используется комбинация трех независимых величин («вперед–назад», «вправо–влево», «вверх–вниз»). То

люди будут «вживаться» в квантовые таинства всё глубже, и в конце концов, после достаточного количества сменившихся поколений, смогут без какого-либо напряжения принять их все скопом – как Z-загадки, так и X-загадки. Этот взгляд представляется мне фундаментально ошибочным.

Я полагаю, что к Z-загадкам мы, возможно, и в самом деле сможем со временем привыкнуть и даже счесть их вполне естественными, однако с X-загадками такой номер не пройдет. По моему глубокому убеждению, X-загадки заведомо неприемлемы с философской точки зрения, а возникновение их объясняется только тем, что квантовая теория не является полной теорией или, скорее, не является вполне точной на том уровне феноменов, на котором начинают проявляться X-загадки. В совершенной квантовой теории ни одной X-загадки в списке квантовых тайн не останется (а *крест* в их названии оказался символическим – им и перечеркнем). Иначе говоря, свыкаться нам предстоит лишь с Z-загадками.

Учитывая вышесказанное, мы имеем полное право поинтересоваться, где же проходит граница между Z-загадками и X-загадками. Одни физики утверждают, что квантовых загадок, которые следовало бы в этом смысле классифицировать как X-загадки, попросту нет, – все странное и на первый взгляд парадоксальные утверждения, в которые нам предлагает поверить квантовый формализм, действительно истинны и описывают реальный мир, нужно только правильным образом на этот самый мир посмотреть. (Если такие люди хотят избежать обвинений в отсутствии логики и всерьез воспринимают возможность описания физической реальности в терминах «квантовых состояний», то они должны также верить и во «множественность миров» в той или иной форме (см. §6.2). Согласно этой концепции, шрёдингеровы мертвая и живая кошки обитают в различных «параллельных» вселенных. Вы видите кошку, и тут же в каждой из двух вселенных возникает по вашей копии, один из вас глядит на живую кошку, а другой – на мертвую.) Другие физики устремляются к противоположной крайности. По их мнению, я слишком благодушно настроен по отношению к квантовому формализму, раз полагаю, что всем этим необъяснимым ЭПР-феноменам (о которых, напоминаю, мы еще поговорим) и впрямь найдется в будущем экспериментальное подтверждение. Я никоим образом не настаиваю, что все должны непременно разделять мое мнение о том, где именно надлежит проводить границу между Z- и X-загадками. Мой выбор определяется предположениями, согласующимися с точкой зрения, которую я представляю в следующей главе, в §6.12.

Вряд ли уместно будет приводить на этих страницах исчерпывающее объяснение природы квантовой теории. Поэтому в настоящей главе я ограничусь относительно кратким (но в достаточной мере полным) описанием некоторых необходимых нам аспектов теории, особое внимание уделив при этом природе Z-загадок. В следующей главе я расскажу, почему я полагаю, что наличие X-загадок делает современную квантовую теорию неполной, невзирая на все те поразительные экспериментальные подтверждения, которыми она на сегодняшний день может похвастаться. Читателям, желающим познакомиться с квантовой теорией поближе, я рекомендую обратиться к НРК (глава 6 {= [МОИ № 15](#)}) или к более специальной литературе – например, [94], или [70].

Далее (глава 6, §6.12) я представляю одну новую идею относительно уровня, на котором имеет смысл предпринимать попытки усовершенствования квантовой теории (думаю, следует

обстоятельство, что величин именно три и что они независимы одна от другой, определяет то следствие, что для человеческого восприятия пространство является трехмерным и евклидовым. Другим фундаментальным принципом человеческой операционной системы является то, что она весь свой опыт располагает в линейный ряд (времени). Третьим фундаментальным принципом устройства человеческой операционной системы является то, что она оперирует объектами. Следствием этого принципа является то, что человек в общем-то не может представить себе ничего другого, кроме объектов (например, частиц). Даже чтобы представить волны, он вынужден представлять их как колебания опять каких-то частиц. Однако все модели, встроенные в человеческую операционную систему и строящиеся далее ею, на самом деле являются приближенными. При детальном изучении обнаруживаются расхождения между предпосылками человеческой операционной системы и реальностью. Реально материя не представляет собой четко очерченные корпускулы (что обнаруживается в микромире), а в макромире отношения скоплений материи невозможно точно охарактеризовать тремя независимыми пространственными величинами с четвертой независимой размерностью времени. Так называемые «парадоксы» современной физики (теории относительности и квантовой механики) просто показывают, что фундаментальные принципы, заложенные в человеческую операционную систему, являются приближенно, а не точно отражающими физическую реальность (иного, в общем-то, и нельзя было ожидать). Таким образом, Веданская теория здесь уточняет только одно обстоятельство: что речь идет о расхождениях между действительной природой, с одной стороны, и принципами построения человеческой системы обработки информации – с другой.

предупредить читателя, что идея эта существенно отличается от той, что была предложена в НРК, хотя мотивы остались почти теми же). В §7.10 (и в §7.8) я приведу некоторые предварительные причины, позволяющие предположить, что подобные попытки вполне могут быть связаны с невычислимостью в том общем смысле, который нас так интересует. Что касается стандартной квантовой теории, то невычислимой она является лишь постольку, поскольку в измерительной процедуре здесь наличествуют случайные элементы. Случайные же элементы, как я особо подчеркивал в первой части (§3.18, §3.19 {= [МОИ № 17](#)}), не способны сами по себе обусловить ту невычислимость, которая нам потребуется в конечном итоге для понимания процессов мышления.

Рассмотрим для начала некоторые из наиболее поразительных Z-загадок квантовой теории на примере двух весьма показательных и мозгодробительных головоломок.

§5.2. Задача Элитцура–Вайдмана об испытании бомб

Вообразим себе бомбу, в носовой части которой закреплен детонатор, настолько чувствительный, что при малейшем давлении на него бомба взрывается. Для срабатывания такого детонатора достаточно одного единственного фотона видимого света, хотя в некоторых случаях детонатор заклинивает, и бомба взорваться не может – бомбу с неисправным детонатором мы будем называть «холостой». Предположим, что детонатор снабжен зеркальцем, подвижно закрепленным на носу бомбы таким образом, что при отражении зеркальцем одного фотона (видимого света) оно смещается и приводит в движение ударный механизм, в результате чего бомба взрывается – за исключением, разумеется, тех случаев, когда бомба оказывается холостой, т.е. когда чувствительный механизм детонатора заклинивает. Поскольку все упомянутые устройства работают по классическим законам, мы должны также предположить, что после того, как бомба собрана, выяснить, не заклинило ли ее детонатор, невозможно без того, чтобы этот самый детонатор так или иначе не потревожить – что непременно приведет к немедленному взрыву. (Необходимо ввести еще одно допущение: детонатор может заклинить только в процессе сборки, по завершении сборки детонатор либо исправен, либо нет; см. рис. 5.1.)



Рис. 5.1. Задача Элитцура–Вайдмана об испытании бомб. Сверхчувствительный детонатор бомбы срабатывает от соприкосновения с одним-единственным оптическим фотоном – может, впрочем, и не сработать, если его заклинит, в каковом случае бомба считается холостой. Задача: найти гарантированно исправную бомбу при наличии большого количества бомб сомнительного качества.

Допустим, что таких бомб у нас огромное количество (денег мы здесь не считаем!), однако доля холостых среди них может оказаться чрезмерно высокой. Задача заключается в том, чтобы найти хотя бы одну бомбу, о которой можно было бы заранее с уверенностью сказать: «Вот эта точно работает».

Эта задача (вместе с решением) была предложена Авшаломом Элитцуром и Львом Вайдманом [114]. Я не буду приводить решение прямо здесь, так как, возможно, кто-то из читателей, уже знакомых с квантовой теорией и с теми занимательными головоломками, которые я определил выше как Z-загадки, пожелает попробовать свои силы (интеллектуальные, разумеется) в отыскании этого самого решения. Достаточно будет сказать, что решение существует и даже, при неограниченном запасе бомб такого рода, не выходит за рамки современных технических возможностей. Тех же, кто в квантовой теории пока не сведущ (либо просто не склонен тратить время на поиски решения), я прошу потерпеть еще некоторое время (или, если хотите, можете сразу заглянуть в §5.9). Всему свое время – сначала я попытаюсь объяснить некоторые фундаментальные квантовые идеи, а затем приведу решение.

На данном этапе рассуждения необходимо лишь отметить: одно то, что эта задача имеет-таки решение (квантовомеханическое), уже указывает на глубинное различие между квантовой и классической физикой. При классическом подходе выяснить, не заклинило ли детонатор бомбы, можно только посредством приложения к нему какого-либо реального физического усилия (при этом, если детонатор исправен, бомба взрывается, и эксперимент считается благополучно проваленным). В рамках квантовой теории возможны и иные варианты – например, физический эффект, являющийся результатом того, что к детонатору могло быть приложено усилие, в то время как в действительности ничего подобного не произошло. В этом, собственно, и состоит одна из наиболее любопытных особенностей квантовой теории: реальный физический эффект здесь вполне может являться результатом контрфактуальных (как говорят философы) действий, т.е. действий, которые могли произойти, хотя на деле и не произошли. При рассмотрении следующей Z-загадки мы убедимся, что контрфактуальность играет далеко не последнюю роль и в ситуациях иного рода.

§5.3. Магические додекаэдры

В качестве предисловия к нашей второй Z-загадке позвольте мне рассказать вам небольшую историю, не лишённую, впрочем, некоторой головоломности.⁴ Представьте себе, получил я не так давно по почте замечательно выполненный правильный додекаэдр (рис. 5.2). Отправитель – компания «Квинтэссенциальные Товары», предприятие с превосходной репутацией и штаб-квартирой на одной из планет далекого красного гиганта, известного нам под названием Бетельгейзе. Точно такой же додекаэдр они отослали и моему коллеге, который в настоящий момент проживает на планете, обращающейся вокруг альфы Центавра, что приблизительно в четырех световых годах отсюда. Мне также стало известно, что его додекаэдр прибыл к нему примерно в то же время, что и мой ко мне. На каждой вершине обоих додекаэдров имеется по кнопке. Нам с коллегой предлагается нажимать кнопки на наших додекаэдрах – по одной за раз. Выбор кнопок, порядок и время их нажатия оставлены целиком и полностью на наше усмотрение. Иногда при нажатии кнопки ничего не происходит, в каковом случае нам следует перейти к следующей кнопке. Может, впрочем, произойти следующее событие: зазвонит звонок, за чем последует впечатляющий фейерверк, сопровождающийся полным разрушением данного конкретного додекаэдра.

В коробку вместе с каждым додекаэдром был вложен перечень свойств, гарантированно присущих как моему додекаэдру, так и додекаэдру моего коллеги. Прежде всего нам следует очень тщательно расположить наши додекаэдры в пространстве таким образом, чтобы они были сориентированы совершенно одинаково. «Квинтэссенциальные Товары» предоставили и подробные инструкции, описывающие, как именно нужно располагать наши додекаэдры относительно, скажем, центров Туманности Андромеды и галактики М-87 и т.д. Самое главное здесь – добиться полной идентичности в ориентации наших двух додекаэдров. Перечень гарантированных свойств достаточно обширен, но нам понадобятся лишь некоторые из них, да и те довольно просты.

Следует учесть, что компания «Квинтэссенциальные Товары» производит подобные вещи уже очень долго – скажем, сотню миллионов лет или около того, – и никто никогда не смог уличить ее в том, что гарантированные ею свойства поставляемых устройств не соответствуют действительности. Эта надежность и составляет основу той безупречной репутации, которую компания поддерживает вот уже миллион столетий, поэтому мы можем быть совершенно уверены – если компания заявляет, что ее товар обладает тем или иным свойством, то так оно,

⁴ См. [296], [299] и [396].

безусловно, и есть. Более того, компания объявила, что выплатит некую ошеломительную ПРЕМИЮ любому, кто обнаружит-таки в гарантированных свойствах обман или ошибку, и никто пока за вознаграждением не обращался!

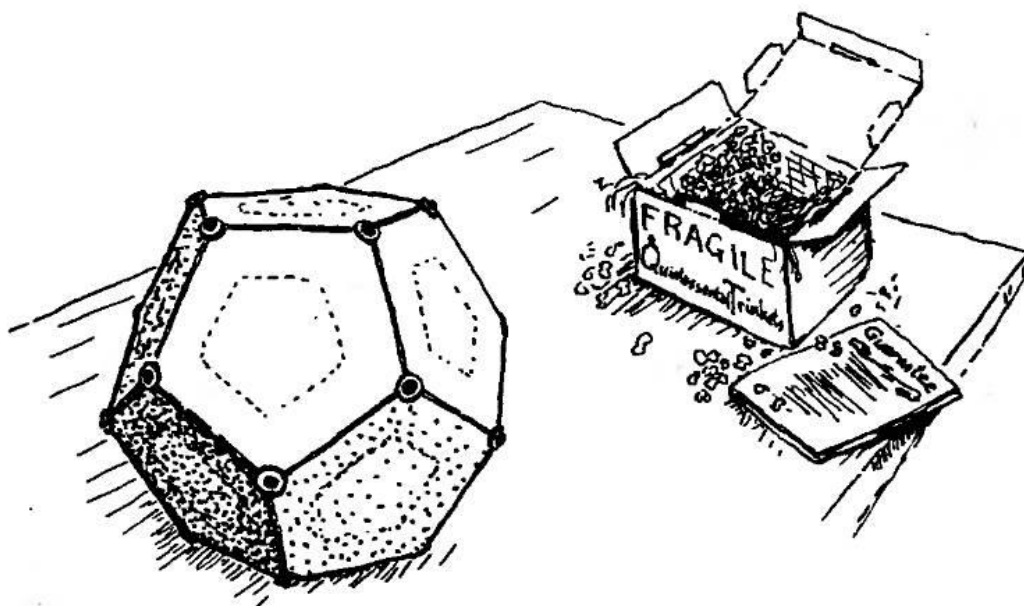


Рис. 5.2. Магический додекаэдр. У моего коллеги из системы альфы Центавра есть точно такой же. На каждой из вершин имеется кнопка. Результатом нажатия на какую-либо из кнопок может стать звонок и впечатляющий фейерверк. (FRAGILE – НЕ БРОСАТЬ; Quintessential Trinkets – Квинтэссенциальные Товары; Guarantee – гарантии)

Нас с вами интересуют те из гарантированных свойств, которые касаются последовательности нажатия кнопок. Мы с коллегой независимо друг от друга выбираем одну из вершин своего додекаэдра. Такие вершины я буду называть **ВЫБРАННЫМИ**. Причем соответствующие кнопки мы не нажимаем. Вместо этого мы нажимаем по очереди (в любом порядке, как нам заблагорассудится) те три кнопки, что располагаются в вершинах, соседних с **ВЫБРАННОЙ**. Если при нажатии на одну из этих кнопок зазвонит звонок, то все операции с данным конкретным додекаэдром придется, разумеется, прекратить, однако он вполне может и не зазвенеть. Нам понадобятся следующие два свойства (см. рис. 5.3):

(а) если в качестве соответствующих **ВЫБРАННЫХ** вершин мы с коллегой вдруг выберем вершины диаметрально противоположные, то при одном из моих нажатий (на кнопки, соседние с **ВЫБРАННОЙ** вершиной) звонок может зазвенеть только в том случае, если он звенит при нажатии моим коллегой кнопки при диаметрально противоположной вершине, – независимо от порядка, в каком нам заблагорассудится упомянутые кнопки нажимать;

(б) если же в качестве соответствующих **ВЫБРАННЫХ** вершин мы с коллегой выберем одинаковые вершины (т.е. те, направления на которые из центров додекаэдров совпадают), звонок должен зазвенеть при нажатии, по крайней мере, на одну кнопку из наших общих шести.

Теперь я попробую сделать кое-какие выводы о правилах, которым должен подчиняться мой додекаэдр (независимо от того, что там происходит на альфе Центавра), на основании того простого факта, что «Квинтэссенциальные Товары» оказываются каким-то образом способны давать столь нерушимые гарантии, не имея ни малейшего представления о том, какие именно кнопки мне или моему коллеге придет в голову нажать. В качестве ключевого допущения предположим, что никакой дальнедействующей «связи» между моим додекаэдром и додекаэдром моего коллеги нет. Будем считать, что после того, как наши додекаэдры покинули «сборочный цех», они существуют отдельно и совершенно независимо друг от друга. Выводы следующие (рис. 5.4):

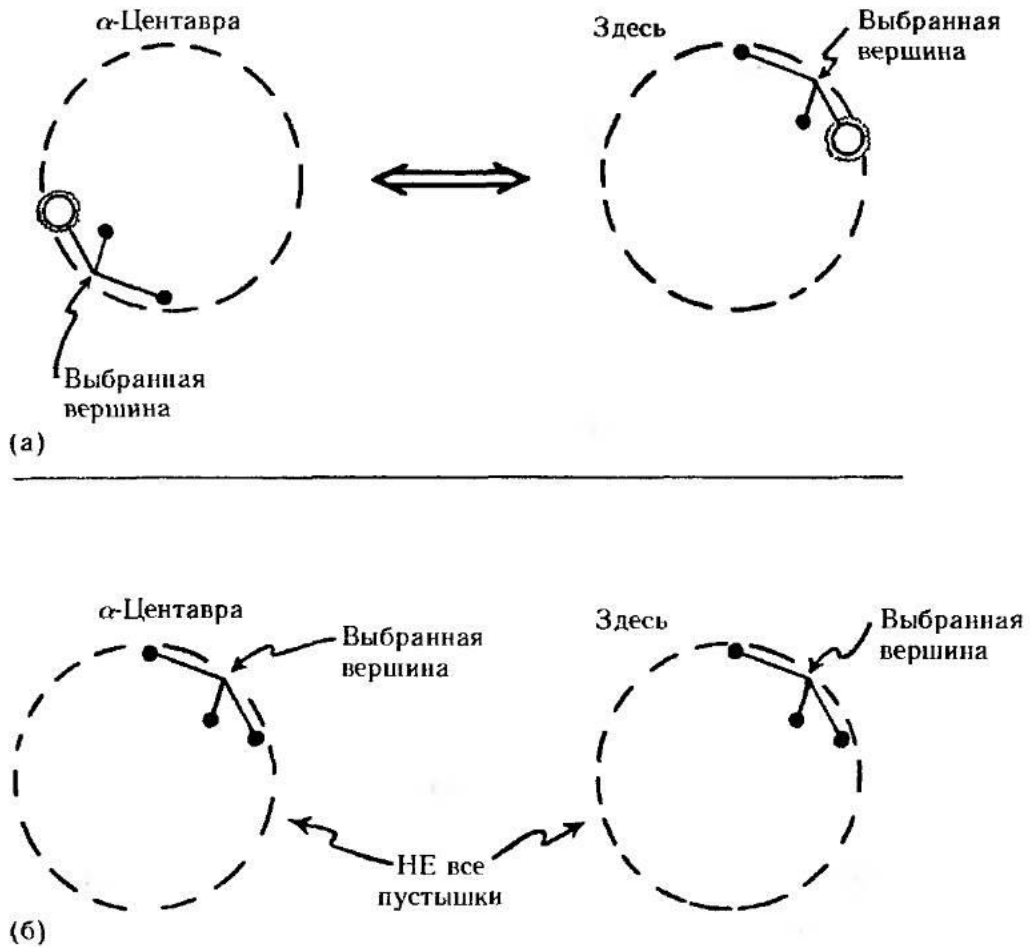


Рис. 5.3. Свойства додекаэдров, гарантируемые компанией «Квинтэссенциальные Товары». (а) Если мы с коллегой **ВЫБИРАЕМ** противоположные вершины додекаэдра, то звонок может зазвенеть только при нажатии диаметрально противоположных кнопок, независимо от порядка нажатия. (б) Если мы **ВЫБИРАЕМ** одинаковые вершины, то при нажатии какой-то из шести кнопок звонок непременно зазвенит.



Рис. 5.4. Предположим, что наши додекаэдры представляют собой независимые (никак не связанные друг с другом) объекты. Тогда каждая кнопка на моем додекаэдре заведомо является либо звонком (БЕЛЫЕ кнопки), либо пустышкой (ЧЕРНЫЕ кнопки), при этом две соседние кнопки не могут обе быть БЕЛЫМИ, и никакой набор из шести кнопок при вершинах, соседних с двумя антиподальными вершинами, не может состоять из одних ЧЕРНЫХ кнопок.

(в) каждая из кнопок при вершинах моего додекаэдра заведомо является либо звонком (обозначим такие вершины БЕЛЫМ цветом), либо пустышкой (обозначим ЧЕРНЫМ), при этом ее «звонковость» никак не зависит от того, нажимаю я ее первой, второй или третьей из кнопок при вершинах, соседних с ВЫБРАННОЙ;

(г) две «следующие соседние» кнопки не могут обе быть звонками (т.е. БЕЛЫМИ кнопками);

(д) никакой набор из шести кнопок при вершинах, соседних с двумя антиподальными вершинами, не может состоять из одних пустышек (т.е. ЧЕРНЫХ кнопок). (Антиподальными я здесь называю диаметрально противоположные вершины одного додекаэдра.)

Утверждение (в) мы выводим из того факта, что вполне может случиться так, что мой коллега выберет в качестве ВЫБРАННОЙ вершины вершину, диаметрально противоположную моей ВЫБРАННОЙ вершине; по крайней мере, «Квинтэссенциальным Товарам» неоткуда узнать заранее, что он ее не выберет (вот она, контрфактуальность!). Таким образом, если в результате какого-либо из моих нажатий зазвенит звонок, то кнопка при диаметрально противоположной вершине додекаэдра моего коллеги (если он нажмет ее первой из трех) тоже должна быть звонком. Так должно быть вне зависимости от того, в каком порядке я решил нажимать свои собственные три кнопки, а значит (исходя из допущения об отсутствии «связи» между додекаэдрами), мы с полной уверенностью можем сказать, что «Квинтэссенциальные Товары» изначально сделали кнопку при этой конкретной вершине звонком (в каком бы порядке я ни нажимал на свои кнопки), дабы избежать противоречия со свойством (а).

Аналогичным образом, из свойства (а) выводится утверждение (г). Предположим, что обе кнопки при двух следующих соседних вершинах являются звонками. Какую бы из этих кнопок я ни нажал первой, зазвенит звонок. Предположим теперь, что ВЫБРАННОЙ вершиной я назначил вершину, соседнюю им обеим. В этом случае порядок, в котором я нажимаю на свои кнопки, уже имеет значение, что противоречит свойству (а), если ВЫБРАННАЯ вершина додекаэдра моего коллеги противоположна ВЫБРАННОЙ вершине моего додекаэдра (а уж возможность такого совпадения «Квинтэссенциальные Товары» наверняка должны были учесть).

Наконец, учитывая то, что мы уже выяснили, мы легко выведем утверждение (д) из свойства (б). Предположим, что мы с коллегой выбираем в качестве ВЫБРАННЫХ одинаково расположенные вершины своих додекаэдров. Если ни одна из моих трех кнопок, соседних с ВЫБРАННОЙ вершиной, не является звонком, то, согласно (б), звонком должна оказаться одна из трех соответствующих кнопок на додекаэдре моего коллеги. Из (а) следует, что кнопка моего додекаэдра, противоположная звонку на додекаэдре моего коллеги, также должна быть звонком. Получается (д).

А теперь, собственно, головоломка. Попробуйте окрасить каждую вершину додекаэдра в БЕЛЫЙ или ЧЕРНЫЙ цвет, строго следуя правилам (г) и (д). Очень скоро вы обнаружите, что как бы вы ни старались, ничего хорошего из этого не получается. В таком случае вот вам головоломка получше: докажите, что раскрасить вершины додекаэдра таким образом невозможно. Для того, чтобы дать всякому достаточно заинтригованному читателю шанс найти решение самостоятельно, я скромно помолчу до Приложения В (с. 467), где и приведу свое (боюсь, не очень изящное) доказательство того, что подобная раскраска действительно невозможна. Может быть, кому-то из читателей придет в голову что-нибудь более остроумное.

Неужели? Неужели, впервые за миллион столетий, «Квинтэссенциальные Товары» допустили наконец ошибку? Убедившись, что раскрасить вершины моего додекаэдра в соответствии с правилами (в), (г) и (д) невозможно, и ни на секунду не забывая о величине ожидающей нас ПРЕМИИ, мы, подпрыгивая на месте от нетерпения, ждем четыре (приблизительно) долгих года, по истечении которых приходит сообщение от моего коллеги, в котором подробно описано, какие он нажимал кнопки и когда, и не звенел ли звонок в его додекаэдре. Ознакомившись с сообщением, мы впадаем в уныние, а все наши надежды на ПРЕМИЮ тают как снег в жаркий день, потому что «Квинтэссенциальные Товары» снова подтвердили свою безупречную репутацию!

Рассуждения, приведенные в Приложении В (с. 467), однозначно демонстрируют, что в рамках любой классической модели просто-напросто не существует способа построить магические додекаэдры, обладающие теми свойствами, на которые «Квинтэссенциальные Товары» с такой легкостью выдают безусловную гарантию, – не существует, если исходить из допущения, что по окончании сборки два додекаэдра представляют собой абсолютно отдельные, никак не связанные друг с другом объекты. Ибо никто не в состоянии гарантировать наличие у двух

додекаэдров требуемых свойств (а) и (б) без того, чтобы эти додекаэдры не были неким таинственным образом «связаны» друг с другом.

По крайней мере, в тот момент, когда мы начинаем нажимать на кнопки, эта «связь» должна наличествовать – кроме того, природа ее такова, что передача сигнала на расстояние около четырех световых лет осуществляется, по всей видимости, мгновенно. И всё же «Квинтэссенциальные Товары» почему-то считают для себя возможным предоставлять такие гарантии – гарантии невозможного! – и никто до сих пор не смог уличить их в ошибке.

В чем же здесь подвох? Как «Квинтэссенциальные товары» – или «КТ», эта аббревиатура хорошо известна многим их клиентам – умудряются проделывать такие фокусы? Вы говорите, вам всегда казалось, что КТ – это квантовая теория? Пусть так, не буду спорить. Так вот, что делают «КТ» – они просто берут и подвешивают в центре каждого из наших додекаэдров по одному атому, спин которого равен $3/2$, ни больше ни меньше. Эти два атома производятся на Бетельгейзе изначально вместе (общий спин пары равен 0), а затем аккуратно разделяются и помещаются в центры двух додекаэдров; общий спин связанной пары атомов при этом так и остается равным 0. (О том, что всё это означает, мы поговорим в §5.10.) В результате, когда я нажимаю кнопку при одной из вершин своего додекаэдра (то же относится и к моему коллеге с его додекаэдром), производится некое измерение спина (неполное) в направлении от центра додекаэдра к данной конкретной вершине. Если результат измерения оказывается утвердительным, то звенит звонок, и через некоторое время додекаэдр рассыпается замечательным фейерверком. Более подробно о природе этого измерения я расскажу позднее (см. §5.18), а также покажу в §5.18 и Приложении В, почему правила (а) и (б) являются следствием из стандартных правил квантовой механики.

Замечательный вывод, который из всего этого следует, заключается в том, что допущение об отсутствии дальнодействующей «связи» между додекаэдрами к квантовой теории неприменимо! На пространственно-временной диаграмме (рис. 5.5) хорошо видно, что наши с коллегой нажатия на кнопки представляют собой пространственноподобно разделенные события (см. §4.4 {= МОИ № 17}): согласно теории относительности, никакой обмен сигналами, передающими информацию о том, какие кнопки мы нажимаем или какие кнопки (на моей или на его стороне) окажутся в действительности звонками, между нами невозможен. Квантовая же теория, напротив, вполне допускает существование некоей «связи», соединяющей наши додекаэдры через пространственноподобно разделенные события. Вообще говоря, эту «связь» нельзя использовать для передачи непосредственно «пригодной к употреблению» информации, и в этом смысле никакого операционного конфликта между специальной теорией относительности и квантовой теорией нет. Имеет место лишь конфликт с духом специальной теории относительности – что, собственно, и является превосходной иллюстрацией одной из наиболее глубоких Z-загадок квантовой теории, феномена квантовой нелокальности. Два атома в центрах наших додекаэдров образуют сцепленное состояние, и, согласно правилам стандартной квантовой теории, их нельзя считать отдельными независимыми объектами.

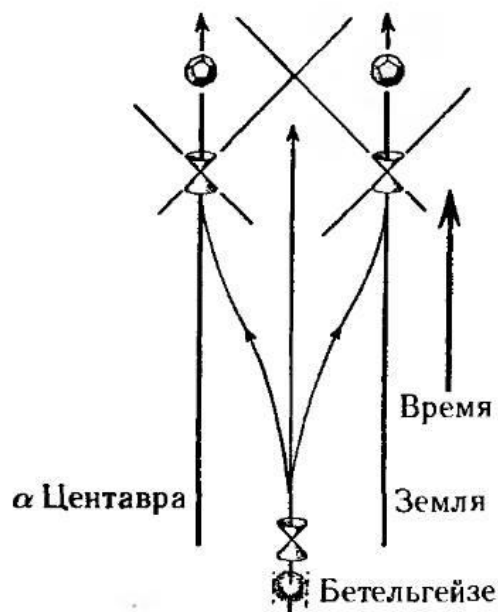


Рис. 5.5. Пространственно-временная диаграмма истории двух додекаэдров. Прибытие моего додекаэдра на Землю и прибытие додекаэдра моего коллеги на альфу Центавра – пространственноподобно разделенные события.

§5.4. Z-загадки ЭПР-типа: экспериментальный статус

Вышеприведенный эксперимент (мысленный, конечно же) относится к классу так называемых ЭПР-измерений, впервые описанных в знаменитой статье Альберта Эйнштейна, Бориса Подольского и Натана Розена, опубликованной в 1935 году [113] (отсюда и название; подробнее

об ЭПР-эффектах мы поговорим в §5.17). В оригинальном варианте статьи речь шла, правда, не о спине, а об определенных комбинациях положения и импульса. Впоследствии Дэвид Бом включил в рассмотрение и спины – на примере пары частиц со спином $1/2$ – (скажем, электронов), испускаемых из некоего источника в связанном состоянии со спином 0. На первый взгляд, из этих мысленных экспериментов следует, что измерение, произведенное в некоторой точке пространства на одной из частиц, составляющих квантовую пару, может мгновенно оказать некое весьма специфическое «воздействие» на другую частицу пары, причем эта другая частица может находиться на произвольно большом расстоянии от первой частицы. Впрочем, этим «воздействием» нельзя воспользоваться для передачи сколько-нибудь полезного послания от одной частицы к другой. В терминах квантовой теории говорят, что такие две частицы находятся в состоянии сцепленности друг с другом. Феномен квантовой сцепленности – истинная Z-загадка – был впервые отмечен Эрвином Шрёдингером [335].

Много позже Джон Белл в своей знаменитой теореме (1966, [21]) показал, что совместные вероятности различных измерений спина, производимых на любой паре сцепленных частиц, связаны определенными математическими соотношениями (известными ныне как неравенства Белла), с необходимостью следующими из того, что упомянутые частицы представляют собой отдельные независимые друг от друга сущности – каковыми они, собственно, и являются с точки зрения обыкновенной классической физики. Однако в квантовой теории эти соотношения могут нарушаться, причем весьма специфическим образом. Следовательно, открывается возможность для проведения реальных экспериментов с целью выяснить, наконец, действительно ли в реальных физических системах эти соотношения нарушаются, как утверждает квантовая теория, или же мы пока можем положиться на классическое представление, согласно которому пространственно разделенные объекты никоим образом не могут влиять друг на друга, а неравенства Белла с необходимостью выполняются. (Соответствующие примеры можно найти в НРК, с. 284, 301 {= [МОИ № 15, с.107](#)}).

В качестве наглядного примера того, чего не следует искать в понятии сцепленности, Джон Белл любил приводить носки Бертлмана. Бертлманом звали его коллегу, который неизменно появлялся на людях в носках разного цвета. Об этой причуде Бертлмана знали все. (Я сам встречал Бертлмана однажды, и на основании собственных наблюдений могу подтвердить: носки его действительно были разного цвета.) Таким образом, если кому-нибудь случалось заметить, что, скажем, левый носок Бертлмана сегодня, скажем, зеленого цвета, то этот кто-то мгновенно обретал знание о том, что правый носок Бертлмана зеленым не является. Тем не менее, вряд ли будет разумным сделать отсюда вывод, что левый носок Бертлмана способен неким таинственным образом оказывать мгновенное воздействие на правый носок Бертлмана. Эти два носка представляют собой независимые друг от друга объекты, и для того, чтобы «свойство отличия носков» всегда выполнялось, нет никакой нужды прибегать к услугам «Квинтэссенциальных Товаров». Такой эффект может быть легко организован силами самого Бертлмана, который возьмет себе за правило всегда, что бы ни случилось, надевать на ноги разные по цвету носки. Носки Бертлмана не вступают в противоречие с неравенствами Белла; никакой дальнедействующей «связи» между носками нет. Однако в случае магических додекаэдров производства «КТ» никакая «бертлмано-носочная» трактовка не в состоянии объяснить гарантированные свойства фигур. Именно в этом, собственно, и заключалась главная мысль предыдущего параграфа.

Через несколько лет после опубликования работы Белла был предложен⁵ и впоследствии проведен⁶ ряд натуральных экспериментов. Кульминационным стал знаменитый парижский эксперимент Алена Аспекта (совместно с группой коллег, 1981), в рамках которого исследовалось поведение фотонов, образующих «сцепленную» пару (см. §5.17): фотоны излучались в противоположных направлениях и улавливались детекторами, разнесенными на расстояние приблизительно 12 метров. Эксперимент блестяще оправдал возложенные на него надежды, установив физическую реальность Z-загадок ЭПР-типа (в полном соответствии с предсказанием стандартной квантовой теории) – и нарушив все, какие только можно, неравенства Белла (рис. 5.6).

⁵ Первый проект конкретного эксперимента такого рода был предложен Клаузером, Хорном и Шимони (см. [54] и [55]).

⁶ Первые эксперименты, результаты которых указывали на подтверждение предсказания квантовой нелокальности, были проведены Фридманом и Клаузером [125]; несколькими годами позже Аспект, Гранжье и Роже [14] получили существенно более полные и однозначные результаты (см. также [13]).



Рис. 5.6. ЭПР-эксперимент Алена Аспекта и его коллег. Пары фотонов в сцепленном состоянии испускаются из источника. Решение о том, с какой стороны от источника измерять поляризацию фотона, принимается уже после того, как фотоны устремляются в разных направлениях, исключая возможность передачи «сообщения» об этом решении от одного фотона другому.

Следует, впрочем, упомянуть, что несмотря на весьма хорошее согласие между результатами эксперимента Аспекта и предсказаниями квантовой теории, до сих пор есть еще физики, отнюдь не считающие, что эти результаты как-то подтверждают существование феномена квантовой нелокальности. Они указывают на то, что детекторы фотонов в эксперименте Аспекта (и в прочих подобных опытах) не обладали достаточной чувствительностью, вследствие чего большую часть испущенных пар фотонов экспериментаторы в конечном итоге просто упустили. Последующая аргументация неизбежно приводит к следующему: если чувствительность детекторов повысить до некоторой пороговой степени, то пресловутое превосходное согласие между результатами наблюдений и предсказаниями квантовой теории рассеется как дым, немедленно восстановив в правах все те соотношения, которые, согласно Беллу, должны выполняться в любой локальной классической системе. Мне представляется крайне маловероятным, что то практически идеальное согласие квантовой теории и эксперимента, которое демонстрирует эксперимент Аспекта (см. рис. 5.7), окажется вдруг артефактом – более того, следствием недостаточной чувствительности детекторов. Еще менее правдоподобным выглядит предположение о том, что более совершенные детекторы каким-то образом это согласие ослабят – причем ослабят до такой степени, что можно будет говорить о справедливости в данном случае неравенств Белла.⁷

⁷ (*4) Известно еще одно «классическое» объяснение тех ЭПР-эффектов, что наблюдались Аспектом и прочими экспериментаторами. Объяснение это (так называемый «коллапс с запаздыванием») предложил Юэн Сквайрс [356], исходя из допущения, что реальные моменты выполнения измерения детекторами в двух удаленных друг от друга точках может разделять довольно существенный промежуток времени. Это допущение рассматривается в контексте некоей теории – само собой, нетрадиционной, вроде тех, что встретятся нам в §6.9 или §6.12, – где делаются вполне конкретные предсказания относительно вероятного момента времени, в который реально выполняется каждое из двух квантовых измерений. Поскольку оба эти момента подвержены влиянию всевозможных случайных факторов, ничто не мешает предположить, что один из детекторов выполнит измерение существенно раньше, чем другой, – настолько раньше, что этого времени вполне хватит на то, чтобы сигнал от первого детектора, распространяясь со скоростью света, достиг второго детектора и передал ему информацию о результате выполненного измерения.

Согласно такой точке зрения, всякое квантовое измерение сопровождается «информационной волной», распространяющейся со скоростью света в направлении от события измерения. Это представление полностью согласуется с классической теорией относительности (см. §4.4 {= МОИ № 17}), однако противоречит, на достаточно больших расстояниях, квантовой теории. В частности, коллапсом с запаздыванием невозможно объяснить описанные в §5.3 свойства магических додекаэдров. Разумеется, соответствующего «эксперимента» пока еще никто не проводил, и можно вполне безнаказанно уверять себя в том, что уж в этом-то случае предсказания квантовой теории нипочем не подтвердятся. У меня, однако, имеется и более серьезное возражение: попытка применения теории «коллапса с запаздыванием» к другим квантовым измерениям сталкивается с серьезными трудностями, приводящими в конечном итоге к нарушению всех стандартных законов сохранения. Например, два достаточно разнесенных детектора смогут при таком раскладе уловить одну и ту же, скажем, α -частицу, испускаемую при распаде радиоактивного атома, что разом нарушает законы сохранения энергии, электрического заряда и барионного числа! (При достаточно большом расстоянии между детекторами «информационной волне» от первого детектора просто-напросто не хватит времени для того, чтобы успеть «предупредить» второй детектор, запретив ему тем самым принимать ту же α -частицу.) Впрочем, «статистически» законы

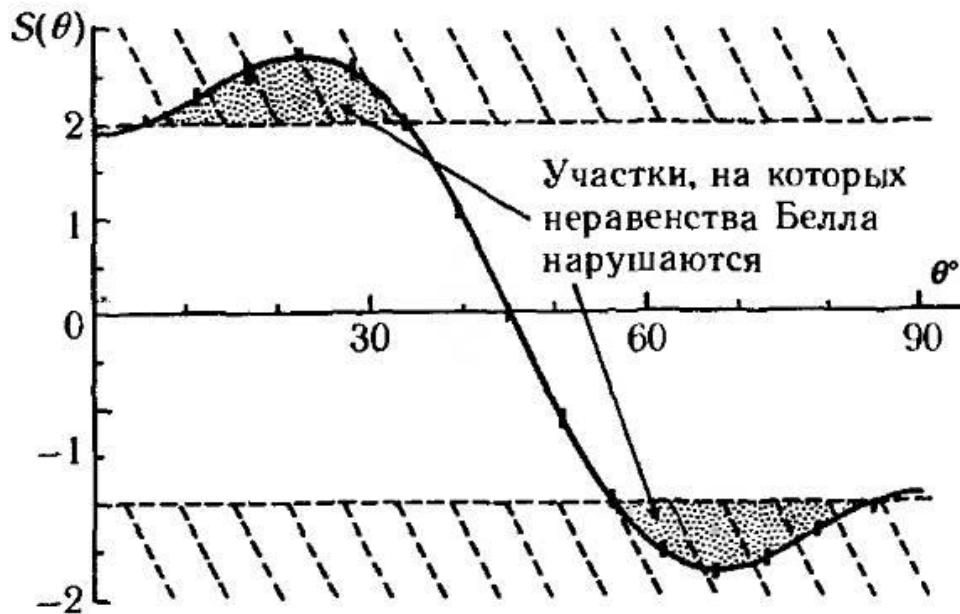


Рис. 5.7. Результаты эксперимента Аспекта очень хорошо согласуются с предсказаниями квантовой теории и совершенно не вписываются в классические неравенства Белла. Неясно, каким образом более совершенные детекторы могут этому согласию помешать.

Первоначально Белл получил соотношения между совместными вероятностями различных возможных событий (неравенства Белла). Для того, чтобы оценить действительные вероятности событий в рамках того или иного физического эксперимента, необходимо прежде накопить достаточный объем результатов наблюдений, а затем подвергнуть их соответствующему статистическому анализу. Не так давно был предложен ряд альтернативных проектов экспериментов (гипотетического характера), построенных исключительно на принципе «да/нет» и не нуждающихся в каком бы то ни было учете вероятностей. Первый из этих недавних проектов, разработанный в 1989 году Гринбергером, Хорном и Цайлингером [170], включает в себя измерение спина на частицах со спином $1/2$ в трех отдаленных друг от друга точках (скажем, на Земле, на альфе Центавра и на Сириусе – на случай, если этим проектом вдруг заинтересуются «Квинтэссенциальные Товары»). Ранее (в 1967 году) очень похожую идею выдвинули Кохен и Спекер [225], только они предполагали использовать частицы со спином 1 и чрезвычайно сложные геометрические конфигурации; да и сам Белл еще в 1966 году также работал над чем-то подобным, хотя и не столь конкретным [21]. (Эти ранние исследования, разумеется, не формулировались сразу в терминах ЭПР-феноменов; соответствующая переформулировка была предложена в 1983 году Хейвудом и Редхедом [197], см. также [358].⁸) Приведенный выше пример с додекаэдрами хорош тем, что его геометрия весьма проста и легко представима визуально.⁹ (Предлагались также эксперименты для изучения феноменов, эквивалентных уже упомянутым примерам Z-загадок, но иных физически; [394].)

§5.5. Фундамент квантовой теории: исторический экскурс

Каковы же фундаментальные принципы квантовой механики? Прежде, чем мы перейдем непосредственно к поискам ответа на этот вопрос, я хотел бы пригласить читателя на небольшую историческую экскурсию с целью проследить происхождение двух важнейших математических ингредиентов современной квантовой теории. При этом выяснятся совершенно замечательные (и

сохранения в данном случае всё равно действуют, и мне не известно ни об одном реальном измерении, опровергающем это допущение. Одну из последних оценок статуса соответствующей теории можно найти в [204].

⁸ Как сообщил мне Абнер Шимони, Кохен и Спекер к тому времени уже самостоятельно пришли к соответствующей переформулировке.

⁹ (*6) Примеры с другими геометрическими конфигурациями можно найти в [305], [260] и [299].

малоизвестные широкой публике) вещи: во-первых, оба этих ингредиента появились, причем независимо друг от друга, еще в XVI веке, а во-вторых, придумал их один и тот же человек!

Человек этот, Джероламо Кардано (рис. 5.8), родился 24 сентября¹⁰ 1501 года в итальянском городе Павия, стал, помимо прочего, лучшим и известнейшим врачом своего времени и умер 20 сентября¹¹ 1576 года в Риме. Несмотря на то, что его жизнь представляет собой один сплошной скандал (начиная с того, что союз его родителей не был освящен церковью, и заканчивая арестом и заключением в тюрьму уже самого Кардано на закате его жизни), он был человеком выдающегося ума и личных качеств, о чем, к сожалению, сегодня мало кому известно. Надеюсь, читатель простит меня, если я ненадолго отвлекусь от собственно квантовой механики и коротко расскажу об этом неординарном человеке.

В самом деле, в квантовой механике он совершенно неизвестен – зато его имя (всё лучше, чем ничего) хорошо знакомо автомеханикам. Карданным валом называется универсальное устройство, соединяющее коробку передач автомобиля с его задними колесами и обеспечивающее гибкость, необходимую для поглощения переменного вертикального движения подпрессоренной задней оси. Прототип этого изобретения Кардано создал приблизительно в 1545 году, а в 1548 уже смог встроить его в шасси кареты, предназначенной для императора Карла V, что весьма скрасило тому путешествия по разбитым ухабистым дорогам. Кардано изобрел и многие другие полезные вещи – например, кодовый замок, аналогичный тем, что используются в современных сейфах. Как врач, Кардано достиг широчайшей известности; среди его пациентов были короли и принцы. Он совершил множество открытий в медицине и написал немало книг на медицинские и другие темы. По всей видимости, именно Кардано первым указал, что такие венерические болезни, как сифилис и гонорея, представляют собой разные болезни и требуют, соответственно, различного лечения. Он же первым предложил лечить больных туберкулезом «санаторно» – на 300 лет раньше Джорджа Боддингтона, который в 1830 году, в сущности, «переоткрыл» уже известное. В 1552 году Кардано вылечил Джона Гамильтона, архиепископа Шотландского, страдавшего астмой в тяжелой форме, – и оказал тем самым серьезное влияние на историю Британии.

Какое же отношение все эти впечатляющие достижения имеют к квантовой теории? Совершенно никакого, разве что демонстрируют широту ума человека, которому мы фактически обязаны открытием двух наиболее фундаментальных составляющих этой самой теории, причем открытия эти никак одно с другим не связаны. Кардано был выдающимся врачом и выдающимся изобретателем, однако этими областями деятельности он не ограничивался – он был еще и выдающимся математиком.

Первая из упомянутых составляющих – теория вероятностей. Как известно, квантовая теория является теорией скорее вероятностной, нежели детерминистской. Сами ее правила фундаментально обусловлены вероятностными законами. В 1524 году Кардано написал свою «Книгу об азартных играх» («*Liber de Ludo Aleae*»), где заложил основы математической теории вероятностей. Описанные в книге законы Кардано сформулировал несколькими годами ранее и не преминул ими воспользоваться. Применение свежесооткрытых законов на практике (а вот и



Рис. 5.8. Джероламо Кардано (1501–1576). Выдающийся врач, изобретатель, игрок, писатель и математик. Первооткрыватель комплексных чисел и теории вероятности – фундаментальных составляющих современной квантовой теории.

¹⁰ В.Э.: 4 октября по нашему календарю, который тогда еще не был введен, но будет введен в конце того же столетия (в 1582 году).

¹¹ В.Э.: По данным всех моих энциклопедий – 21 сентября, что составляет 1 октября по Григорианскому календарю.

выдающийся игрок!) принесло ему достаточно денег для того, чтобы заплатить за обучение в медицинской школе в Павии. По всей видимости, Кардано с самых юных лет знал, что зарабатывать деньги шугерством – занятие весьма рискованное, поскольку именно в результате подобной деятельности был убит бывший муж его матери. Джероламо же обнаружил, что, используя открытые им законы, управляющие самим случаем, выигрывать можно вполне честно.

Вторая фундаментальная составляющая квантовой теории, открытая Кардано, – понятие комплексного числа. Комплексным называется число вида

$$a + ib,$$

где под i понимается квадратный корень из минус единицы,

$$i = \sqrt{-1},$$

а a и b суть обычные вещественные числа (т.е. числа, которые можно представить в виде десятичных дробей). Сегодня мы называем число a вещественной частью комплексного числа $a + ib$, а число b – его мнимой частью. На эти странные числа Кардано наткнулся, пытаясь отыскать способ решения общего кубического уравнения. Кубическими называются уравнения вида

$$Ax^3 + Bx^2 + Cx + D = 0,$$

где A , B , C и D – некоторые заданные вещественные числа, а уравнение следует решать относительно x . В 1545 году Кардано опубликовал трактат под названием «*Ars magna*»¹², где и привел первый полный анализ решения таких уравнений.

С публикацией этого решения связана пренеприятнейшая история. Еще в 1539 году учитель математики Николо Фонтана, более известный по прозвищу Тарталья (что в переводе с итальянского означает «заика»), отыскал общее решение для некоторого широкого класса кубических уравнений. Тогда же Кардано подослал к нему одного своего приятеля, чтобы тот выведал у Тартальи, как выглядит это решение. Тарталья, однако, не пожелал о нем говорить, вследствие чего Кардано засел за работу и вскоре обнаружил искомое решение самостоятельно, опубликовав результат в 1540 году в своей книге «Практическая арифметика и простые измерения». Более того, Кардано удалось распространить свое решение на все возможные случаи; позднее Кардано описал этот общий аналитический метод решения в «*Ars magna*». В обеих книгах Кардано указывал на первенство Тартальи в отыскании решения для того класса случаев, где это решение применимо, однако в «*Ars magna*» он допустил ошибку, утверждая, что Тарталья дал ему разрешение на публикацию. Узнав об этом, Тарталья пришел в ярость и заявил, что он сам однажды рассказал Кардано (будучи у него в доме по какому-то делу) о своем решении, взяв с хозяина клятву, что тот никому и ни при каких обстоятельствах это решение не откроет. Как бы то ни было, Кардано оказался в непростой ситуации: публикуя свое решение, обобщающее ранее полученное решение Тартальи, он тем самым неизбежно раскрывал «тайну» этого частного случая. Единственным выходом, по всей видимости, было бы полное замалчивание уже полученных результатов и прекращение каких бы то ни было исследований в этой области – и вряд ли Кардано пошел бы на такое. Тарталья, однако, затаил на Кардано обиду и выжидал вплоть до 1570 года. Именно тогда, воспользовавшись тем, что репутация Кардано оказалась серьезно подмочена в силу других скандальных обстоятельств, Тарталья и нанес завершающий удар, приведший в конечном итоге к унижению и смерти Кардано. В тесном сотрудничестве с Инквизицией Тарталья собрал огромную коллекцию всевозможных улик против Кардано и лично организовал его арест и заключение под стражу. Освободили Кардано только в 1571 году, после того, как в Рим прибыл особый посланник от архиепископа Шотландского (которого, как мы помним, Кардано вылечил от астмы) с прошением об освобождении узника – «ученого, пекущегося лишь о сохранении и исцелении тел, дабы души Господни проживали в них весь отпущенный им срок».

Вышеупомянутые «скандальные обстоятельства» включают в себя, в частности, суд над старшим сыном Кардано, Джованни Баттистой, по обвинению в убийстве. На суде Джероламо, рискуя своей репутацией, выступил с поручительством за сына. Это не принесло им обоим ничего хорошего, поскольку Джованни был-таки виновен – он убил жену (женился он, впрочем, не по своей воле), пытаясь прикрыть еще одно совершенное им же убийство. По всей видимости, убийство жены Джованни совершил по наущению и при содействии своего младшего брата Альдо (еще больший, как выясняется, негодяй: тогда же он предал Джованни, а позднее выдал собственного отца Инквизиции; наградой Альдо стало назначение его палачом Инквизиции в

¹² «Великое искусство» (лат.) – Прим. перев.

Болонье). Не способствовала восстановлению репутации Кардано и его дочь, которая умерла от сифилиса, приобретенного благодаря ее профессиональной деятельности – проституции.

Интересное упражнение в исторической психологии – попытаться понять, как же так вышло, что Джероламо Кардано, любящий, судя по всему, отец, преданный жене и детям, и вообще честный и чуткий человек, не лишенный высоких устремлений, воспитал столь недостойное потомство.¹³ Несомненно, от семейных забот его часто отвлекали другие интересы, многочисленные и требующие немалого времени. Несомненно, его более чем годичное (когда ему пришлось ехать в Шотландию для лечения архиепископа, хотя в первоначальной договоренности речь шла лишь о встрече в Париже) отсутствие дома после смерти жены очень неблагоприятно сказалось на детях. Несомненно также, что в смерти жены непосредственно повинна убежденность Кардано в том, что ему самому звезды предсказали смерть в 1546 году, – чем ближе к этому сроку, тем больше погружался Кардано в лихорадочные исследования и запись еще не записанного, совершенно позабыв не только о детях, но и о жене, что и свело ее (а не его) в могилу к концу того самого года.

Сегодня Кардано известен гораздо меньше, чем он того заслуживает, и истоки этого забвения, как я подозреваю, кроются в его злосчастной судьбе и безнадежно запятнанной (совместными стараниями его детей, Инквизиции и – в особенности – Тартальи) репутации. В моей же личной «табели о рангах» он безоговорочно принадлежит к величайшим фигурам эпохи Возрождения. Несмотря на то, что Джероламо рос в бедности, на формирование его личности очень большое влияние оказала царившая в доме атмосфера стремления к знаниям. Его отец, Фацио Кардано, был увлечен геометрией; Джероламо вспоминал, как однажды, когда он был еще ребенком, отец взял его с собой в гости к Леонардо да Винчи и как взрослые засиделись за полночь, обсуждая какие-то геометрические задачи.

Что же касается опубликования Кардано раннего результата Тартальи и некорректного, мягко говоря, утверждения, что последний эту публикацию разрешил, то, думаю, большего уважения всё же заслуживает желание сделать свое открытие достоянием общественности, нежели стремление утаить новые знания. Разумеется, Тарталью тоже можно понять – от сохранения открытий в тайне зависел, до некоторой степени, его достаток (особенно если учесть, что Тарталья являлся завсегдатаем публичных математических состязаний), однако именно трактат Кардано, включающий решение Тартальи в качестве частного случая, оказал серьезное и долговременное влияние на развитие математической науки. Более того, раз уж мы затронули вопрос первенства, то оно, судя по всему, принадлежит и вовсе третьему ученому – Сципионе дель Ферро, преподававшему в Болонском университете вплоть до своей смерти в 1526 году. Во всяком случае, в записях дель Ферро имеется то решение, которое позднее заново открыл Тарталья, хотя остается неясным, понимал ли дель Ферро, каким образом это решение можно модифицировать для описания случаев, рассмотренных Кардано в «*Ars magna*»; отсутствуют также какие бы то ни было свидетельства в пользу того, что дель Ферро добрался до концепции комплексных чисел.

Для того, чтобы понять, в чем заключается фундаментальность вклада Кардано, рассмотрим решение кубического уравнения более подробно. Воспользовавшись подстановкой $x \rightarrow x + a$, нетрудно свести общее кубическое уравнение к виду

$$x^3 = px + q,$$

где p и q – вещественные числа. С такой подстановкой математики XVI века были прекрасно знакомы. Однако если вспомнить о том, что числа, которые мы сегодня называем отрицательными, в те времена далеко не все считали «настоящими» числами, то можно предположить, что во избежание появления в окончательном уравнении отрицательных чисел, получаемые в результате уравнения имели несколько иной вид – в зависимости от знака при p и q (например, $x^3 + p'x = q$ или $x^3 + q' = px$). Чтобы не усложнять рассуждения без необходимости, я буду в дальнейшем придерживаться современного способа записи.

Решения вышеприведенного кубического уравнения можно представить графически. Для этого построим кривые $y = x^3$ и $y = px + q$ и отметим точки их пересечения. Координаты x этих точек и будут искомыми решениями уравнения. Обратите внимание на рис. 5.9: функция $y = x^3$ представлена в виде кривой, а для прямой $y = px + q$ показаны несколько возможных вариантов.

¹³ В.Э.: Ну, раз он был азартным игроком, то не был никаким «книжным червем»; судя по всему, он был холериком, и всё его окружение холерично. Сам – внебрачный ребенок; отчим убит за шулерство... Ну, и холеричность детей проявлялась.

(Мне неизвестно, использовали ли Кардано или Тарталья такое графическое представление, хотя это вполне возможно. Здесь я использую его исключительно для удобства рассмотрения различных возможных случаев.) Те случаи, для которых годилось решение Тарталья, соответствуют в наших обозначениях прямым с отрицательным (или нулевым) p . В этих случаях прямая «опускается» слева направо, типичный пример – прямая P на рис. 5.9. Отметим, что в таких случаях всегда существует только одна точка пересечения прямой и кривой, т.е. кубическое уравнение имеет лишь одно решение. В современных обозначениях мы можем записать решение Тарталья следующим образом:

$$x = \sqrt[3]{\left(w - \frac{1}{2}q\right)} - \sqrt[3]{\left(w + \frac{1}{2}q\right)},$$

где

$$w = \sqrt{\left(\frac{1}{2}q\right)^2 + \left(\frac{1}{3}p'\right)^3}.$$

Через p' мы здесь обозначаем p ; сделано это для того, чтобы все входящие в выражение величины оставались неотрицательными (число q также выбирается положительным).

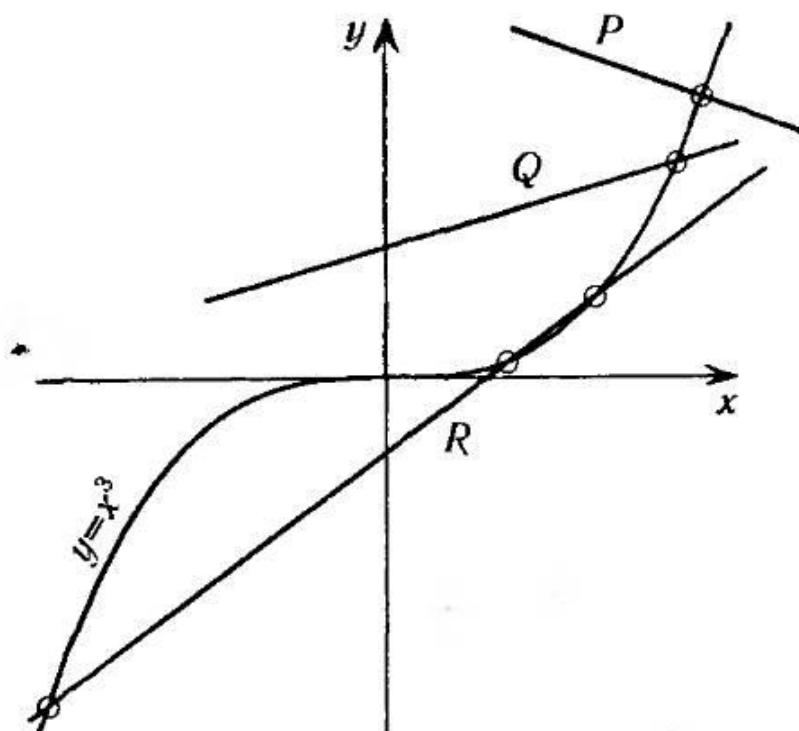


Рис. 5.9. Решения кубического уравнения $x^3 = px + q$ могут быть получены графически в виде точек пересечения прямой $y = px + q$ и кубической кривой $y = x^3$.

Обобщение Кардано этой процедуры учитывает также случаи $p > 0$ и позволяет записать решения для этих случаев (при положительном p и отрицательном q ; впрочем, знак при q погоды не делает). Соответствующие прямые «поднимаются» слева направо (обозначены на рисунке буквами Q и R). Мы видим, что при некотором заданном значении p (т.е. при заданном угле наклона) и достаточно большом (т.е. таком, чтобы прямая пересекала ось y в точке, расположенной достаточно высоко) q' (иначе говоря, $-q$) снова существует одно-единственное решение. Выражение Кардано для этого решения имеет вид (в современных обозначениях)

$$x = \sqrt[3]{\left(\frac{1}{2}q' + w\right)} - \sqrt[3]{\left(\frac{1}{2}q' - w\right)},$$

где

$$w = \sqrt{\left(\frac{1}{2}q'\right)^2 + \left(\frac{1}{3}p\right)^3}.$$

Вооружившись современными обозначениями и современной же концепцией отрицательного числа (а также учитывая тот факт, что кубический корень отрицательного числа равен отрицательному кубическому корню того же, но положительного числа), мы легко убеждаемся, что выражение Кардано, в сущности, идентично выражению Тартальи. Однако в случае Кардано в том же, казалось бы, выражении появляется нечто принципиально новое. Теперь при достаточно малом q' прямая может пересечь кривую в трех точках, т.е. у исходного уравнения окажется три решения (при $p > 0$ два из них отрицательны). Случай этот – так называемый *casus irreducibilis*¹⁴ возникает, когда $(\frac{1}{2}q')^2 < (\frac{1}{3}p)^3$; нетрудно видеть, что w оказывается при этом квадратным корнем из отрицательного числа. Таким образом, числа $\frac{1}{2}q' + w$ и $\frac{1}{2}q' - w$ под знаком кубического корня в выражении Кардано являются не чем иным, как комплексными числами; сумма же этих двух кубических корней, если мы хотим получить решение уравнения, должна быть вещественным числом.

Это таинственное обстоятельство не избежало внимания Кардано, и позднее в «*Ars magna*» он отдельно обратился к вопросу, поставленному появлением комплексных чисел в решении уравнения, на примере задачи об отыскании двух чисел, произведение которых равно 40, а сумма равна 10. Эту задачу он решил (причем решил правильно), получив в качестве ответа два комплексных числа:

$$5 + \sqrt{-15}$$

и

$$5 - \sqrt{-15}.$$

В графическом представлении задача сводится к отысканию точек пересечения кривой $xy = 40$ и прямой $x + y = 10$ (см. рис. 5.10). Отметим, что построенные на рисунке кривая и прямая нигде не пересекаются (в вещественных числах), что вполне согласуется с тем фактом, что для записи решения задачи требуются комплексные числа. Кардано эти новые числа в восторг отнюдь не приводили; он жаловался, что работа с ними «мучительна для разума». Тем не менее, изучая кубические уравнения, он вынужден был признать необходимость рассмотрения таких чисел.

Следует отметить, что необходимость в комплексных числах при записи решения кубического уравнения (представленного графически на рис. 5.9) обусловлена причинами, значительно более загадочными, нежели появление таких чисел в задаче, изображенной на рис. 5.10 (задача эта, в сущности, эквивалентна задаче отыскания корней квадратного уравнения $x^2 - 10x + 40 = 0$). В последнем случае вполне очевидно, что без привлечения комплексных чисел задача не имеет решения вовсе, и ничто не мешает нам объявить введение таких чисел безосновательной выдумкой, затеянной исключительно ради того, чтобы снабдить хоть каким-то «решением» уравнение, в действительности решений не имеющее. Эта позиция, однако, не объясняет, что происходит в случае кубического уравнения. Здесь (*casus irreducibilis* или прямая R на рис. 5.9) уравнение действительно имеет три

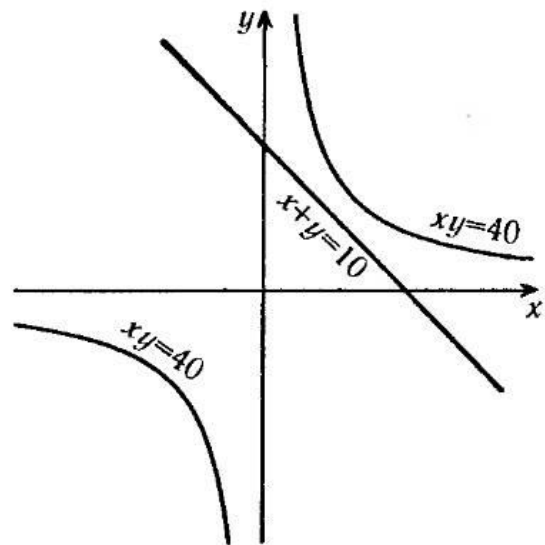


Рис. 5.10. Задача Кардано об отыскании двух чисел, произведение которых равно 40, а сумма равна 10, может быть представлена графически как отыскание точек пересечения кривой $xy = 40$ и прямой $x + y = 10$. При этом становится очевидным, что в вещественных числах эта задача решения не имеет.

¹⁴ Неприводимый случай (лат.). – Прим. перев.

вещественных решения, отрицать существование которых невозможно, однако для того, чтобы выразить любое из этих решений даже в иррациональных числах (т.е. в квадратных и кубических корнях, как в данном случае), нам приходится забираться в таинственные дебри комплексных чисел, хотя окончательный результат и принадлежит миру чисел вещественных.

Похоже, что до Кардано никто в эти таинственные дебри не углублялся и не задумывался над тем, каким образом из них «произрастает» наш собственный «вещественный» мир. (Снаружи заглядывали – например, Герон Александрийский и Диофант Александрийский в первом и, соответственно, в третьем веках нашей эры, судя по некоторым свидетельствам, размышляли над идеей существования у отрицательного числа чего-то вроде «квадратного корня»¹⁵, однако ни один из них не набрался храбрости объединить такие «числа» с числами вещественными и прийти таким образом к понятию комплексного числа; не разглядели они и глубинной связи между своими «псевдочислами» и вещественными решениями уравнений.) Возможно, именно удивительное сочетание в одном человеке двух личностей – мистика и рационально мыслящего ученого – позволило Кардано уловить эти первые проблески того, что развилось позднее в одну из мощнейших математических концепций. В последующие годы, благодаря трудам Бомбелли, Коутса, Эйлера, Весселя, Арганда,¹⁶ Гаусса, Коши, Вейерштрасса, Римана, Леви, Льюи и многих других, теория комплексных чисел разрослась вглубь и вширь и занимает сегодня заслуженное место среди наиболее изящных и универсально применимых математических конструкций. Однако лишь с появлением в первой четверти двадцатого века квантовой теории мы осознали, какую странную и всепронизывающую роль играют комплексные числа в самой фундаментальной структуре того физического мира, в котором мы живем, – не знали мы прежде и о том, насколько тесна связь между комплексными числами и вероятностями.¹⁷ Даже у Кардано не возникло (да и не могло возникнуть) ни малейшего подозрения о существовании таинственной глубинной связи между двумя величайшими его вкладами в математику – связи, которая образует самый фундамент материальной Вселенной на тончайшем из ее уровней.

§5.6. Основные правила квантовой теории

Что же это за связь? Что объединяет комплексные числа и теорию вероятностей, имея результатом неоспоримо превосходное описание работы тончайших внутренних механизмов нашего мира? Грубо говоря, законы комплексного исчисления справедливы на очень тонком подуровне феноменов, тогда как вероятности играют свою роль на узком мостике, что соединяет тот тонкий подуровень с хорошо знакомым нам уровнем обыденного восприятия, – от такого «объяснения», разумеется, проку немного; для сколько-нибудь реального понимания нам понадобится нечто более существенное.

Рассмотрим для начала роль комплексных чисел. В силу самого их определения их очень сложно принять в качестве инструмента для описания действительной физической реальности. Наибольшая сложность заключается в том, что им, на первый взгляд, просто нет места на уровне тех феноменов, что мы способны непосредственно воспринимать, на уровне, где действуют классические законы Ньютона, Максвелла и Эйнштейна.¹⁸ Таким образом, для того, чтобы наглядно представить себе, как именно работает квантовая теория, необходимо (хотя бы предварительно) учесть, что физические процессы происходят на двух четко разделенных уровнях: квантовом подуровне, где как раз и играют свою странную роль комплексные числа, и классическом уровне привычных макроскопических физических законов. На квантовом уровне

¹⁵ В.Э.: Разве в античное время уже имелась концепция отрицательного числа? Даже во времена Кардано эти числа еще «не признавали»... А вообще – как только концепция отрицательных чисел появилась, любого сколь-нибудь глубокого математического мыслителя должна была сразу озадачить очевидная и вопиющая несимметричность «числовой оси».

¹⁶ В.Э.: В этой книге («Тени разума») издатели фамилию Жана Робера Аргана (1768–1822) пишут как «Арганд». Хотя по-французски она действительно пишется *Argand*, но вообще-то в русскоязычной литературе принято написание по произношению: Арган (и так это имя писалось также в НРК – в переводе Первой книги Пенроуза {PENRO2 = МОИ № 14, с.114}).

¹⁷ В.Э.: Сами по себе «комплексные числа» не имеют никакой связи с вероятностями. Они имеют глубочайшую связь с ротацией – это «числа вращения». Именно через ротацию они и приобретают свою роль в квантовой механике.

¹⁸ В.Э.: Почему же нет места? Вращение Земли тоже можно описать «комплексными числами». Так, если в полдень мое расстояние до оси Земли равно r , то вечером оно равно ir , в полночь: $-r$, а утром: $-ir$.

комплексные числа выглядят вполне естественно – однако вся эта естественность напрочь пропадает, случись им забрести на уровень классический. Я вовсе не хочу сказать, что между уровнем, на котором действуют квантовые законы, и уровнем классически воспринимаемых феноменов непременно должно наличествовать физическое разделение; давайте просто вообразим (пока), что такое разделение существует – это поможет понять смысл процедур, реально применяемых в квантовой теории. Вопрос о существовании такого физического разделения в действительности очень глубок, и мы попытаемся на него ответить несколько позднее.

Где же начинается квантовый уровень? Надо думать, квантовым называется уровень тех физических объектов, которые «достаточно малы» – например, молекулы, атомы, элементарные частицы. Впрочем, на физические расстояния это требование «малости» распространяется далеко не всегда. Эффекты квантового уровня могут возникать и на огромном удалении. Вспомним о четырех световых годах, разделяющих два додекаэдра в моей истории в §5.3, или о двенадцати метрах, разделяющих фотоны во вполне реальном эксперименте Аспекта (§5.4). Иначе говоря, квантовый уровень определяется не малым физическим размером, но чем-то более тонким, причем на данном этапе этой «формулировкой» лучше и ограничиться. Можно также приблизительно считать квантовым уровень, где мы рассматриваем очень малые изменения в энергии. Более подробно мы обсудим этот вопрос в §6.12.

Классическим же мы называем уровень, который мы, как правило, воспринимаем непосредственно. Здесь действуют законы классической физики, оперирующие вещественными числами, здесь имеют смысл самые обычные описания – например, те, что задают положение, скорость движения и форму футбольного мяча. Существует ли какая-либо реальная физическая граница между квантовым уровнем и уровнем классическим? Вопрос этот, как я только что отметил, очень глубок и тесно связан с трактовкой X-загадок, или квантовых парадоксов (см. §5.1). Поиск ответа мы отложим до лучших времен, а пока, просто из соображений удобства, будем рассматривать квантовый уровень отдельно от классического.

Какую фундаментальную роль играют комплексные числа на квантовом уровне? Возьмем для примера отдельную частицу – скажем, электрон. В классической картине мира электрон может занимать либо положение А, либо какое-нибудь другое положение В. Однако в квантовомеханическом описании перед тем же электроном открываются гораздо более широкие возможности. Он не только может занимать то или иное из указанных положений, он может находиться и в любом из ряда возможных состояний, занимая при этом (в некотором строгом смысле) оба положения одновременно! Обозначим через $|A\rangle$ состояние, в котором электрон занимает положение А, а через $|B\rangle$ – состояние, в котором электрон занимает положение В.¹⁹ Тогда, согласно квантовой теории, электрону доступны следующие возможные состояния:

$$w|A\rangle + z|B\rangle,$$

причем фигурирующие здесь весовые коэффициенты w и z представлены комплексными числами (и по крайней мере одно из них должно быть отлично от нуля).

Что это означает? Если бы весовые коэффициенты были неотрицательными вещественными числами, то можно было предположить, что записанная комбинация представляет собой, в некотором смысле, взвешенное вероятностное ожидание положения электрона, где w и z символизируют относительные вероятности нахождения электрона в положении, соответственно, А и В. Тогда отношение $w : z$ даст отношение вероятности нахождения электрона в точке А к вероятности нахождения электрона в точке В. Таким образом, если этими двумя и исчерпываются доступные электрону положения, то мы получаем ожидание $w / (w + z)$ для электрона в точке А и ожидание $z / (w + z)$ для электрона в точке В. При $w = 0$ электрон определенно находится в точке В; при $z = 0$ ищите его в точке А, больше ему деться некуда. Если состояние электрона записывается как $|A\rangle + |B\rangle$, это означает, что электрон может с равной вероятностью оказаться как в положении А, так и в положении В.

¹⁹ Из соображений удобства я использую здесь предложенную Дираком стандартную систему обозначений для квантовых состояний (в данном случае, скобку «кет»). Читатели, незнакомые с квантовомеханическими обозначениями, могут пока не обращать на эти скобки внимания. Поль Дирак был одним из наиболее выдающихся физиков двадцатого столетия. Среди его достижений – общая формулировка законов квантовой теории, а также ее релятивистское обобщение, включающее в себя знаменитое «уравнение Дирака» для электрона. Дирак обладал удивительной способностью «чувять» истину – свои уравнения он оценивал в значительной степени по их эстетическим качествам!

Однако числа w и z – комплексные, так что вышеприведенная интерпретация не имеет никакого смысла. Отношения квантовых весовых коэффициентов w и z не являются отношениями вероятностей. Это невозможно хотя бы потому, что вероятности всегда выражаются вещественными числами. Несмотря на широко распространенное мнение о вероятностной природе квантового мира, на квантовом уровне не действует Карданова теория вероятностей. А вот его таинственная теория комплексных чисел пришлась здесь как нельзя более кстати – именно она лежит в основе математически точного и абсолютно безвероятностного описания процессов, протекающих на квантовом уровне.

Пользуясь привычным и понятным языком, невозможно объяснить, что «означает» фраза «в данный момент времени электрон находится в состоянии суперпозиции двух положений с комплексными весовыми коэффициентами w и z ». На настоящем этапе нам придется просто принять всё это как должное; именно такими описаниями мы и вынуждены довольствоваться при рассмотрении квантовых систем. Такие суперпозиции, как сообщают естествоиспытатели, играют важную роль в действительной конструкции нашего микромира. Квантовый мир на самом деле ведет себя именно таким необычным и непостижимым образом, а нам повезло набрести на этот простой факт. А от фактов никуда не уйти – имеющиеся в нашем распоряжении описания, в соответствии с которыми эволюционирует микромир, действительно являются не только математически точными, но и, более того, целиком и полностью детерминированными!

§5.7. Унитарная эволюция U

Таким детерминированным описанием является, например, унитарная эволюция (обозначим ее буквой U). Эта эволюция описывается точными математическими уравнениями, однако нам не так уж важно знать, как именно эти уравнения выглядят. Нам понадобятся лишь некоторые из свойств эволюции U. В так называемом «шрёдингеровом представлении» U задается уравнением Шрёдингера, которое характеризует скорость изменения квантового состояния (или волновой функции) во времени. Это квантовое состояние (обычно обозначаемое греческой буквой ψ , или так: $|\psi\rangle$) представляет собой полную взвешенную сумму (с комплексными весовыми коэффициентами) всех возможных альтернатив, доступных данной квантовой системе. Таким образом, для приведенного выше примера с двумя альтернативными положениями электрона квантовое состояние $|\psi\rangle$ записывается в виде следующей комбинации комплексных чисел:

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

где w и z – комплексные числа (причем хотя бы одно из них не равно нулю). Комбинацию $w|A\rangle + z|B\rangle$ мы называем линейной суперпозицией состояний $|A\rangle$ и $|B\rangle$. Величина $|\psi\rangle$ (равно как и $|A\rangle$ или $|B\rangle$) часто называется вектором состояния. Квантовые состояния (или векторы состояния) могут записываться и в более общем виде – например, так:

$$|\psi\rangle = u|A\rangle + v|B\rangle + w|C\rangle + \dots + z|F\rangle,$$

где u, v, \dots, z – комплексные числа (причем хотя бы одно из них не равно нулю), а $|A\rangle, |B\rangle, \dots, |F\rangle$ символизируют различные возможные положения, которые может занимать частица (или какое-либо иное возможное свойство частицы – например, ее спиновое состояние; см. §5.10). Обобщая далее, можно допустить выражение волновой функции или вектора состояния в виде бесконечной суммы (поскольку число положений, которые может занимать точечная частица, бесконечно велико); впрочем, подобные случаи нас пока не занимают.

Здесь необходимо упомянуть об одной технической особенности квантового формализма. Дело в том, что значимыми являются только отношения комплексных весовых факторов. Подробнее об этом я расскажу позднее. А пока мы просто отметим, что для любого отдельно взятого вектора состояния $|\psi\rangle$ верно следующее: любое комплексное кратное $u|\psi\rangle$ (где $u \neq 0$) описывает то же самое физическое состояние, что и $|\psi\rangle$. Таким образом, например, физические состояния $uw|A\rangle + uz|B\rangle$ и $w|A\rangle + z|B\rangle$ совершенно идентичны. Соответственно, физический смысл имеет отношение $w : z$, но не отдельные числа w и z .

Наиболее фундаментальным свойством уравнения Шрёдингера (а значит, и эволюции U) является его линейность. Иначе говоря, если у нас есть два состояния (скажем, $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$) и уравнение Шрёдингера, согласно которому по прошествии времени t состояния $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$ эволюционируют в новые состояния, соответственно, $|\psi'\rangle$ и $|\phi'\rangle$, то любая линейная суперпозиция $w|\psi\rangle + z|\phi\rangle$ за то же время t неминуемо эволюционирует в суперпозицию $w|\psi'\rangle + z|\phi'\rangle$. Для

обозначения эволюции за время t воспользуемся символом \sim . Тогда линейность подразумевает следующее: если

$$|\psi\rangle \sim |\psi'\rangle \text{ и } |\phi\rangle \sim |\phi'\rangle,$$

то имеет место и эволюция

$$w|\psi\rangle + z|\phi\rangle \sim w|\psi'\rangle + z|\phi'\rangle.$$

Это рассуждение применимо (разумеется) и к линейным суперпозициям трех и более индивидуальных квантовых состояний: например, состояние $u|\chi\rangle + w|\psi\rangle + z|\phi\rangle$ эволюционирует за время t в состояние $u|\chi'\rangle + w|\psi'\rangle + z|\phi'\rangle$, если каждое из состояний $|\chi\rangle$, $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$ в отдельности эволюционирует за это же время, соответственно, в $|\chi'\rangle$, $|\psi'\rangle$ и $|\phi'\rangle$. Иными словами, эволюция всегда происходит так, словно каждый отдельно взятый компонент суперпозиции не «знает» о присутствии других. Можно сказать, что каждый отдельно взятый «мир», описываемый упомянутым компонентом, эволюционирует независимо от других, но всегда в соответствии с тем же уравнением Шрёдингера, что и другие. При этом комплексные весовые коэффициенты в суперпозиции, описывающей совокупное состояние, в процессе эволюции остаются неизменными.

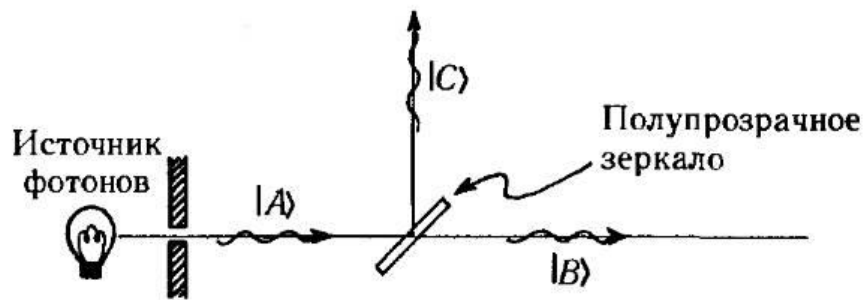


Рис. 5.11. Фотон в состоянии $|A\rangle$ падает на полупрозрачное зеркало; в результате его состояние эволюционирует (согласно U) в суперпозицию $|B\rangle + i|C\rangle$.

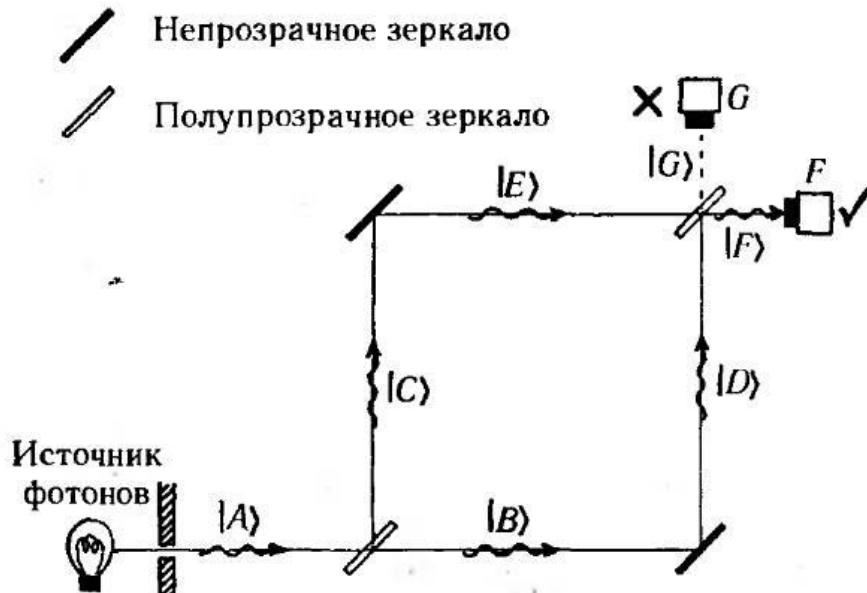


Рис. 5.12. Две составляющие состояния фотона сводятся вместе посредством двух непрозрачных зеркал; в точке слияния двух лучей установлено еще одно полупрозрачное зеркало. Лучи интерферируют таким образом, что результирующий луч приобретает состояние $|F\rangle$, тогда как детектор в точке G фотона не регистрирует.

Ввиду вышесказанного можно подумать, что суперпозиции и комплексные весовые коэффициенты не играют сколько-нибудь эффективной физической роли, поскольку эволюция

отдельных состояний во времени происходит так, словно других состояний тут вовсе нет. Это заблуждение. Проиллюстрируем на примере, что может произойти с такой системой в реальности.

Рассмотрим случай падения света на полусеребряное зеркало, т.е. на полупрозрачное зеркало, отражающее ровно половину падающего на него света и беспрепятственно пропускающее всё остальное. По квантовой теории, свет образуют частицы, называемые фотонами. Вполне естественно будет предположить, что половина фотонов из падающего на полусеребряное зеркало потока отражается от его поверхности, а половина проходит зеркало насквозь. Не тут-то было! Согласно всё той же квантовой теории, при столкновении с поверхностью зеркала каждый отдельный фотон переходит в состояние суперпозиции отражения и пропускания. Если фотон находился до столкновения с зеркалом в состоянии $|A\rangle$, то после столкновения состояние фотона эволюционирует (в соответствии с U) в состояние, которое можно записать в виде $|B\rangle + i|C\rangle$, где $|B\rangle$ символизирует состояние, в котором фотон проникает сквозь зеркало, а $|C\rangle$ – состояние, в котором фотон от зеркала отражается (см. рис. 5.11). Запишем эту эволюцию:

$$|A\rangle \sim |B\rangle + i|C\rangle.$$

Коэффициент i появляется здесь вследствие результирующего фазового сдвига на четверть длины волны,²⁰ который возникает в таком зеркале между отраженным и прошедшим лучом света. (Для большей точности мне следовало бы включить в выражение зависящий от времени коэффициент осцилляции и выполнить полную нормировку, однако в настоящем обсуждении никакой необходимости в такой точности нет. В приводимых описаниях я выделяю лишь существенные для нас аспекты происходящего. Несколько подробнее о коэффициенте осцилляции мы поговорим в §5.11, а вопроса о нормировке коснемся в §5.12. Более полное описание можно найти в любой стандартной работе по квантовой теории²¹; см. также НРК, с. 243–250.)

В рамках классической картины поведения частицы мы, разумеется, предположим, что состояния $|B\rangle$ и $|C\rangle$ представляют собой альтернативные варианты возможного поведения фотона. В квантовой же механике нам предлагается поверить, что фотон, находясь в такой чудесной комплексной суперпозиции, действительно совершает оба указанных действия одновременно. Чтобы убедиться в том, что здесь никоим образом не может идти речь о классических вероятностно-взвешенных альтернативах, разове́м наш пример еще немного и попытаемся снова свести вместе два частных состояния фотона (два фотонных луча). Для этого отразим сначала каждый луч от обычного, непрозрачного зеркала. В результате отражения²² состояние $|B\rangle$ фотона эволюционирует, согласно U , в некоторое другое состояние, скажем, $i|D\rangle$, тогда как состояние $|C\rangle$ эволюционирует в $i|E\rangle$:

$$|B\rangle \sim i|D\rangle \text{ и } |C\rangle \sim i|E\rangle.$$

Таким образом, совокупное состояние $|B\rangle + i|C\rangle$ эволюционирует по U следующим образом:

$$|B\rangle + i|C\rangle \sim i|D\rangle + i(i|E\rangle) = i|D\rangle - |E\rangle$$

(поскольку $i^2 = -1$). Вообразим далее, что эти два луча сходятся на четвертом зеркале, на этот раз снова полупрозрачном (как показано на рис. 5.12; предполагается, что длины всех лучей одинаковы, благодаря чему коэффициент осцилляции, которым я по-прежнему пренебрегаю, не играет никакой роли и здесь). Состояние $|D\rangle$ эволюционирует при этом в комбинацию $|G\rangle + i|F\rangle$,

²⁰ (*7) Для того, чтобы получить самое эффективное «полусеребряное зеркало», никакого серебра не требуется вовсе, достаточно взять пластину любого прозрачного материала соответствующей толщины, определяемой длиной волны падающего света. Нужный эффект будет достигнут посредством сложной комбинации многократных внутренних отражений и пропусканий, окончательным результатом чего станут два равных по интенсивности луча света – отраженный и прошедший сквозь. Фазовый сдвиг на четверть длины волны (обуславливающий появление того самого коэффициента i) возникает вследствие «унитарности» окончательного разделения исходного луча света на прошедший и отраженный лучи. Более подробное обсуждение имеется в [224].

²¹ См., например, [94] или [70].

²² Фазовый коэффициент для отраженного состояния я выбрал здесь, в некотором смысле, произвольно. Он частично зависит от того, какого рода зеркало используется. В данном случае, кстати, зеркала могут быть и в самом деле серебряными, в отличие от «полусеребряного зеркала» (прекрасно обходящегося вовсе без серебра) в примечании 7 (у меня *7 – В.Э.). Выбранный мною коэффициент i представляет собой своего рода компромисс с целью достижения внешнего согласия с коэффициентом, получаемым для «полусеребряных зеркал». Вообще говоря, до тех пор, пока мы остаемся последовательными в отношении обоих типов участвующих в эксперименте зеркал, не так уж и важно, какой именно коэффициент выбирается для описания отражения от зеркал непрозрачных.

где $|G\rangle$ представляет состояние прохождения, а $|F\rangle$ – состояние отражения. Аналогичным образом, $|E\rangle$ эволюционирует в $|F\rangle + i|G\rangle$, поскольку в этом случае $|F\rangle$ символизирует состояние прохождения, а $|G\rangle$ – состояние отражения:

$$|D\rangle = |G\rangle + i|F\rangle \text{ и } |E\rangle = |F\rangle + i|G\rangle.$$

Нетрудно убедиться (ввиду линейности эволюции U), что совокупное состояние $i|D\rangle - |E\rangle$ эволюционирует следующим образом:

$$i|D\rangle - |E\rangle \sim i(|G\rangle + i|F\rangle) - (|F\rangle + i|G\rangle) = i|G\rangle - |F\rangle - |F\rangle - i|G\rangle = -2|F\rangle.$$

(Коэффициент 2 физического смысла не имеет, поскольку, как уже упоминалось выше, при умножении совокупного физического состояния системы в данном случае, $|F\rangle$ на некоторое отличное от нуля комплексное число физическая ситуация остается прежней.) Таким образом, мы видим, что возможность $|G\rangle$ оказывается для фотона закрытой: после слияния двух лучей в один открытой остается единственно возможность $|F\rangle$. Этот любопытный результат обусловлен тем, что в физическом состоянии фотона в промежутке между его столкновениями с первым и последним зеркалом присутствуют оба луча одновременно. Мы говорим, что при этом происходит интерференция двух лучей. Как следствие, получается, что альтернативные «миры» фотона между упомянутыми столкновениями не отделены в действительности один от другого, но могут друг на друга влиять посредством этих самых феноменов интерференции.

Важно помнить о том, что описанное свойство демонстрируют единичные фотоны. Следует понимать, что каждый отдельный фотон «пробует» оба открытых перед ним пути, оставаясь при этом всё тем же одним фотоном. Он не расщепляется на два фотона на некоем промежуточном этапе, однако местоположение его определяется этаким странным комплексно-взвешенным сосуществованием альтернатив, что как раз и характерно для квантовой теории.

§5.8. Редукция R вектора состояния

В рассмотренном выше примере суперпозиция состояний фотона переходит в конечном счете в одно-единственное состояние. Представим, что в точках, обозначенных на рис. 5.12 буквами F и G , размещены детекторы фотонов (фотоэлементы). Поскольку в данном конкретном примере фотон, миновав последнее зеркало, оказывается в состоянии $|F\rangle$ (точнее, пропорциональном $|F\rangle$), а состояние $|G\rangle$ никакого участия в его дальнейшей судьбе не принимает, детектор в точке F зарегистрирует фотон, а детектор в точке G не зарегистрирует ничего.

Что произойдет в более общем случае – например, если мы попытаемся подать на эти детекторы суперпозицию состояний вроде $w|F\rangle + z|G\rangle$? Детекторы выполняют измерение с целью определить, находится фотон в состоянии $|F\rangle$ или же в состоянии $|G\rangle$. Квантовое измерение равносильно разглядыванию квантового события через увеличительное стекло и переводит событие с квантового на классический уровень. На квантовом уровне, при непрерывном воздействии U -эволюции, линейные суперпозиции сохраняются. Однако как только мы вытягиваем процесс на классический уровень, на котором события уже можно рассматривать как нечто действительно произошедшее, выясняется, что объекты больше не находятся в прежних странных комплексно-взвешенных комбинациях состояний. Выясняется (в нашем примере), что фотон регистрируется либо детектором в точке F , либо детектором в точке G , причем эти альтернативные варианты реализуются с определенной вероятностью. Квантовое состояние таинственным образом «перескакивает» от суперпозиции $w|F\rangle + z|G\rangle$ к состоянию «либо $|F\rangle$, либо $|G\rangle$ ». Такой «скачок» в описании состояния системы (от суперпозиции состояний квантового уровня к состоянию, при котором реализуется лишь одна из возможных альтернатив классического уровня) называется редукцией вектора состояния, или коллапсом волновой функции; эту операцию я буду обозначать буквой R . Вопрос о том, следует ли рассматривать операцию R как реальный физический процесс либо как некую иллюзию или аппроксимацию, чрезвычайно для наших целей важен, и мы к нему еще обязательно вернемся. Тот факт, что нам приходится (во всяком случае, в математических описаниях) отбрасывать эволюцию U и заменять ее совершенно отличной от нее процедурой R , есть фундаментальная X -загадка квантовой теории. На данном этапе, думаю, будет лучше, если мы не станем слишком углубляться в исследование этого парадокса, а будем (условно) рассматривать R как, в сущности, некий процесс, который просто сопутствует (в используемых нами математических описаниях, по крайней мере) процедуре «перемещения» события с квантового уровня на классический.

Как же вычисляются вероятности альтернативных результатов измерения на суперпозиции состояний? Для этого имеется одно весьма замечательное правило. Допустим, для измерения, определяющего окончательный выбор между альтернативными состояниями $|F\rangle$ и $|G\rangle$, как в приведенном выше примере, мы используем детекторы в точках, соответственно, F и G. Согласно упомянутому правилу, в случае суперпозиции состояний

$$w|F\rangle + z|G\rangle$$

отношение вероятности того, что фотон будет зарегистрирован детектором F, к вероятности того, что фотон будет зарегистрирован детектором G, равно

$$|w|^2 : |z|^2,$$

т.е. отношению квадратов модулей комплексных чисел w и z . Квадрат модуля комплексного числа равен сумме квадратов его вещественной и мнимой частей; т.е. квадрат модуля числа

$$z = x + iy,$$

где x и y – вещественные числа, равен

$$|z|^2 = x^2 + y^2 = (x + iy)(x - iy) = z\bar{z}.$$

Число z^{23} ($= x - iy$) называется комплексным сопряженным числа z ; аналогичная операция продельвается и с w . (В вышеприведенном рассуждении я неявно подразумеваю, что состояния, обозначенные мною через $|F\rangle$, $|G\rangle$ и т.д., должным образом нормированы. Смысл этого термина я объясню позднее, см. §5.12; строго говоря, нормировка необходима для того, чтобы выполнялось правило вероятностей в указанной форме.)

Именно здесь, и только здесь, на квантовую сцену выходят Кардановы вероятности. Мы видим, что на квантовом уровне комплексные весовые коэффициенты не играют сами по себе роли относительных вероятностей (да и не могут этого делать, поскольку они комплексные), а вот вполне вещественные квадраты модулей этих комплексных коэффициентов такие роли играют. Более того, только теперь, после выполнения измерений, приобретают смысл понятия неопределенности и вероятности. Измерение квантового состояния происходит, в сущности, тогда, когда имеет место значительное «увеличение» некоторого физического процесса, вытягивающее его с квантового на классический уровень. В случае фотоэлемента регистрация квантового события – в виде приема фотона – вызывает в конечном счете возмущение на классическом уровне, скажем, вполне отчетливый «щелчок». Вместо фотоэлемента мы могли бы использовать для регистрации фотона высокочувствительную фотографическую пластинку. В этом случае квантовое событие «прибытие фотона» вытягивается на классический уровень в виде хорошо различимой отметки на пластинке. В каждом из случаев измерительное устройство включает в себя некую неустойчиво уравновешенную систему – ничтожно малого квантового события оказывается достаточно, чтобы нарушить это равновесие и вызвать значительно больший по масштабу и наблюдаемый на классическом уровне эффект. Именно при этом переходе от квантового уровня к классическому комплексные числа Кардано возводятся в квадрат и становятся вероятностями Кардано!

Посмотрим, как можно применить это правило к конкретной ситуации. Предположим, что вместо зеркала в правом нижнем углу установлен фотоэлемент; тогда падающий на него фотон находится в состоянии

$$|B\rangle + i|C\rangle,$$

где состояние $|B\rangle$ означает, что фотон регистрируется фотоэлементом, тогда как в состоянии $|C\rangle$ регистрации фотона не происходит. Отношение соответствующих вероятностей при этом равно $|1|^2 : |i|^2 = 1 : 1$; т.е. вероятности каждого из двух возможных событий равны, и фотон активирует фотоэлемент с той же вероятностью, с какой и вовсе не попадает на него.

Рассмотрим несколько более сложный случай. Допустим, что мы не заменяем зеркало в правом нижнем углу фотоэлементом, а полностью блокируем один из лучей неким непрозрачным «фотонопоглощающим» препятствием – скажем, луч, соответствующий состоянию $|D\rangle$ фотона (см. рис. 5.13); при этом интерференция, имевшая место ранее, оказывается нарушена. Теперь, миновав последнее зеркало, фотон может перейти в состояние $|G\rangle$ (возможность $|F\rangle$ тоже пока никто не отменял) – однако лишь при условии, что не будет поглощен препятствием. Если препятствие поглощает фотон, то он вообще не дойдет до детекторов, ни в состоянии $|F\rangle$, ни в состоянии $|G\rangle$, ни в какой бы то ни было их комбинации. Если же поглощения не происходит, то последнего зеркала фотон достигнет, пребывая в «простом» состоянии $-|E\rangle$, которое после

²³ В.Э.: См. {PENRO3 = МОИ № 15, с.78, сноска 102}.

прохождения зеркала эволюционирует в $-|F\rangle - i|G\rangle$. Таким образом, в конечном результате действительно присутствуют обе альтернативы – и $|F\rangle$, и $|G\rangle$.

В том случае, когда препятствие (в рассмотренной конкретной схеме) не поглощает фотон, комплексные весовые коэффициенты, соответствующие возможным состояниям $|F\rangle$ и $|G\rangle$, равны -1 и $-i$. Таким образом, отношение вероятностей равно $|-1|^2 : |-i|^2$, что опять дает одинаковые вероятности для обоих возможных событий – фотон активирует детектор в точке $|F\rangle$ с той же вероятностью, с какой он активирует детектор в точке $|G\rangle$.

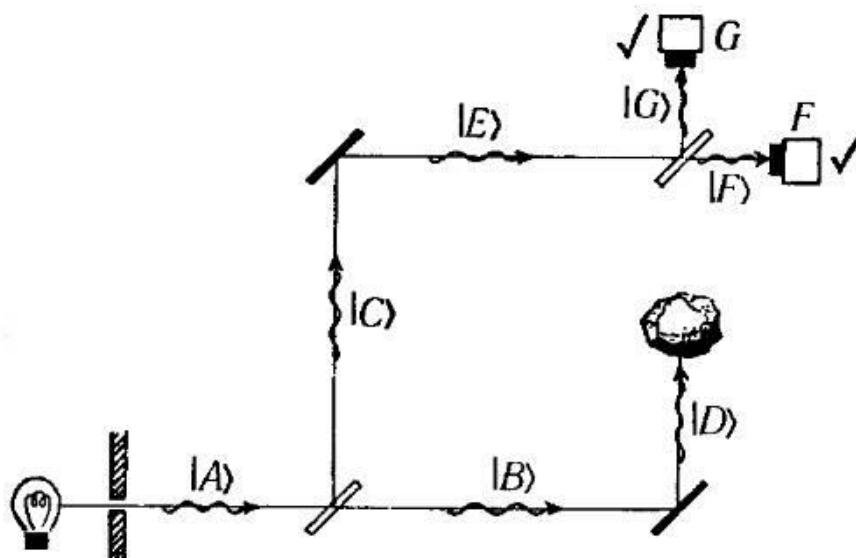


Рис. 5.13. Если перекрыть луч $|D\rangle$ каким-либо препятствием, то детектор G также сможет зарегистрировать прибытие фотона (при условии, что этот фотон не будет раньше поглощен препятствием!).

Кроме того, само препятствие также следует считать «измерительным устройством» – коль скоро варианты «препятствие поглощает фотон» и «препятствие не поглощает фотон» мы рассматриваем как классические альтернативы, которым нельзя поставить в соответствие комплексные весовые коэффициенты. Даже если препятствие не устроено таким деликатным образом, что квантовое событие «поглощение препятствием фотона» порождает событие, наблюдаемое на классическом уровне, следует всё же полагать, что такое устройство препятствия принципиально возможно. Существенным обстоятельством здесь является то, что в результате поглощения фотона некое значительное количество составляющего препятствие материала подвергается определенному, пусть и малому, возмущению – при этом практически невозможно собрать всю связанную с таким возмущением информацию, чтобы восстановить по ней сопутствующие эффекты интерференции, характеризующие квантовые феномены. Итак, препятствие (во всяком случае, в практическом смысле) следует рассматривать как объект классического уровня, эквивалентный измерительному устройству – вне зависимости от того, регистрирует оно поглощение фотона каким-либо практически наблюдаемым образом или нет. (К этому вопросу мы еще вернемся, см. §6.6.)

Учитывая вышесказанное, мы вольны воспользоваться «правилом квадратов модулей» и для вычисления вероятности того, что фотон и вправду окажется поглощен препятствием. Перед столкновением с препятствием фотон находится в состоянии $i|D\rangle - |E\rangle$, причем поглощается лишь фотон в состоянии $|D\rangle$, тогда как в состоянии $|E\rangle$ поглощения не происходит. Отношение вероятности поглощения к вероятности не-поглощения равно $|i|^2 : |-1|^2 = 1 : 1$ – обе альтернативы и здесь равновероятны.

Можно произвести еще одну небольшую модификацию рассматриваемой системы: уберем препятствие для луча D ; зеркало же в правом нижнем углу не будем заменять детектором, но «прикроем» вместо этого к зеркалу некое особого рода измерительное устройство. Предположим, что чувствительность этого устройства такова, что оно способно регистрировать (т.е. выводить на классический уровень) воздействие, оказываемое на зеркало фотоном при

отражении, каким бы малым это воздействие ни было; сигналом о регистрации воздействия пусть будет отклонение стрелки на циферблате нашего устройства (см. рис. 5.14). Здесь отклонение стрелки вызывается фотоном в состоянии $|B\rangle$, состояние же $|C\rangle$ никакого воздействия на стрелку не оказывает. Принимая фотон в состоянии $|B\rangle + i|C\rangle$, устройство «коллапсирует волновую функцию» и интерпретирует суперпозицию либо как состояние $|B\rangle$ (стрелка отклоняется), либо как состояние $|C\rangle$ (стрелка остается неподвижной), причем вероятности обоих исходов одинаковы (поскольку $|1|^2 : |i|^2 = 1 : 1$). Таким образом, на этом этапе также имеет место процедура R. О дальнейшей судьбе фотона мы рассуждаем примерно так же, как мы делали это выше; при этом выясняется, что – как и в случае с препятствием – вероятности регистрации фотона детекторами F и G снова равны (причем независимо от того, отклонялась стрелка или нет). Для того чтобы фотон в данной схеме мог вызвать отклонение стрелки, зеркало в правом нижнем углу должно быть достаточно «подвижным», отсутствие же жесткого закрепления нарушает хрупкий порядок, необходимый для возникновения той «деструктивной интерференции» между двумя траекториями движения фотонов от точки A к точке G, благодаря которой фотон в исходном примере не регистрировался детектором G.

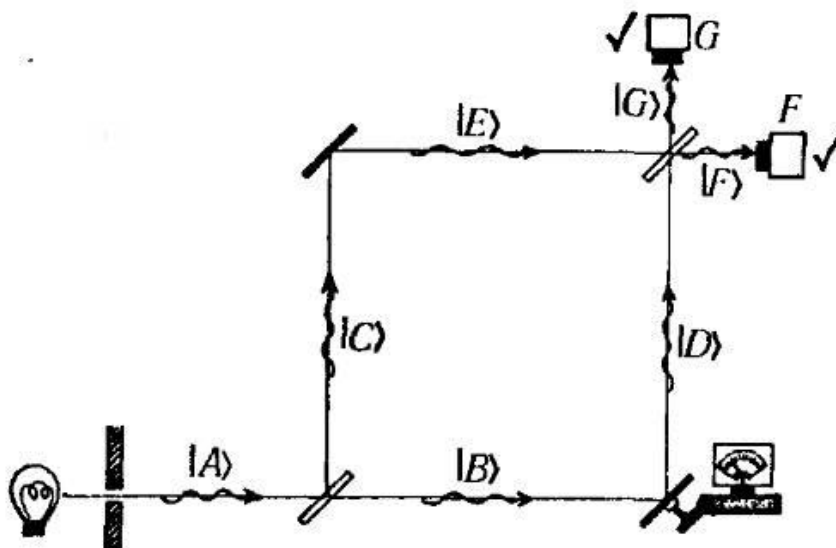


Рис. 5.14. Аналогичного эффекта можно достичь, поместив в правый нижний угол подвижное зеркало, снабженное неким детектором, который способен по движению зеркала определить, отразило оно фотон или нет. Интерференция здесь также оказывается нарушена, благодаря чему детектор в точке G получает возможность зарегистрировать прибытие фотона.

Читатель, должно быть, уже отметил некую досадную незавершенность всех наших рассуждений, выражающуюся в отсутствии ответа на вопрос «Когда (а главное, почему) квантовые правила переходят от квантового детерминизма комплексных весовых коэффициентов к классическим вероятностно-взвешенным недетерминированным альтернативам, каковой переход выражается математически в возведении в квадрат модулей соответствующих комплексных чисел?»²⁴. Что есть такого в одних физических материальных образованиях – таких, например, как детекторы фотонов в точках F и G или зеркало в нижнем правом углу (или то же возможное препятствие для фотонов на пути луча D), – что делает их объектами классического уровня, в противоположность другим физическим объектам, скажем, фотонам, которые оказываются на квантовом уровне, и требуют поэтому совершенно иного с собой обращения? Только ли

²⁴ В.Э.: Ну, тут по-моему Пенроуз «перегибает палку», пытаюсь всё представить таинственным и непонятным. Я обещал «не влезать» в физику, но здесь трудно удержаться от реплики, что за «квадратами модулей» же легко угадывается теорема Пифагора – сумма двух квадратов равна квадрату единицы. Стало быть, собственно «модули» будут проекциями этой «единицы» на выбранные оси. Речь, очевидно, идет о вращении, а «редукция R», стало быть, будет просто прекращением этого вращение – и в зависимости от фазы, в которой это вращение прекращают, будет тот или иной результат. Но, повторяю, я не хочу ничего выдвигать в физике.

в том дело, что фотон – это система физически простая, что позволяет рассматривать его целиком как объект квантового уровня, тогда как детекторы и препятствия являются системами сложными, которые можно рассматривать лишь приближенно, в результате чего тонкости квантового поведения растворяются в усредненных данных наблюдений? Многие физики, несомненно, ответят на последний вопрос утвердительно: все физические объекты, скажут они вам, следует рассматривать с позиций квантовой механики, и лишь руководствуясь соображениями удобства, мы исследуем большие и сложные системы классическими методами, причем правила вероятностей, задействованные в процедуре R, являются, в некотором роде, следствием упомянутого приближенного рассмотрения. В §6.6 и §6.7 мы увидим, что от наших трудностей (связанных с присутствием в квантовой теории X-загадок) такая точка зрения отнюдь не спасает, равно как не объясняет она и смысла удивительного R-правила, согласно которому из квадратов модулей комплексных весовых коэффициентов чудесным образом получаются вероятности. И всё же нам придется пока как-то усмирить нашу досаду и продолжить знакомство с выводами квантовой теории, в особенности с теми, что имеют отношение к ее Z-загадкам.

§5.9. Решение задачи Элитцера–Вайдмана об испытании бомб

Мы уже знаем вполне достаточно для того, чтобы отыскать решение задачи об испытании бомб, поставленной в §5.2. Прежде всего нужно выяснить, нельзя ли использовать сверхчувствительное зеркальце на носу бомбы в качестве измерительного устройства (как были использованы, например, препятствие и подвижное зеркало с детектором в описанных выше примерах). Построим систему зеркал (два непрозрачных, два полупрозрачных), которая в точности повторяет систему из предыдущего примера (см. рис. 5.14) за одним исключением: в правом нижнем углу вместо подвижного зеркала поместим зеркальце бомбы.

Смысл такого построения в том, что если бомба является холостой (в том единственном смысле, который подразумевается в условии задачи), то ее зеркальце остается в любом случае неподвижным (поскольку его заклинило), и общая картина эквивалентна показанной на рис. 5.12. Фотон, испущенный из источника, попадает на первое зеркало, будучи в состоянии $|A\rangle$. Поскольку такая ситуация полностью совпадает с той, что мы рассмотрели в §5.7, фотон после последнего зеркала приобретает, как и тогда, состояние $|F\rangle$ (пропорциональное $|F\rangle$, если точнее). Иначе говоря, детектор в точке F регистрирует прибытие фотона, а детектор в точке G не регистрирует ничего.

Если же бомба исправна, то падение фотона на ее зеркальце приводит к срабатыванию детонатора, и бомба взрывается. Бомба, фактически, представляет собой измерительное устройство. Альтернативы квантового уровня – «фотон падает на зеркальце» и «фотон не падает на зеркальце» – переводятся бомбой в альтернативы классического уровня – «бомба взрывается» и «бомба не взрывается». На состоянии $|B\rangle + i|C\rangle$ бомба реагирует взрывом, если обнаруживает, что фотон находится в состоянии $|B\rangle$; если же фотон находится в каком-то ином состоянии (т.е., в данном случае, $|C\rangle$), бомба не взрывается. Отношение вероятностей этих двух событий равно $|1|^2 : |i|^2 = 1 : 1$. Если бомба таки взорвалась, это означает, что она зарегистрировала прибытие фотона, а что будет дальше, никого уже не интересует. Если же взорваться бомбе не удалось, то состояние фотона редуцируется (как результат процедуры R) до состояния $i|C\rangle$ (падение на зеркало в левом верхнем углу), сменяясь далее (после отражения от этого зеркала) состоянием $-|E\rangle$. По прохождении последнего (полупрозрачного) зеркала фотон переходит в состояние $-|F\rangle - i|G\rangle$, т.е. отношение вероятностей возможных исходов – «прибытие фотона регистрируется детектором в точке F» и «прибытие фотона регистрируется детектором в точке G» – равно $|-1|^2 : |-i|^2 = 1 : 1$. Точно такое же отношение мы получили в примерах, описанных в предыдущем параграфе, для тех случаев, когда фотон не поглощался препятствием, а стрелка не отклонялась. Детектор, расположенный в точке G, получает, таким образом, вполне определенную возможность уловить фотон.

Предположим теперь, что при проведении одного из таких испытаний в некоторых случаях «не-взрыва» бомбы обнаруживается, что детектор G и в самом деле регистрирует прибытие фотона. Согласно нашим рассуждениям, это возможно лишь в том случае, если детонатор бомбы исправен! Если бомба неисправна, то фотон может быть зарегистрирован только детектором F. Следовательно, во всех случаях, когда срабатывает детектор G, мы можем с чистой совестью

гарантировать, что данная бомба «работоспособна» и в случае необходимости не подведет. Таким образом, задачу об испытании бомб (§5.2) можно считать решенной.²⁵

Судя по участвующим в процессе вероятностям, после достаточно большого количества испытаний половина бомб взорвется, и никакой дальнейшей пользы из них извлечь не удастся. Более того, на тех бомбах, что не взорвались, детектор G сработает только в половине случаев. Таким образом, после того, как мы переберем все бомбы одну за другой, мы сможем гарантировать работоспособность только четверти из первоначального запаса исправных бомб. Оставшиеся бомбы мы можем подвергнуть повторному испытанию, отбирая те, на которых сработал детектор G. Повторим испытание еще раз. И еще. В конечном счете у нас останется треть (поскольку $1/4 + 1/16 + 1/64 + \dots = 1/3$) от первоначального количества исправных бомб, но зато все эти бомбы будут гарантированно работоспособны. (Я не знаю, для чего эти бомбы предназначены, однако, думаю, благоразумно будет лишних вопросов не задавать!)

Читателю описанная процедура может показаться чересчур расточительной, однако поразительно здесь то, что она вообще осуществима. Никакими классическими методами задача не решается. Только в квантовой теории контрфактуальные вероятности могут действительно повлиять на физический результат. Наша квантовая процедура позволяет добиться того, что кажется невозможным, – что и в самом деле невозможно в рамках классической физики. Следует, кроме того, отметить, что с помощью некоторых усовершенствований потери можно снизить с двух третей до практически половины (см. [114]). Еще более поразительного результата добились не так давно П.Г. Квят, Х. Вайнфуртер, А. Цайлингер и М. Казевич, описав процедуру (отличную от решения Элитцур–Вайдмана), позволяющую снизить потери почти до нуля!

Что касается сложностей с разработкой экспериментального устройства, способного испускать отдельные фотоны по одному за раз, то они теперь позади – такие устройства уже созданы и вполне доступны (см. [168]).

В заключение отмечу, что в качестве измерительного устройства вовсе не обязательно должен выступать столь «сногшибательный» объект, как фигурирующая в условии задачи бомба. Более того, нет никакой необходимости в том, чтобы упомянутое «устройство» оповещало бы весь внешний мир о том, что оно зарегистрировало (или не зарегистрировало) прибытие фотона. Подвижное зеркало может само по себе послужить измерительным устройством, если его вес достаточно мал для того, чтобы оно могло сколько-нибудь заметно поворачиваться под воздействием падающих на него фотонов и затем останавливаться вследствие трения. Один лишь факт подвижности зеркала (скажем, зеркала в правом нижнем углу, как в рассмотренном примере) позволит детектору в точке G зарегистрировать прибытие фотона, даже если зеркало в действительности и не повернулось, указывая тем самым на то, что фотон отправился другой дорогой. Достичь точки G фотону позволяет потенциальная возможность поворота зеркала и ничто иное! Очень похожую роль играет и поглощающее фотоны препятствие из предыдущего параграфа. Оно, в сущности, служит для «измерения» наличия фотона где-то на пути, описываемом последовательными состояниями |B) и |D).

²⁵ Shabbos-ключ, или Субботний выключатель. Тот факт, что и Элитцур, и Вайдман работают в университетах Израиля, натолкнул нас с Артуром Экертом однажды во время беседы на идею создания устройства для помощи тем евреям, кто строго соблюдает все установления иудаизма и кому, следовательно, запрещается включать или выключать электрические приборы в субботу. Мы могли бы запатентовать соответствующее устройство и заработать тем самым целое состояние, однако вместо этого решили сделать нашу эпохальную идею достоянием общественности, дабы ею мог воспользоваться любой еврей, у которого возникнет в таком устройстве потребность. Для создания устройства понадобится источник, способный испускать непрерывную последовательность фотонов, два полупрозрачных и два непрозрачных зеркала и фотоэлемент, соединенный с прибором, который необходимо включать/выключать. Схема аналогична изображенной на рис. 5.13, фотоэлемент помещается в точке G. Для того, чтобы включить или выключить прибор, следует поместить палец на пути луча D, приблизительно там же, где на рис. 5.13 находится препятствие. Если фотон падает на палец, то ничего не происходит – разумеется, никакого греха в этом нет. (Фотоны и без того постоянно бомбардируют наши пальцы, и по субботам с ничуть не меньшим усердием.) Если же палец с фотоном не встретится, то имеется 50%-я вероятность (буде на то воля Божия), что обслуживаемый устройством электроприбор включится. Несомненно, не будет греха и в том, что фотон упадет не на ваш палец, а на выключатель прибора. (Тут имеется, правда, одно возражение практического свойства: источники, способные испускать по одному фотону, весьма сложны и дороги. Однако особой необходимости в них, в сущности, нет. Сгодится любой источник фотонов, поскольку приведенное выше рассуждение применимо и к каждому отдельному фотону из пучка.)

То, что препятствие не поглощает фотон, будучи на это способно, является точно таким же «измерением», каким мы считаем состоявшееся поглощение фотона. Такие отрицательные и бесконтактные измерения, называемые нулевыми (или невзаимодействующими) измерениями (см. [91]), имеют большое теоретическое (а возможно, в конечном счете, и практическое) значение. Предсказания квантовой теории относительно такого рода ситуаций непосредственно подтверждаются экспериментально. В частности, Квят, Вайнфуртер и Цайлингер разработали и провели эксперимент, точно воспроизводящий теоретическую процедуру Элитцура–Вайдмана для решения задачи об испытании бомб! И теоретические ожидания полностью подтвердились, что, впрочем, нас уже почему-то не удивляет. Сами же нулевые измерения мы по праву относим к наиболее фундаментальным Z-загадкам квантовой теории.

§5.10. Квантовая теория спина. Сфера Римана

Для того, чтобы разобраться со второй вводной квантовой головоломкой, необходимо рассмотреть структуру квантовой теории несколько подробнее. Если помните, в центр моего додекаэдра (равно как и додекаэдра моего коллеги) был помещен атом со спином $2/3$. Что же такое спин, и каково его место в квантовой теории?

Спин – неотъемлемое свойство частицы. По существу, физическое понятие спина совпадает с понятием вращения²⁶ (или кинетического момента) классического объекта – например, бильярдного шара, футбольного мяча или даже планеты Земля. Существует, впрочем, различие (незначительное): наибольший (практически весь) вклад в кинетический момент макроскопического объекта дают круговые движения всех составляющих его частиц вокруг общего центра масс, тогда как спин одной-единственной частицы есть свойство, присущее самой частице. Более того, спин элементарной частицы обладает любопытной особенностью: его величина всегда одинакова, а вот направление оси спина может быть разным (хотя, надо сказать, что эта самая «ось» также ведет себя весьма странно, в общем случае малосообразно с тем, как ведут себя классические оси вращения). Спин измеряется в единицах фундаментальной квантовомеханической постоянной \hbar ; символ этот предложен Дираком для обозначения величины, равной постоянной Планка h , деленной на 2π . Спин частицы всегда равен (неотрицательному) целому или полуцелому кратному постоянной \hbar : $0, 1/2 \hbar, \hbar, 3/2 \hbar, 2\hbar$ и т.д. Мы, соответственно, говорим: частица со спином $0, 1/2, 1, 3/2, 2$, и т.д.

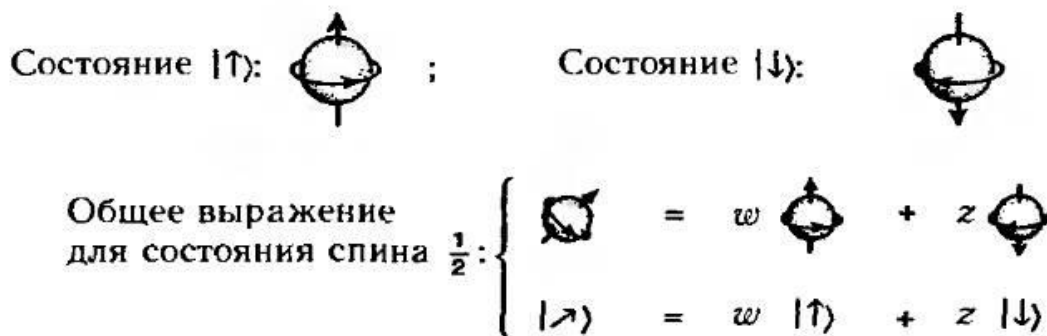


Рис. 5.15. В случае частицы со спином $1/2$ (электрона, протона или нейтрона) все спиновые состояния представляют собой комплексные суперпозиции двух основных состояний: «вверх» и «вниз».

Начнем с рассмотрения простого случая: спин $1/2$; таким спином обладают, например, электрон и нуклоны (протон и нейтрон). (Спин 0 мы рассматривать не будем, поскольку он слишком прост – в этом случае спин может находиться лишь в одном, сферически симметричном, состоянии.) Все состояния спина $1/2$ являются линейными суперпозициями двух состояний: скажем, правого спина вокруг оси, направленной вертикально вверх (обозначим это состояние через $|\uparrow\rangle$) и правого спина вокруг оси, направленной вертикально вниз (обозначим $|\downarrow\rangle$); см. рис. 5.15. Таким образом, в общем случае состояние спина можно представить в виде комплексной комбинации $|\psi\rangle = w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$. На практике же каждой такой комбинации соответствует вполне

²⁶ Английское *spin* как раз и означает, среди прочего, «вращение». – Прим. перев.

определенное состояние спина (величины $1/2 \hbar$) частицы, при котором отношение комплексных коэффициентов w и z определяет направление оси спина. Выбор направлений \uparrow и \downarrow достаточно условен: для однозначного описания состояния спина сгодилась бы и любая другая пара направлений.

Попробуем представить всё вышесказанное в более явном и геометрически наглядном виде. Такое представление поможет нам увидеть, что комплексные весовые коэффициенты w и z вовсе не являются такими уж абстрактными конструкциями, какими они могли показаться на первый взгляд. Более того, к геометрии пространства они имеют самое непосредственное отношение. (Мне думается, такие геометрические воплощения понравились бы Кардано и, возможно, облегчили бы его «мучения разума» – впрочем, и квантовая теория вполне исправно снабжает наши разумы всё новыми мучениями!)

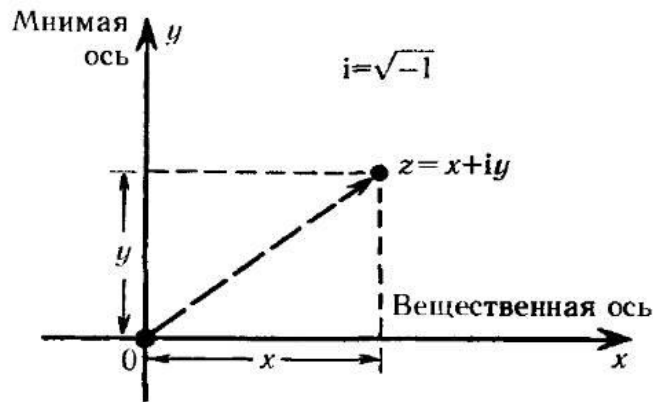


Рис. 5.16. Представление комплексного числа в виде точки на комплексной плоскости (плоскости Арганда–Гаусса–Весселя).



Рис. 5.17. Геометрические описания основных операций над комплексными числами.

Для начала будет весьма полезно ознакомиться со ставшим уже стандартным представлением комплексных чисел в виде точек на плоскости. (У этой плоскости много названий: плоскость Арганда, плоскость Гаусса, плоскость Весселя или просто комплексная плоскость.) Идея состоит в том, чтобы поставить в соответствие комплексному числу $z = x + iy$ (где x и y –

вещественные числа) точку,²⁷ координаты которой в некоторой заданной прямоугольной системе координат равны (x, y) (см. рис. 5.16). Таким образом, например, четыре комплексных числа $1, 1 + i, i$ и 0 образуют на комплексной плоскости квадрат. Существуют простые геометрические правила для отыскания суммы и произведения двух комплексных чисел (см. рис. 5.17). Отрицательное комплексное число $-z$ находится отражением точки, соответствующей числу z , относительно начала координат; комплексное сопряженное \bar{z} – отражением точки z относительно оси x .

Модуль комплексного числа равен расстоянию от соответствующей этому числу точки до начала координат; квадрат модуля, таким образом, равен квадрату этого расстояния. Точки, расстояние от которых до начала координат равно единице, образуют единичную окружность (см. рис. 5.18). Этим точкам соответствуют комплексные числа с единичным модулем, называемые иногда чистыми фазами; эти числа можно записать в виде

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta,$$

здесь θ – вещественное число, равное величине угла между прямой, соединяющей начало координат с соответствующей этому числу точкой, и осью x .²⁸

Теперь выясним, как в таком представлении выглядят отношения комплексных чисел. Выше я уже указывал на то, что при умножении вектора состояния на ненулевое комплексное число состояние не претерпевает физических изменений (например, если помните, состояния $-2|F\rangle$ и $|F\rangle$ мы полагали физически одинаковыми). Таким образом, в общем случае, состояние $|\psi\rangle$ физически идентично состоянию $u|\psi\rangle$ при любом ненулевом комплексном u . Применительно к состоянию

$$|\psi\rangle = w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$$

умножение w и z на одно и то же ненулевое комплексное число и не приведет к какому-либо изменению физического феномена, соответствующего этому состоянию. Физически различными спиновые состояния могут быть только в том случае, если их векторы состояний характеризуются различными отношениями $z : w$ (а при $u \neq 0$ отношения $uz : uw$ и $z : w$ равны).

Как же изобразить комплексное отношение геометрически? Существенное отличие комплексного отношения от просто комплексного числа заключается в том, что в качестве значения комплексного отношения допускается не только конечное комплексное число, но и бесконечность (обозначается символом ∞). Так, если рассматривать, в общем случае, отношение $z : w$ как эквивалент «одионого» комплексного числа z/w , то при $w = 0$ мы сталкиваемся с некоторыми, мягко говоря, затруднениями. Для того, чтобы этих затруднений избежать, математики условились в случае $w = 0$ полагать число z/w равным бесконечности. Такая ситуация возникает, например, в состоянии «спин вниз»: $|\psi\rangle = z|\downarrow\rangle = 0|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$. Вспомним, что нулю не могут быть равны оба коэффициента (т.е. и w , и z одновременно), поэтому случай $w = 0$ вполне допустим. (Мы могли бы вместо z/w взять отношение w/z , если оно по каким-либо причинам понравилось бы нам больше; тогда символ ∞ понадобился бы нам для случая $z = 0$, что соответствует состоянию «спин вверх». Никакой разницы между этими двумя описаниями нет.)

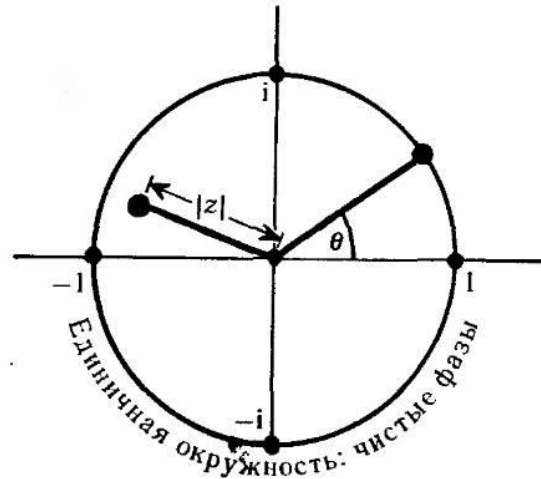


Рис. 5.18. Единичную окружность образуют точки, соответствующие комплексным числам $z = e^{i\theta}$, где θ – вещественное число; $|z| = 1$.

²⁷ В.Э.: На самом деле именно «геометрическая интерпретация» является более фундаментальной (как таксоны классификации пар планарно ориентированных множеств), а «упорядоченная пара чисел» представляет собой образование вторичное.

²⁸ Вещественное число e называется «основанием натурального логарифма»: $e = 2,7182818285\dots$ Запись e^z означает «число e в степени z »; для вычисления значения такого выражения используют следующее разложение:

$$e^z = 1 + z + \frac{z^2}{1 \times 2} + \frac{z^3}{1 \times 2 \times 3} + \frac{z^4}{1 \times 2 \times 3 \times 4} + \dots$$

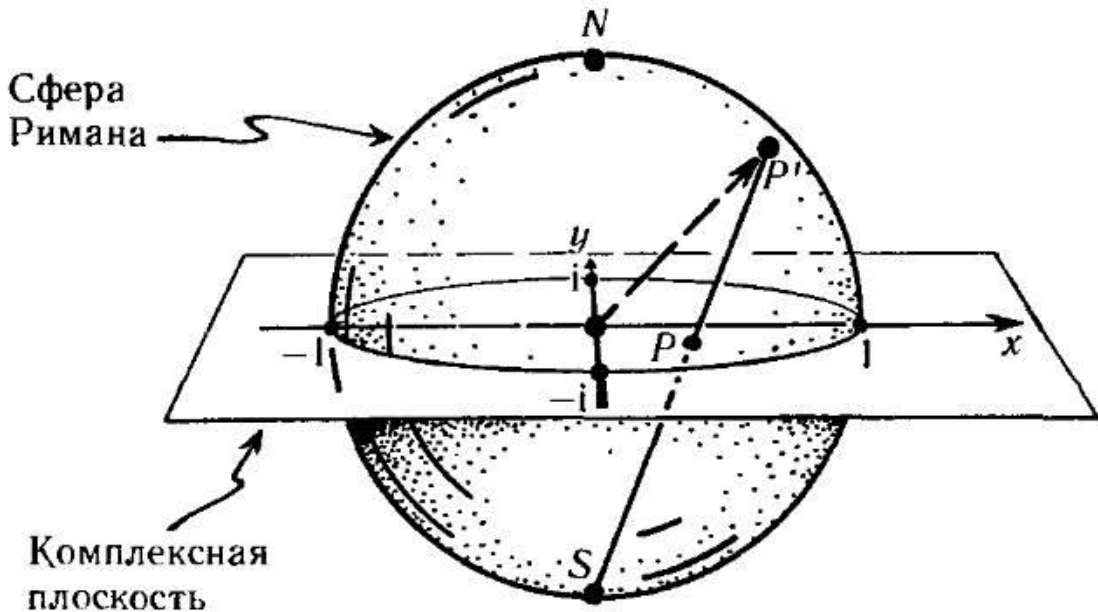


Рис. 5.19. Сфера Римана. Точка P на комплексной плоскости, соответствующая числу $p = z/w$, проецируется из южного полюса S на точку P' на сфере. Направление OP совпадает с направлением оси спина для общего состояния спина $1/2$ (см. рис. 5.15).

Пространство всех возможных комплексных отношений мы можем представить с помощью так называемой сферы Римана. Точки, образующие сферу Римана, соответствуют комплексным числам, либо ∞ . Сферу Римана можно изобразить в виде единичной сферы, экваториальная плоскость которой совпадает с комплексной плоскостью, а центр располагается в точке начала координат (т.е. в нуле). Собственно экватор сферы есть не что иное, как единичная окружность на комплексной плоскости (см. рис. 5.19). Для представления какого-либо комплексного отношения, скажем, $z : w$, мы отмечаем на комплексной плоскости точку P , соответствующую комплексному числу $p = z/w$ (допустим пока, что $w \neq 0$), а затем проецируем эту точку P в точку P' на сфере, при этом в качестве центра проекции выбираем южный полюс S сферы. Иначе говоря, мы проводим через точки S и P прямую; там, где эта прямая пересекает сферу (кроме самой точки S), отмечаем точку P' . Такое точечное отображение плоскости на сферу называется стереографической проекцией. Сам южный полюс S при таком отображении соответствует комплексному отношению ∞ . В самом деле, представим себе, что точка P комплексной плоскости удалена на очень большое расстояние от центра координат; соответствующая ей точка P' на сфере окажется при этом очень близко от полюса S – в пределе, когда модуль комплексного числа p устремляется к бесконечности, точки P' и S совпадают.

Сфера Римана играет фундаментальную роль в квантовом описании систем с двумя состояниями. Эта роль не всегда очевидна, однако это не делает ее менее важной, и сфера Римана, пусть и незримо, где-то на сцене всё равно присутствует. Она описывает – в абстрактном геометрическом виде – пространство всех физически достижимых состояний, которые можно получить из двух различных квантовых состояний посредством квантовой линейной суперпозиции. В качестве исходных можно взять, например, возможные состояния фотона $|B\rangle$ и $|C\rangle$. В общем случае их линейная комбинация имеет вид $w|B\rangle + z|C\rangle$. В §5.7 мы подробно рассматривали только один конкретный случай $|B\rangle + |C\rangle$ (результат отражения/пропускания света, падающего на полусеребряное зеркало), однако нетрудно реализовать и другие комбинации состояний. Для этого нужно всего лишь изменить степень «серебряности» зеркала и поместить на пути одного из лучей что-нибудь преломляющее. Так можно набрать полную сферу Римана всевозможных альтернативных состояний, соответствующих различным физическим ситуациям вида $w|B\rangle + z|C\rangle$, т.е. комбинациям двух начальных состояний $|B\rangle$ и $|C\rangle$.

Впрочем, в таких случаях геометрическая роль сферы Римана как раз и неочевидна. Однако возможны и иные ситуации, в которых целесообразность построения сферы Римана проявляется в полной мере. Самым наглядным примером такого рода является описание спиновых состояний

частицы со спином $\frac{1}{2}$ – электрона, скажем, или протона. В общем случае спиновое состояние можно записать в виде комбинации

$$|\psi\rangle = w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle;$$

как оказывается (при соответствующем выборе направлений \uparrow и \downarrow из физически эквивалентных возможных вариантов), это самое $|\psi\rangle$ представляет собой состояние правого спина (величины $\frac{1}{2}\hbar$), направление оси которого совпадает с направлением от начала координат к точке, соответствующей отношению z/w , на сфере Римана. Таким образом, любое направление в пространстве выступает как возможное направление оси спина для любой частицы со спином $\frac{1}{2}$. Хотя большая часть спиновых состояний представляется изначально в виде «таинственных комплексно-взвешенных комбинаций возможных альтернативных состояний» (т.е. состояний $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$), мы видим, что эти состояния ничуть не более (но и не менее) таинственны, чем оригинальные состояния $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, выбранные нами в качестве начальных. Каждое физически реально в той же мере, что и все остальные.

А что же с состояниями большего спина? Здесь ситуация становится несколько более запутанной – и более таинственной! Приводимое ниже общее описание не пользуется широкой известностью среди современных физиков, хотя оно было предложено еще в 1932 году блестящим итальянским физиком Этгоре Майораной (в 1938 году, в возрасте 31 года, Майорана бесследно исчез с борта входившего в Неаполитанский залив парома при обстоятельствах, которые до сих пор не получили удовлетворительного объяснения)²⁹.



Рис. 5.20. Измерение спина с помощью установки Штерна–Герлаха. Для частицы со спином $\frac{1}{2}n$ мы можем получить $n + 1$ возможных результатов, в зависимости от того, какая «доля» спина ориентирована в выбранном направлении.

Рассмотрим сначала то, что физикам таки известно. Допустим, у нас есть атом (или какая-то другая частица) со спином $\frac{1}{2}n$. В качестве исходного направления мы снова можем выбрать направление вверх, а заодно и любопытствуем, «какая доля» спина атома действительно ориентирована в этом направлении (т.е. является правой относительно направленной вверх оси). Для удовлетворения любопытства можно воспользоваться стандартным устройством, которое называется установкой Штерна–Герлаха и способно осуществлять упомянутые измерения с помощью неоднородного магнитного поля. Как выясняется, различных возможных вариантов развития событий всего $n + 1$, что обусловлено тем фактом, что атомы в магнитном поле могут отклоняться только в одном из $n + 1$ возможных направлений (см. рис. 5.20). Доля спина, ориентированного в выбранном направлении, определяется конкретным направлением, в котором отклоняется атом. Будучи измеренной в единицах n , доля ориентированного в данном направлении спина принимает одно из следующих значений: $n, n - 2, n - 4, \dots, 2 - n, -n$. Возможные же спиновые состояния для атома со спином $\frac{1}{2}n$ представляют собой комплексные суперпозиции перечисленных допустимых состояний. Возможные результаты измерения Штерна–Герлаха для спина $n + 1$ (направление поля в установке – вертикально вверх) я буду записывать следующим образом:

$$|\uparrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, |\downarrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, |\downarrow\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, \dots, |\downarrow\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle,$$

что соответствует значениям $n, n - 2, n - 4, \dots, 2 - n, -n$ доли спина, ориентированного в этом направлении (запись каждого состояния содержит ровно n стрелок). Результаты можно интерпретировать так: каждая стрелка вверх дает долю $\frac{1}{2}\hbar$ спина, ориентированного вверх, а

²⁹ В.Э.: Скорее всего, самоубийство или уход инкогнито в монастырь или в другой вид отшельничества; Майорана был физически болен, плюс имел психические расстройства.

каждая стрелка вниз дает долю $\frac{1}{2} \hbar$ спина, ориентированного вниз. Складывая эти величины, мы получаем полный спин для каждого конкретного случая измерения с помощью установки Штерна–Герлаха (при ориентации осей в направлении вверх/вниз).

В общем случае суперпозиция этих состояний записывается в виде комплексной комбинации

$$z_0|\uparrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_1|\downarrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_2|\downarrow\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, \dots, z_n|\downarrow\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle,$$

где хотя бы один из комплексных коэффициентов $z_0, z_1, z_2, \dots, z_n$ не равен нулю. Можно ли представить такое состояние с помощью отдельных направлений оси спина, отличных от элементарных «вверх» или «вниз»? Как показал Майорана, такое представление действительно возможно, однако следует допустить, что направления эти будут вполне независимы друг от друга: нет никакой необходимости брать в качестве исходных обязательно пару обязательно противоположных направлений (как в случае измерения с помощью установки Штерна–Герлаха). Иными словами, общее состояние спина $\frac{1}{2} n$ мы представим в виде набора из n независимых «стрелок-направлений»; эти направления можно рассматривать как направления, задаваемые n точками на сфере Римана, – при этом каждая «стрелка» исходит из начала координат и заканчивается в соответствующей точке на сфере (см. рис. 5.21). Важно помнить, что мы имеем дело с неупорядоченной совокупностью точек (или направлений), и, следовательно, в порядок их рассмотрения никакого особого смысла вкладывать не нужно.

Получившаяся картина выглядит очень странно – если мы попытаемся подойти к квантовомеханическому спину с теми же мерками, что и к привычной концепции вращения на классическом уровне. Вращение классического объекта (например, бильярдного шара) всегда происходит вокруг некоторой вполне определенной оси, тогда как объекту квантового уровня позволено, судя по всему, вращаться одновременно вокруг множества осей, ориентированных в самых разных направлениях. Полагая, что квантовые объекты – это, в сущности, те же классические объекты, только «маленькие», мы неизбежно сталкиваемся с парадоксом. Чем больше величина спина, тем большее количество направлений осей необходимо для описания его состояния. Почему же, в таком случае, классические объекты не вращаются вокруг нескольких осей одновременно? Перед нами типичный пример квантовой Х-загадки. Что-то вмешивается в процесс (на некоем неустановленном уровне), и мы обнаруживаем, что большинство типов квантовых состояний на классическом уровне феноменов – т.е. там, где мы могли бы их воспринимать, – не возникают вовсе (или, по меньшей мере, почти никогда). В случае спина мы видим, что на классическом уровне сохраняются только те состояния, в которых оси преимущественно группируются в каком-то одном направлении – в направлении оси вращения классического вращающегося объекта.

В квантовой теории есть одно интересное допущение, называемое «принципом соответствия». Суть этого принципа такова: как только какая-либо физическая величина (например, величина спина) возрастает до некоего предела, становится возможным такое поведение системы, которое очень близко аппроксимирует классическое поведение (как, например, спиновое состояние, где направления всех осей приблизительно одинаковы). Однако нигде почему-то не объясняется, каким образом к подобным состояниям приводит одна лишь шрёдингерова эволюция U . В действительности «классические состояния» так не возникают почти никогда. Состояния классического типа являются результатом действия совершенно иной процедуры – редукции R вектора состояния.

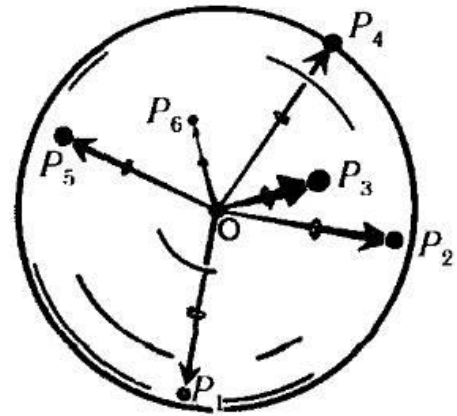


Рис. 5.21. Майорана описывает общее состояние спина $\frac{1}{2} n$ как неупорядоченную совокупность из n точек P_1, P_2, \dots, P_n на сфере Римана, причем каждая точка соответствует «элементарному» спину $\frac{1}{2}$, направление оси которого совпадает с направлением от начала координат к этой самой точке.

§5.11. Местонахождение частицы и ее количество движения

Еще более наглядным примером такого рода является квантовомеханическая концепция положения частицы в пространстве. Выше мы говорили о том, что состояние частицы может включать в себя суперпозицию двух или более различных ее положений. (Вспомним также и о примерах из §5.7, где после прохождения полупрозрачного зеркала фотон оказывается в состоянии, предполагающем его нахождение в двух различных лучах одновременно.) Такие суперпозиции возможны и в случае любых других типов частиц (как простых, так и составных) – электронов, протонов, атомов или молекул. Более того, в части U формализма квантовой теории нет ничего, что запрещало бы оказаться в двусмысленном состоянии суперпозиции положений макроскопическим объектам вроде бильярдных шаров. Однако никто ни разу не видел бильярдный шар в состоянии суперпозиции нескольких положений одновременно, равно как никто не видел и бильярдный шар, вращающийся одновременно вокруг нескольких осей. Почему получается так, что некоторые физические объекты оказываются слишком большими, или слишком массивными, или слишком какими-то еще для того, чтобы «протиснуться» на квантовый уровень, вследствие чего не могут в реальном мире находиться в какой бы то ни было суперпозиции состояний? В стандартной квантовой теории переход от квантовых суперпозиций возможных альтернатив к единственному действительному классическому результату осуществляется исключительно благодаря действию процедуры R. Действие же одной лишь процедуры U практически неизбежно приводит к таким классическим суперпозициям, которые выглядят, мягко говоря, «неестественно». (К этому вопросу я еще вернусь в §6.1.)

На квантовом же уровне те состояния частицы, в которых она не имеет четко определенного положения, могут играть, ни много ни мало, фундаментальную роль: если частица обладает определенным количеством движения (т.е. движется по некоторой определенной траектории в определенном направлении, а не в суперпозиции нескольких разных направлений одновременно), то в состоянии этой частицы непременно должна присутствовать суперпозиция всех ее различных положений одновременно. (Это одно из свойств уравнения Шрёдингера, и для должного объяснения этого свойства потребовалось бы слишком далеко углубиться в технические детали, что нам сейчас совсем не нужно; см., например, НРК, с. 243–250, а также [94] и [70]. Оно, кроме того, тесно связано с принципом неопределенности Гейзенберга, устанавливающим предел точности для одновременного измерения положения частицы и ее количества движения.) Более того, в состояниях с определенным количеством движения частицы демонстрируют колебательное (в направлении движения) пространственное поведение, чего при обсуждении состояний фотонов в §5.7 мы не учитывали. Строго говоря, термин «колебательное» здесь не совсем подходит. Как выясняется, упомянутые «колебания» отнюдь не похожи на колебания, скажем, струны – комплексные весовые коэффициенты не «мечутся» взад и вперед сквозь начало координат на комплексной плоскости, но, будучи чистыми фазами (см. рис. 5.18), движутся вокруг начала координат с постоянной скоростью, причем эта самая скорость задает частоту ν , пропорциональную энергии E частицы в соответствии со знаменитой формулой Планка $E = h\nu$. (Графическое представление состояний количества движения в виде такого «штопора» можно найти в НРК, рис. 6.11 {= [МОИ № 15, с.77](#)}). Все эти вещи, хоть они и важны для квантовой теории, в наших дальнейших рассуждениях особой роли не играют, поэтому читатель вполне может обойтись и без детального их изучения.

В общем случае комплексные весовые коэффициенты вовсе не обязательно должны иметь именно такой «колебательный» вид, они могут изменяться от точки к точке произвольным образом. Весовые коэффициенты задают комплексную функцию положения, которая называется волновой функцией частицы.

§5.12. Гильбертово пространство

Чтобы более внятно (и более точно) рассказать о том, как работает процедура R в стандартных квантовомеханических описаниях, необходимо перейти на несколько (совсем немного) более высокий уровень математической абстракции. Семейство всех возможных состояний квантовой системы образует так называемое гильбертово пространство. Нужды объяснять значение этого термина во всех математических тонкостях у нас в данный момент нет, однако некоторое представление о нем всё же получить стоит – это поможет нам прояснить существующую картину квантового мира.

Первая и наиболее важная особенность, на которую следует обратить внимание: гильбертово пространство является комплексным векторным пространством. Это, в сущности, означает, что здесь мы вправе выполнять действия с комплексно-взвешенными комбинациями, посредством которых описываются квантовые состояния. Для обозначения элементов гильбертова пространства я продолжу использовать диракову скобку «кет», т.е. если состояния $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$ являются элементами гильбертова пространства, то таким же его элементом является и состояние $w|\psi\rangle + z|\phi\rangle$, где w и z – любая пара комплексных чисел. Допускается даже комбинация $w = z = 0$, она дает элемент $\mathbf{0}$ гильбертова пространства – единственный элемент, не соответствующий никакому возможному физическому состоянию. Как и в любом другом векторном пространстве здесь действуют самые обыкновенные алгебраические правила:

$$\begin{aligned} |\psi\rangle + |\phi\rangle &= |\phi\rangle + |\psi\rangle, \\ |\psi\rangle + (|\phi\rangle + |\chi\rangle) &= (|\psi\rangle + |\phi\rangle) + |\chi\rangle, \\ w(z|\psi\rangle) &= (wz)|\psi\rangle, \\ (w + z)|\psi\rangle &= w|\psi\rangle + z|\psi\rangle, \\ z(|\psi\rangle + |\phi\rangle) &= z|\psi\rangle + z|\phi\rangle, \\ 0|\psi\rangle &= \mathbf{0}, \\ z\mathbf{0} &= \mathbf{0}, \end{aligned}$$

а это более или менее означает, что мы можем использовать алгебраическую систему обозначений привычным нам образом.

Иногда гильбертово пространство имеет конечную размерность – как, например, при описании спиновых состояний частицы. В случае спина $\frac{1}{2}$ гильбертово пространство двумерно, а его элементы представляют собой комплексные линейные комбинации двух состояний, $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$. Для спина $\frac{1}{2}$ n гильбертово пространство $(n + 1)$ -мерно. Однако размерность гильбертова пространства может быть и бесконечной – такое пространство необходимо, например, для описания состояний положения частицы. В этом случае каждое альтернативное положение, которое может занимать частица, рассматривается как отдельное измерение гильбертова пространства. Общее же состояние, определяющее квантовое местоположение частицы, записывается как комплексная суперпозиция всех этих различных отдельных положений (волновая функция для данной конкретной частицы). Надо сказать, что с рассмотрением такого бесконечномерного гильбертова пространства связаны определенные математические осложнения, которые лишь запутают нас без всякой на то необходимости, поэтому ниже я сосредоточусь (в основном) на конечномерном случае.

Попытавшись представить гильбертово пространство визуально, мы сталкиваемся с двумя трудностями. Во-первых, размерность такого пространства, как правило, слишком велика для того, чтобы наше воображение сколько-нибудь адекватно справилось с задачей. Во-вторых, пространство это является не вещественным, но комплексным. Впрочем, часто бывает полезно не задумываться о подобных трудностях с самого начала – это помогает выработать некоторое интуитивное понимание математических аспектов концепции. Поэтому давайте на некоторое время сделаем вид, будто для представления гильбертова пространства вполне достаточно той привычной двух- или трехмерной картины, которая у нас уже есть. На рис. 5.22 проиллюстрирована геометрически операция линейной суперпозиции на примере обычного трехмерного пространства.

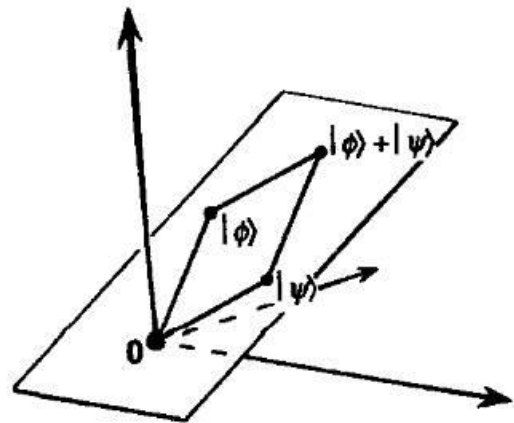


Рис. 5.22. Если вообразить, что гильбертово пространство тождественно трехмерному евклидову пространству, то сумму векторов $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$ можно найти с помощью обычного правила параллелограмма (в плоскости $(0, |\psi\rangle, |\phi\rangle)$).

Вспомним, что вектор квантового состояния $|\psi\rangle$ соответствует тому же физическому состоянию, что и любой кратный ему вектор $u|\psi\rangle$, где u – ненулевое комплексное число. В нашей геометрической интерпретации это означает, что физическое состояние представляется не одинокой точкой в гильбертовом пространстве, но прямой, соединяющей гильбертову точку $|\psi\rangle$ с началом координат 0 (такую прямую называют лучом). Пример луча изображен на рис. 5.23; следует, впрочем, учитывать, что ввиду комплексного характера гильбертова пространства луч этот только выглядит как обычная одномерная прямая, на деле же за ним скрывается целая комплексная плоскость.

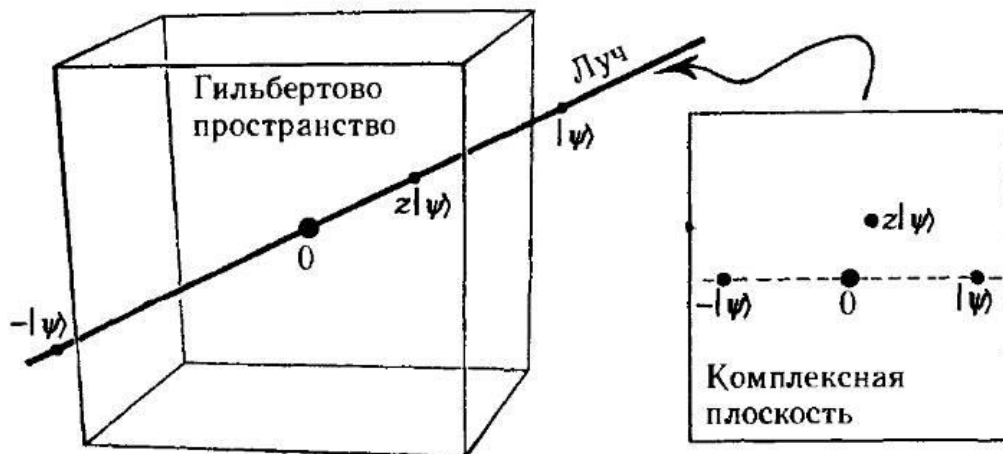


Рис. 5.23. Луч в гильбертовом пространстве есть множество всех комплексных кратных вектора состояния $|\psi\rangle$. Мы представляем этот луч в виде прямой, проходящей через начало гильбертовых координат, однако не следует забывать о том, что за этой прямой на деле скрывается комплексная плоскость.

До сих пор мы рассматривали гильбертово пространство, имея в виду лишь то, что структурно оно представляет собой комплексное векторное пространство. Однако, помимо комплексно-векторной структуры, у гильбертова пространства имеется еще одно, не менее важное, свойство, крайне полезное для описания процедуры редукции R. Речь идет об эрмитовом скалярном произведении (или внутреннем произведении), каковая операция позволяет из любой пары гильбертовых векторов получить одно-единственное комплексное число. Она же дает нам возможность ввести два весьма важных понятия. Первое – квадрат длины гильбертова вектора как скалярное произведение вектора на самого себя. Например, нормированное состояние (необходимое, как мы отмечали выше – см. §5.8, с. 412, – для строгой применимости правила квадратов модулей) задается гильбертовым вектором, квадрат длины которого равен единице. Вторым важным понятием, сопутствующим скалярному произведению, является понятие ортогональности гильбертовых векторов – векторы ортогональны, когда их скалярное произведение равно нулю. Ортогональными считаются векторы, направленные, в том или ином смысле, «под прямым углом» друг к другу. Применительно к состояниям, ортогональными обычно называют состояния, независимые одно от другого. Важность этого понятия для квантовой физики заключается в том, что различные альтернативные результаты любого измерения всегда ортогональны друг другу.

В качестве примера ортогональных состояний можно привести состояния $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$, с которыми мы встречались при рассмотрении частицы со спином $\frac{1}{2}$. (Отметим, что ортогональность в гильбертовом пространстве, как правило, не соответствует перпендикулярности в пространстве обычном; в случае спина $\frac{1}{2}$ ортогональные состояния $|\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\rangle$ представляют физические конфигурации, ориентированные, скорее, в противоположных направлениях, нежели под прямым углом.) Следующий пример – состояния $|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, $|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, ..., $|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle$ спина $\frac{1}{2}n$; каждое такое состояние ортогонально всем остальным. Ортогональными являются и все различные возможные положения, в которых может находиться квантовая частица. Более того, ортогональны как состояния $|B\rangle$ и $i|C\rangle$ (см. §5.7 – прошедшая и отраженная части состояния фотона, получаемые в результате падения фотона на полупрозрачное зеркало), так и состояния

$i|D\rangle$ и $-|E\rangle$, в которые эволюционируют первые два после отражения от двух непрозрачных зеркал.

Последний факт иллюстрирует одно важное свойство шрёдингеровой эволюции U . Любые два изначально ортогональных состояния ортогональными и остаются, если каждое эволюционирует в соответствии с U в течение одного и того же временного периода. Таким образом, свойство ортогональности при эволюции U сохраняется. Кроме того, эволюция U сохраняет и значение скалярного произведения состояний. Собственно, именно в этом и заключается формальный смысл понятия унитарная эволюция.

Как уже упоминалось выше, ключевая роль ортогональности состоит в следующем: различные возможные квантовые состояния, возникающие при любом «измерении» квантовой системы и дающие – при поднятии на классический уровень – непосредственно различимые результаты, непременно ортогональны друг другу. Особенно наглядно это проявляется в нулевых измерениях – таких, например, как в задаче об испытании бомб, §5.2 и §5.9. Не-обнаружение какого-либо квантового состояния устройством, способным это состояние обнаружить, приводит в конечном счете к тому, что результирующее состояние «перескакивает» в нечто, ортогонально противоположное тому состоянию, какое детектор, собственно, призван обнаруживать.

Как мы только что отметили, ортогональность математически выражается как обращение в нуль скалярного произведения состояний. Это скалярное произведение, в общем случае, представляет собой комплексное число, поставленное в соответствие какой-либо паре элементов гильбертова пространства. Если обозначить эти элементы (или состояния) через $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$, то упомянутое комплексное число записывается так: $\langle\psi|\phi\rangle$. При этом выполняется ряд простых алгебраических тождеств, которые мы можем записать в следующем (несколько, правда, неуклюжем) виде:

$$\begin{aligned}\overline{\langle\psi|\phi\rangle} &= \langle\phi|\psi\rangle, \\ \langle\psi|(|\phi\rangle + |\chi\rangle) &= \langle\psi|\phi\rangle + \langle\psi|\chi\rangle, \\ (z\langle\psi|)|\phi\rangle &= z\langle\psi|\phi\rangle, \\ \langle\psi|\psi\rangle &> 0, \quad \text{кроме случая } |\psi\rangle = 0.\end{aligned}$$

Кроме того, можно показать, что $\langle\psi|\psi\rangle = 0$ при $|\psi\rangle = 0$. Мне не хочется надоедать читателю прочими математическими подробностями (если же таковые подробности кого-то заинтересуют, то ознакомиться с ними можно, открыв любой стандартный текст по квантовой теории; см., например, [94]).

Существенными для наших дальнейших нужд свойствами скалярного произведения являются лишь следующие два (уже, впрочем, упоминавшиеся выше):

$$\begin{aligned}\text{векторы } |\psi\rangle \text{ и } |\phi\rangle \text{ ортогональны тогда и только тогда, когда } \langle\psi|\phi\rangle &= 0, \\ \text{произведение } \langle\psi|\psi\rangle \text{ есть квадрат длины вектора } |\psi\rangle.\end{aligned}$$

Отметим, что отношение ортогональности является симметричным (поскольку $\langle\psi|\phi\rangle = \overline{\langle\phi|\psi\rangle}$). Более того, произведение $\langle\psi|\psi\rangle$ всегда представляет собой неотрицательное вещественное число, из которого легко извлекается неотрицательный квадратный корень, который мы можем называть длиной (или величиной) вектора $|\psi\rangle$.

Поскольку при умножении любого вектора состояния на ненулевое комплексное число физическая интерпретация этого вектора никаких изменений не претерпевает, мы всегда можем нормировать состояние таким образом, чтобы длина соответствующего вектора стала равна единице, получив в результате так называемый единичный вектор, или нормированное состояние. Тут, впрочем, имеется некоторая неясность, так как мы можем умножить вектор состояния и на чистую фазу (число вида $e^{i\theta}$, где θ – вещественное число; см. §5.10).

§5.13. Описание редукции R в терминах гильбертова пространства

Как в терминах гильбертова пространства представить процедуру R ? Рассмотрим простейший случай измерения (типа «да/нет»), при котором прибор делает запись ДА при достоверном обнаружении у измеряемого квантового объекта некоторого свойства и НЕТ, если обнаружить данное свойство не удастся (или, что то же самое, прибор обнаруживает достоверное указание на то, что таким свойством измеряемый квантовый объект не обладает). Этот случай включает в себя и ту возможность, которая нас в настоящий момент как раз и интересует, – вариант НЕТ

может оказаться нулевым измерением. Подобные измерения выполняют, например, детекторы фотонов из §5.8. Они регистрируют результат ДА, обнаруживая прибытие фотона, и НЕТ, если обнаружения фотона не произошло. В данном случае измерение НЕТ является не чем иным, как нулевым измерением – измерением оно при этом быть не перестает, вследствие чего состояние системы «скачком» переходит в состояние, ортогональное тому, какое наблюдалось бы, получи мы при измерении результат ДА. Аналогичным образом, к нулевым можно непосредственно отнести и измерения спина (для атома со спином $\frac{1}{2}$) в опыте Штерна–Герлаха; можно говорить, что измерение дает результат ДА, если обнаруживается, что атом имеет спин $|\uparrow\rangle$ (что происходит, когда атом отклоняется в сторону, соответствующую направлению «вверх»), или НЕТ, если атом в эту сторону не отклоняется, что дает нам спиновое состояние, ортогональное состоянию $|\uparrow\rangle$, т.е. $|\downarrow\rangle$.

Более сложные измерения всегда можно представить в виде последовательности измерений типа «да/нет». Рассмотрим, например, атом со спином $\frac{1}{2}n$. Чтобы не упустить ни одного из $n + 1$ различных возможных результатов измерения доли спина, ориентированного в направлении «вверх», начнем с того, что зададим вопрос, не находится ли атом в спиновом состоянии, например, $|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$. Для ответа на вопрос попытаемся обнаружить атом в луче, соответствующем этому спиновому состоянию «единодушно вверх». Если измерение дает ответ ДА, то на этом наши мучения и заканчиваются. Если же мы получаем НЕТ, то измерение оказывается нулевым, и мы переходим к следующему вопросу: «Не находится ли атом в спиновом состоянии $|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$?» И так далее. Каждый раз ответ НЕТ следует считать нулевым измерением, каковое указывает лишь на то, что в данном случае не был получен ответ ДА. Запишем наши рассуждения более подробно. Предположим, что первоначально атом находится в спиновом состоянии

$$z_0|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_1|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_2|\downarrow\downarrow\dots\uparrow\rangle, \dots, z_n|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle,$$

а мы выполняем измерение с целью выяснить, не ориентирован ли весь спин атома в направлении «вверх». Получив ответ ДА, мы удостоверяемся в том, что атом действительно находится в состоянии $|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, или, если точнее, «перескакивает» в состояние $|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$ при измерении. Если же ответ НЕТ, то измерение является нулевым, и приходится предположить, что первоначальное состояние «перескакивает» в ортогональное состояние

$$z_1|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_2|\downarrow\downarrow\dots\uparrow\rangle, \dots, z_n|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle.$$

Мы выполняем следующее измерение, на этот раз желая выяснить не находится ли атом в состоянии $|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$. Получив при этом измерении ответ ДА, мы говорим, что атом и в самом деле находится в состоянии $|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$ или, что правильнее, «перескакивает» в состояние $|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$ в результате измерения. Если же мы получаем ответ НЕТ, то происходит «скачок» в следующее состояние,

$$z_2|\downarrow\downarrow\dots\uparrow\rangle, \dots, z_n|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle,$$

и так далее.

Эти «скачки», совершаемые (или, по крайней мере, кажущиеся совершаемыми) вектором состояния, олицетворяют собой наиболее головоломный аспект квантовой теории. Думаю, недалеко от истины утверждение, что большинство квантовых физиков либо испытывают немалые трудности, пытаясь примириться с тем фактом, что подобные «скачки» неотъемлемо присущи объективной физической реальности, либо вообще отказываются признавать, что реальность может вести себя столь абсурдным образом. Тем не менее, какой бы точки зрения относительно связи описываемых здесь процессов с «реальностью» мы ни придерживались, упомянутые «скачки» представляют собой существенный элемент квантового формализма.

В предыдущем рассуждении я воспользовался правилом, иногда называемым проекционным постулатом и однозначно определяющим форму подобных «скачков» (например, состояние $z_0|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_1|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_2|\downarrow\downarrow\dots\uparrow\rangle, \dots, z_n|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle$ должно «перескакивать» в состояние $z_1|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle, z_2|\downarrow\downarrow\dots\uparrow\rangle, \dots, z_n|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle$). Название постулата обусловлено геометрическими соображениями, в чем мы вскоре убедимся. По мнению некоторых физиков, проекционный постулат представляет собой несущественное допущение квантовой теории. Физики эти, впрочем, имеют в виду, как правило, отнюдь не нулевые измерения, но измерения, при которых квантовое состояние нарушается неким физическим взаимодействием. Такое нарушение происходит, когда измерение (в вышеописанных примерах) дает ответ ДА, т.е. детектор регистрирует фотон, поглощая его при этом, а атом по прохождении установки Штерна–Герлаха оказывается в некотором конкретном луче (что опять же означает ДА). Для рассматриваемого же нулевого измерения (т.е. измерения, при котором мы получаем ответ НЕТ) проекционный постулат оказывается как нельзя более

существенным, поскольку без него никак невозможно узнать, что квантовая теория думает (и, кстати, правильно думает) по поводу измерений, следующих за нулевым.

Для того, чтобы получить более наглядное представление о смысле проекционного постулата, попробуем описать происходящее в терминах гильбертова пространства. Для этого введем понятие примитивного измерения. Примитивным я буду называть измерение типа «да/нет», при котором результат ДА означает, что система находится в некотором определенном квантовом состоянии $|\alpha\rangle$ (либо в кратном ему состоянии $u|\alpha\rangle$, где $u \neq 0$) – или только что в это состояние «перескочила». Таким образом, в случае примитивного измерения результат ДА определяет физическое состояние системы как нечто конкретное и единственное, тогда как результат НЕТ может предполагать несколько альтернативных вариантов развития событий. Примитивными являются, например, описанные выше измерения спина, посредством которых мы пытались установить, не находится ли спин в том или ином состоянии (скажем, в состоянии $|\downarrow\uparrow\downarrow\dots\uparrow\rangle$).

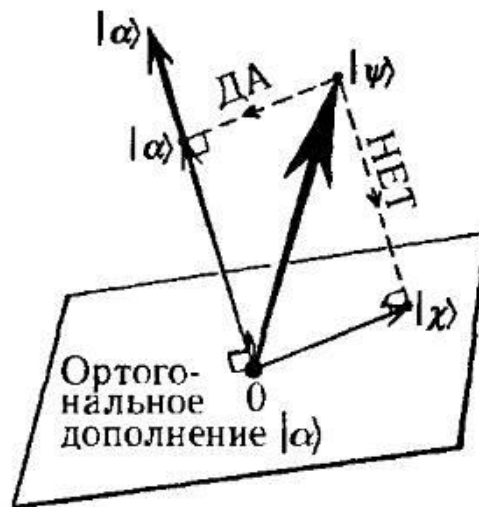


Рис. 5.24. Примитивное измерение проецирует состояние $|\psi\rangle$ в состояние, кратное заданному состоянию $|\alpha\rangle$ (в случае ответа ДА), или в состояние, являющееся ортогональным дополнением $|\alpha\rangle$ (в случае ответа НЕТ).

При примитивном измерении результат НЕТ проецирует состояние системы на состояние, ортогональное $|\alpha\rangle$. На рис. 5.24 представлена геометрическая интерпретация этой процедуры. За начальное состояние примем состояние $|\psi\rangle$ (обозначенное на рисунке большой стрелкой) – в результате измерения оно «перескакивает» либо в состояние, кратное $|\alpha\rangle$ (если ответ ДА), либо проецируется на состояние, ортогональное $|\alpha\rangle$ (если ответ НЕТ). Со случаем НЕТ никаких дополнительных проблем не возникает – согласно стандартной квантовой теории, именно такого результата и следует ожидать. В случае же ответа ДА ситуация осложняется тем, что здесь квантовая система вступает во взаимодействие с измерительным устройством, переходя в состояние, значительно более хитроумное, нежели просто $|\alpha\rangle$. Результатом такой эволюции оказывается, в общем случае, так называемое сцепленное состояние, «сплетающее» в одно целое исходную квантовую систему и измерительное устройство. (Сцепленные состояния мы рассмотрим в §5.17.) Тем не менее, дальше квантовая система должна эволюционировать так, будто она и в самом деле перескочила в состояние, кратное $|\alpha\rangle$; в противном случае последующая эволюция системы становится неоднозначной.

Алгебраически этот скачок выражается следующим образом. Вектор состояния $|\psi\rangle$ всегда можно записать (в данном случае – однозначно, поскольку вектор $|\alpha\rangle$ задан) в виде

$$|\psi\rangle = z|\alpha\rangle + |\chi\rangle,$$

где $|\chi\rangle$ ортогонален $|\alpha\rangle$. Вектор $z|\alpha\rangle$ есть ортогональная проекция вектора $|\psi\rangle$ на луч, содержащий вектор $|\alpha\rangle$, а $|\chi\rangle$ – это ортогональная проекция $|\psi\rangle$ на пространство ортогональных дополнений $|\alpha\rangle$ (т.е. на пространство всех векторов, ортогональных $|\alpha\rangle$). Если измерение дает результат ДА, то это нужно понимать так, что вектор состояния перескочил в $z|\alpha\rangle$ (или просто в $|\alpha\rangle$), что является

отправной точкой его последующей эволюции. Если же результат НЕТ, то вектор перескакивает в $|\chi\rangle$.

Какие вероятности следует приписать каждому из двух альтернативных результатов? Для того, чтобы воспользоваться предложенным выше «правилом квадратов модулей», будем полагать вектор $|\alpha\rangle$ единичным и выберем некоторый единичный вектор $|\phi\rangle$ в направлении вектора $|\chi\rangle$, т.е. $|\chi\rangle = w|\phi\rangle$. Тогда выражение принимает вид

$$|\psi\rangle = z|\alpha\rangle + w|\phi\rangle$$

(где, собственно, $z = \langle\alpha|\psi\rangle$ и $w = \langle\phi|\psi\rangle$), а относительные вероятности результатов ДА и НЕТ вычисляются через отношение квадратов $|z|^2$ и $|w|^2$. Если и сам вектор $|\psi\rangle$ является единичным, то величины $|z|^2$ и $|w|^2$ представляют собой фактические вероятности, соответственно, результатов ДА и НЕТ.

Можно сформулировать всё это и по-другому, причем в настоящем контексте получится даже несколько проще (в качестве упражнения предлагаю заинтересованному читателю самостоятельно убедиться в том, что эти формулировки эквивалентны). Для того, чтобы определить фактическую вероятность каждого из возможных результатов (в данном случае, ДА и НЕТ), мы просто возводим в квадрат длину вектора $|\psi\rangle$ (ненормированного к единичному вектору), после чего сравниваем полученное значение с квадратами длины соответствующих проекций. Коэффициент уменьшения в каждом случае и будет представлять собой искомую вероятность.

В заключение следует упомянуть, что в случае общего измерения типа «да/нет» (т.е. не только примитивного), когда ДА-состояния не обязательно принадлежат одному-единственному лучу, рассуждение будет по большей части аналогично вышеприведенному. Только здесь речь пойдет о ДА-подпространстве Д и НЕТ-подпространстве Н. Эти подпространства являются ортогональными дополнениями друг друга – в том смысле, что любой вектор одного ортогонален любому вектору другого; вместе же они заполняют всё исходное гильбертово пространство. Согласно проекционному постулату, при измерении первоначальный вектор состояния $|\psi\rangle$ ортогонально проецируется на подпространство Д, если получен ответ ДА, и на подпространство Н, если получен ответ НЕТ. Относительные вероятности этих результатов здесь также определяются коэффициентами уменьшения квадрата длины вектора состояния при соответствующем проецировании (см. НРК с. 263, рис. 6.23 {= МОИ № 15, с.91}). Впрочем, статус проекционного постулата в данном случае представляется несколько менее ясным, чем при нулевом измерении, поскольку при утвердительном результате измерения результирующее состояние сцепляется с состоянием измерительного устройства. Поэтому в последующих рассуждениях я ограничусь более простыми примитивными измерениями, ДА-пространство которых состоит из одного-единственного луча (содержащего векторы, кратные $|\psi\rangle$). Для наших нужд этого будет вполне достаточно.

§5.14. Коммутирующие измерения

При проведении нескольких последовательных измерений квантовой системы порядок, в котором эти измерения выполняются, может быть, в общем случае, важным. Измерения, от порядка выполнения которых зависит, какой вектор состояния мы получим в конечном итоге, называются некоммутирующими. Если же порядок выполнения измерений не играет абсолютно никакой роли (не изменяется даже фаза результирующего состояния), то мы говорим, что такие измерения коммутируют. В терминах гильбертова пространства это можно понимать так: при нескольких последовательных ортогональных проекциях заданного вектора состояния $|\psi\rangle$ окончательный результат, как правило, зависит от порядка выполнения этих проекций. В случае коммутирующих измерений порядок их выполнения никакой роли не играет.

Что же происходит в случае примитивных измерений? Нетрудно убедиться, что для коммутируемости двух различных примитивных измерений необходимо, чтобы ДА-луч одного был ортогонален ДА-лучу другого. Например, примитивные измерения спина атома со спином $\frac{1}{2}\hbar$ (см. §5.10) можно выполнять в любом порядке, так как все возможные состояния здесь ($|\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, $|\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, ..., $|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle$) ортогональны друг другу. Таким образом, окончательный результат измерения никак не зависит от выбранного мной конкретного порядка выполнения примитивных измерений – все эти измерения коммутируют. Впрочем, в общем случае это не всегда так – например, нам может вздуматься выполнять отдельные измерения спина относительно различных направлений. Такие измерения, как правило, не коммутируют.

§5.15. Квантовомеханическое «И»

В квантовой механике имеется стандартная процедура для исследования систем из двух и более независимых компонентов. Эта процедура понадобится нам, в частности, при рассмотрении с квантовой точки зрения (которое мы планируем дать в §5.18) системы, состоящей из двух далеко разнесенных в пространстве частиц со спином $3/2$ – тех самых частиц, которые «Квинтэссенциальные Товары» поместили в магические додекаэдры (см. §5.3). Необходима такая процедура и для квантовомеханического описания детектора в момент сцепления его состояния с квантовым состоянием регистрируемой частицы.

Рассмотрим для начала систему, состоящую всего из двух независимых (не взаимодействующих) компонентов. Допустим, что каждый из этих компонентов (в отсутствие другого) описывается своим вектором состояния – скажем, $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$. Как описать всю систему, в которой присутствуют оба компонента? Обычная процедура заключается в составлении так называемого тензорного (или внешнего) произведения этих векторов, которое записывается следующим образом:

$$|\alpha\rangle|\beta\rangle.$$

Мы можем рассматривать это произведение как стандартный квантовомеханический способ представления обыкновенного логического «И» – в том смысле, что такая система объединяет в себе в некоторый момент времени обе независимые квантовые системы, представленные, соответственно, векторами состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$. (Например, $|\alpha\rangle$ может представлять электрон, находящийся в точке A , а $|\beta\rangle$ – атом водорода в некоторой отдаленной точке B . Тогда состояние, в котором электрон находится в точке A , а атом водорода – в точке B , будет представлено произведением $|\alpha\rangle|\beta\rangle$.) Величина $|\alpha\rangle|\beta\rangle$ представляет одно квантовое состояние – мы вполне можем обозначить его одним вектором состояния, скажем, $|\chi\rangle$, и, не нарушив ни одного закона, записать

$$|\chi\rangle = |\alpha\rangle|\beta\rangle.$$

Следует особо подчеркнуть, что это понятие «И» не имеет ничего общего с квантовой линейной суперпозицией, которая записывается как сумма векторов состояний $|\alpha\rangle + |\beta\rangle$ или, в общем случае, $z|\alpha\rangle + w|\beta\rangle$, где z и w – комплексные весовые коэффициенты. Например, если $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ – возможные состояния одного фотона (соответствующие, скажем, его расположению в различных точках A и B), то запись $|\alpha\rangle + |\beta\rangle$ также представляет возможное состояние того же самого фотона, при котором он замирает в нерешительности где-то между A и B в соответствии с маловразумительными предписаниями квантовой теории, – одного фотона, заметим, никак не двух. Состояние пары фотонов, при котором один находится в точке A , а другой – в точке B , будет представлено уже вектором $|\alpha\rangle|\beta\rangle$.

Тензорное произведение подчиняется тем же алгебраическим правилам, каким, по нашим представлениям, и должно подчиняться любое уважающее себя произведение:

$$\begin{aligned}(z|\alpha\rangle)|\beta\rangle &= z(|\alpha\rangle|\beta\rangle) = |\alpha\rangle(z|\beta\rangle), \\ (|\alpha\rangle + |\gamma\rangle)|\beta\rangle &= |\alpha\rangle|\beta\rangle + |\gamma\rangle|\beta\rangle, \\ |\alpha\rangle(|\beta\rangle + |\gamma\rangle) &= |\alpha\rangle|\beta\rangle + |\alpha\rangle|\gamma\rangle, \\ (|\alpha\rangle|\beta\rangle)|\gamma\rangle &= |\alpha\rangle(|\beta\rangle|\gamma\rangle),\end{aligned}$$

разве что равенство $|\alpha\rangle|\beta\rangle = |\beta\rangle|\alpha\rangle$, строго говоря, некорректно. Это, впрочем, отнюдь не означает, что интерпретация понятия «И» в квантовомеханическом контексте предполагает, что совокупная система « $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ » физически чем-то отличается от совокупной системы « $|\beta\rangle$ и $|\alpha\rangle$ ». Мы попробуем обойти эту проблему посредством несколько более глубокого погружения в таинства действительного поведения Вселенной на квантовом уровне. В дальнейшем под записью $|\alpha\rangle|\beta\rangle$ мы будем подразумевать не то, что математики называют «тензорным произведением», а скорее то, что в математической физике (с недавних пор) называется грассмановым произведением. Тогда к записанным выше можно добавить еще одно правило:

$$|\beta\rangle|\alpha\rangle = \pm |\alpha\rangle|\beta\rangle.$$

Знак «минус» появляется здесь лишь в том случае, когда оба состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ «охватывают» нечетное количество частиц с нецелочисленным спином. (Такие частицы называются фермионами, а их спин принимает значения $1/2, 3/2, 5/2, 7/2, \dots$. Частицы со спином $0, 1, 2, 3, \dots$ называются бозонами и на знак в приведенном выше выражении никак не влияют.) Впрочем, на данном этапе читателю нет необходимости вникать во все эти формальности. До тех пор, пока

нас занимает лишь скрывающееся за описанием физическое состояние, « $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ » ничем не отличается от « $|\beta\rangle$ и $|\alpha\rangle$ ».

Для описания состояний с тремя или бóльшим количеством независимых компонентов мы просто повторяем процедуру. Так, если обозначить индивидуальные состояния этих трех компонентов через $|\alpha\rangle$, $|\beta\rangle$ и $|\gamma\rangle$, то состояние, в котором все три компонента наличествуют одновременно, описывается произведением

$$|\alpha\rangle|\beta\rangle|\gamma\rangle,$$

причем грассманово произведение $(|\alpha\rangle|\beta\rangle)|\gamma\rangle$ (или, что эквивалентно, $|\alpha\rangle(|\beta\rangle|\gamma\rangle)$) описывает то же самое состояние. Аналогичным образом рассматриваются и системы с четырьмя или более независимыми компонентами.

Следует упомянуть и об одном важном свойстве шрёдингеровой эволюции U : эволюция совокупной системы $|\alpha\rangle|\beta\rangle$ (где $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ никак друг с другом не взаимодействуют) есть не что иное, как совокупность эволюций индивидуальных систем. Так, если по истечении некоторого времени t система $|\alpha\rangle$ эволюционирует (индивидуально) в систему $|\alpha'\rangle$, а система $|\beta\rangle$ эволюционирует (индивидуально) в систему $|\beta'\rangle$, то совокупная система $|\alpha\rangle|\beta\rangle$ за то же время t эволюционирует в систему $|\alpha'\rangle|\beta'\rangle$. Аналогично, если у нас имеется три не взаимодействующих компонента $|\alpha\rangle$, $|\beta\rangle$ и $|\gamma\rangle$, эволюционирующих, соответственно, в $|\alpha'\rangle$, $|\beta'\rangle$ и $|\gamma'\rangle$, то совокупная система $|\alpha\rangle|\beta\rangle|\gamma\rangle$ посредством той же эволюции переходит в состояние $|\alpha'\rangle|\beta'\rangle|\gamma'\rangle$. То же верно для четырех и более компонент.

Отметим, что свойство это очень похоже на свойство линейности эволюции U (см. §5.7), согласно которому результат эволюции суперпозиции состояний в точности совпадает с суперпозицией результатов эволюции отдельных состояний. Состояние $|\alpha\rangle + |\beta\rangle$, например, эволюционирует в $|\alpha'\rangle + |\beta'\rangle$. Тем не менее, речь в обоих случаях идет о совершенно разных вещах, и очень важно об этой разнице не забывать. Нет ничего удивительного в том, что система, составленная из не взаимодействующих независимых компонентов, эволюционирует – как целое – так, словно ни один из ее отдельных компонентов понятия не имеет о присутствии в системе остальных. Независимость компонентов (т.е. полное отсутствие каких бы то ни было взаимодействий между ними) в данном случае – существенное условие, иначе свойство не «работает». Свойство линейности же оказывается поистине неожиданным. Получается, что под действием U системы-суперпозиции состояний эволюционируют как набор отдельных, полностью изолированных друг от друга состояний независимо от того, изолированы эти состояния в действительности или между ними существуют какие-то взаимодействия. Одного этого достаточно, чтобы усомниться в абсолютной справедливости свойства линейности. И всё же эволюция U линейна (и тому есть многочисленные подтверждения), но лишь в отношении феноменов, целиком и полностью ограниченных квантовым уровнем. Нарушение же линейности происходит, по всей видимости, исключительно под действием процедуры R . К этому вопросу мы еще вернемся.

§5.16. Ортогональность произведений состояний

С ортогональностью произведений состояний (в том виде, в каком я определил эти произведения выше) дела обстоят не так просто, как хотелось бы. Допустим, у нас имеется два ортогональных состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$; тогда мы вправе ожидать, что состояния $|\psi\rangle|\alpha\rangle$ и $|\psi\rangle|\beta\rangle$ также будут ортогональными, причем при любом $|\psi\rangle$. Пусть, например, $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ – возможные альтернативные состояния фотона, где $|\alpha\rangle$ – состояние фотона, зарегистрированного неким фотоэлементом, а ортогональное $|\alpha\rangle$ состояние $|\beta\rangle$ – предполагаемое состояние фотона в случае, когда фотоэлемент не регистрирует ничего (нулевое измерение). Можно представить себе, что наш фотон является компонентом некоей совокупной системы – просто добавим к нему еще какой-нибудь объект (например, другой фотон, скажем, где-нибудь на Луне) и обозначим состояние этого другого объекта через $|\psi\rangle$. Таким образом, для нашей совокупной системы возможны два альтернативных состояния – $|\psi\rangle|\alpha\rangle$ и $|\psi\rangle|\beta\rangle$. Простое добавление состояния $|\psi\rangle$ в имеющееся описание не должно, разумеется, оказать никакого влияния на ортогональность двух первоначальных состояний. В самом деле, если говорить об определении произведения состояний в терминах обычного «тензорного произведения» (или необычного – в данном случае, грассманова произведения, а точнее, некоторой его модификации, используемой в наших рассуждениях), то так оно и есть, и из ортогональности состояний $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ действительно следует ортогональность $|\psi\rangle|\alpha\rangle$ и $|\psi\rangle|\beta\rangle$.

Как бы то ни было, пути, которыми, похоже (согласно последним данным квантовой теории), предпочитает следовать Вселенная, далеко не столь прямолинейны. Если бы состояние $|\psi\rangle$ можно было считать полностью независимым и от $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$, то тогда его присутствие и в самом деле ничего бы не меняло. Однако формально полной независимости здесь быть не может, и состояние даже пребывающего на Луне фотона оказывает самое непосредственное воздействие на состояние фотона, регистрируемого нашим фотоэлементом.³⁰ (С этими формальностями связано, в частности, то, что под обозначением $\langle\psi|\alpha\rangle$ мы подразумеваем произведение грассмано-на типа – если использовать более привычные термины, то речь тут идет о так называемой «статистике Бозе» (описание состояний фотонов и прочих бозонов) или о «статистике Ферми» (описание состояний фермионов – электронов, протонов и т.д.), см. НРК, с. 277, 278 и, скажем, [94].) Если бы перед нами стояла задача получить абсолютно точный с точки зрения теории результат, то рассмотрение состояния одного-единственного фотона потребовало бы учета состояний всех фотонов во Вселенной. Впрочем, необходимости в этом (к счастью) нет – и без такого учета точность получаемых результатов хоть и не абсолютна, но всё же чрезвычайно высока. Если состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ ортогональны, то можно с очень высокой степенью точности предположить, что ортогональными будут и состояния $|\psi\rangle|\alpha\rangle$ и $|\psi\rangle|\beta\rangle$ (даже если это произведения грассмано-на типа), где $|\psi\rangle$ – любое состояние, не имеющее очевидного отношения к рассматриваемой задаче (каковая задача непосредственно касается лишь ортогональных состояний $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$). Так и предположим.

§5.17. Квантовая сцепленность

Для того, чтобы двигаться дальше, нам не обойтись без понимания квантовой физики ЭПР-эффектов – квантовомеханических Z-загадок, ярким представителем которых является представленная мною выше задача о магических додекаэдрах (см. §5.3, §5.4). Кроме того, мы должны как-то разобраться с главной X-загадкой квантовой теории – парадоксальной взаимозависимостью между процессами эволюции U и редукции R, загадкой, порождающей проблему измерения, о которой мы поговорим в следующей главе. Следовательно, настала пора ввести очередную фундаментальную квантовую идею – понятие о сцепленных состояниях.

Начнем с того, что попытаемся выяснить, что включает в себя простой процесс измерения. Рассмотрим следующую ситуацию: фотон находится в суперпозиции, скажем, $|\alpha\rangle + |\beta\rangle$, где в состоянии $|\alpha\rangle$ фотон активирует детектор, в состоянии же $|\beta\rangle$, ортогональном $|\alpha\rangle$, фотон никакого воздействия на детектор не оказывает. (Похожий пример рассматривался в §5.8, когда на детектор, расположенный в точке G, падал фотон, пребывающий в состоянии $-|F\rangle - i|G\rangle$. В состоянии $|G\rangle$ фотон активировал детектор, в состоянии $|F\rangle$ никакого воздействия на детектор не происходило.) Предположим далее, что детектору тоже можно сопоставить некое квантовое состояние, скажем, $|\Psi\rangle$. Вообще говоря, в квантовой теории это обычная практика. Лично мне не совсем ясно, какой может быть смысл в придании квантовомеханического описания объекту классического уровня, однако в дискуссиях на эту тему подобные вопросы, как правило, никого не занимают. Как бы то ни было, мы, думаю, можем согласиться с тем, что те элементы детектора, с которыми фотон сталкивается прежде всего, и в самом деле допускают рассмотрение согласно стандартным правилам квантовой теории. Поэтому, если у вас возникают какие-либо сомнения относительно правомерности применения этих правил ко всему детектору (как к целому), вы можете считать, что вектор состояния $|\Psi\rangle$ описывает поведение именно совокупности элементов квантового уровня (частиц, атомов, молекул), что принимают на себя, так сказать, первый удар.

В момент, непосредственно предшествующий столкновению фотона (или, точнее, $|\alpha\rangle$ -части волновой функции фотона) с детектором, физическое состояние системы объединяет в себе состояние детектора и состояние фотона, т.е. имеет вид $|\Psi\rangle(|\alpha\rangle + |\beta\rangle)$, а нам известно, что

$$|\Psi\rangle(|\alpha\rangle + |\beta\rangle) = |\Psi\rangle|\alpha\rangle + |\Psi\rangle|\beta\rangle.$$

³⁰ (*449) Любопытно, что такого рода феномены находят недвусмысленное подтверждение в реальных физических наблюдениях. Описанный Хэнбери Брауном и Твиссом [187, 188] эффект, в соответствии с которым были измерены диаметры некоторых близлежащих звезд, основывается как раз на таком «бозонном» свойстве взаимодействия достигающих Земли фотонов, испущенных с противоположных краев звезды.

Таким образом, мы имеем дело с суперпозицией состояния $|\Psi\rangle|\alpha\rangle$, описывающего детектор (элементы детектора) и приближающийся к нему фотон, и состояния $|\Psi\rangle|\beta\rangle$, описывающего детектор (элементы детектора) и фотон, находящийся где-то в другом месте. Предположим далее, что состояние $|\Psi\rangle|\alpha\rangle$ (детектор с приближающимся к нему фотоном) переходит, согласно шрёдингеровой эволюции U , в некоторое новое состояние $|\Psi_D\rangle$ (детектор регистрирует результат ДА) – в силу возникающих при столкновении взаимодействий между фотоном и элементами детектора. Предположим также, что если фотон с детектором не сталкивается, то под действием U состояние детектора $|\Psi\rangle$ эволюционирует (индивидуально) в состояние $|\Psi_N\rangle$ (детектор регистрирует НЕТ), а состояние $|\beta\rangle$ – в состояние $|\beta'\rangle$. Тогда, согласно свойствам шрёдингеровой эволюции, рассмотренным в предыдущем параграфе, общее состояние системы принимает вид

$$|\Psi_D\rangle + |\Psi_N\rangle|\beta'\rangle.$$

Перед нами типичный пример сцепленного состояния: термин «сцепленность» в данном случае отражает тот факт, что общее состояние системы невозможно записать просто в виде произведения состояния одной из ее подсистем (фотона) на состояние другой подсистемы (детектора). Более того, состояние $|\Psi_D\rangle$ и само, по всей вероятности, является сцепленным (по меньшей мере, с состояниями элементов собственного окружения), однако подтверждение этой сцепленности требует детального исследования соответствующих взаимодействий, не имеющих к теме нашего разговора никакого отношения.

Отметим, что состояния $|\Psi\rangle|\alpha\rangle$ и $|\Psi\rangle|\beta\rangle$, суперпозицией которых представлено состояние совокупной системы непосредственно перед столкновением, (существенно) ортогональны – поскольку ортогональны состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$, а $|\Psi\rangle$ никак не зависит ни от того, ни от другого. Таким образом, ортогональными должны быть и состояния, в которые они эволюционируют под действием U , – $|\Psi_D\rangle$ и $|\Psi_N\rangle|\beta'\rangle$. (Эволюция U всегда сохраняет ортогональность.) Состояние $|\Psi_D\rangle$ может в дальнейшем эволюционировать в нечто, наблюдаемое на макроскопическом уровне, – например, в слышимый человеческим ухом щелчок, указывающий на то, что фотон действительно был зарегистрирован. Если же никакого щелчка мы не услышали, то это надо понимать так, что система находится в ортогональном альтернативном состоянии $|\Psi_N\rangle|\beta'\rangle$ (или только что в него «перескочила»). Одна лишь контрфактуальная возможность – щелчок мог прозвучать, но не прозвучал – вызывает «скачок» состояния из суперпозиции в состояние $|\Psi_N\rangle|\beta'\rangle$, причем новое состояние уже не является сцепленным. Его расцепило нулевое измерение.

Характерной особенностью сцепленных состояний является то, что «скачок», сопровождающий процедуру R , может в данном случае иметь, на первый взгляд, нелокальное (или даже явно ретроактивное) действие, еще более удивительное, чем результат простого нулевого измерения. Такая нелокальность, в частности, имеет место в так называемых ЭПР-эффектах (или феноменах Эйнштейна – Подольского – Розена). Эти эффекты – подлинные квантовые чудеса – можно отнести к наиболее непостижимым Z -загадкам квантовой теории. Идею подобного парадокса первоначально выдвинул Эйнштейн, желая показать, что формализм квантовой теории не в состоянии дать исчерпывающее описание Вселенной. Впоследствии было предложено множество различных вариантов ЭПР-феноменов (например, магические додекаэдры из §5.3), причем некоторые из них получили прямое экспериментальное подтверждение, т.е. оказались неотъемлемой частью действительного устройства мира, в котором мы живем (см. §5.4).

ЭПР-эффекты возникают в следующего рода ситуациях. Рассмотрим известное начальное состояние $|\Omega\rangle$ физической системы, которое эволюционирует (согласно U) в суперпозицию двух ортогональных состояний, каждое из которых представляет собой произведение двух независимых состояний, описывающих два пространственно разделенных физических компонента системы – т.е. $|\Omega\rangle$ эволюционирует, скажем, в сцепленное состояние

$$|\psi\rangle|\alpha\rangle + |\phi\rangle|\beta\rangle.$$

Допустим, состояния $|\psi\rangle$ и $|\phi\rangle$ – это ортогональные альтернативы для одного компонента системы, а $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ – ортогональные альтернативы для другого компонента. Измерение, устанавливающее в каком из состояний, $|\psi\rangle$ или $|\phi\rangle$, находится первый компонент, тем самым немедленно определяет и соответствующее состояние ($|\alpha\rangle$ или $|\beta\rangle$) второго компонента.

Пока, кажется, ничего сверхъестественного. Кто-то может даже предположить, что нечто очень похожее мы могли наблюдать в случае с добрым доктором Бертлманом и его носками (§5.4). Коль скоро нам известно, что носки доктора должны быть разного цвета, – и кроме того, мы выяснили, что сегодня он остановил свой выбор, скажем, на зеленом и розовом, – то наблюдение, устанавливающее, что левый носок доктора зеленый (состояние $|\psi\rangle$) или же розовый

(состояние $|\phi\rangle$), немедленно определяет цвет его правого носка – соответственно, розового (состояние $|\alpha\rangle$) или зеленого (состояние $|\beta\rangle$). Как бы то ни было, эффекты квантовой сцепленности могут фундаментально отличаться от вышеописанного, и никакая «бертлманоносочная» трактовка не в состоянии объяснить все наблюдаемые результаты. Серьезные проблемы начинаются тогда, когда компоненты системы могут быть измерены несколькими альтернативными способами.

Проиллюстрируем сказанное примером. Предположим, что начальное состояние $|\Omega_0\rangle$ описывает спиновое состояние некоторой частицы как спин 0. Частица затем распадается на две новые частицы (каждая со спином $1/2$), которые разлетаются в разные стороны (скажем, влево и вправо), удаляясь на значительное расстояние друг от друга. Из свойств кинетического момента и из закона его сохранения следует, что спины образовавшихся при распаде частиц должны быть ориентированы в противоположном направлении; таким образом, состояние нулевого спина, в которое эволюционирует $|\Omega_0\rangle$, имеет вид

$$|\Omega\rangle = |L\uparrow\rangle|R\downarrow\rangle - |L\downarrow\rangle|R\uparrow\rangle,$$

где «L» обозначает частицу, движущуюся влево, а «R» – частицу, движущуюся вправо (знак «минус» появляется согласно стандартному правилу). Допустим, мы решаем провести измерение спина левой частицы на предмет направленности его оси «вверх». Тогда ответ ДА (т.е. обнаружение состояния $|L\uparrow\rangle$) автоматически поместит правую частицу в состояние $|R\downarrow\rangle$ («спин вниз»). Ответ НЕТ ($|L\downarrow\rangle$) автоматически помещает правую частицу в состояние «спин вверх» ($|R\uparrow\rangle$). Похоже, что измерение частицы «здесь» способно мгновенно повлиять на состояние частицы «там» (причем это «там» может быть очень далеко отсюда) – что, впрочем, ничуть не более удивительно, чем все те же «бертлмановские носки»!

Однако это сцепленное состояние можно представить и иначе; для этого нужно всего лишь выполнить другое измерение. Например, мы могли бы выбрать при измерении спина левой частицы другое направление – не вертикальное, а горизонтальное, т.е. ответ ДА соответствовал бы состоянию, скажем, $|L\leftarrow\rangle$, а ответ НЕТ – состоянию $|L\rightarrow\rangle$. Путем простого вычисления (см. НРК, с. 283) находим, что то же совокупное состояние $|\Omega\rangle$ можно записать иначе:

$$|\Omega\rangle = |L\leftarrow\rangle|R\rightarrow\rangle - |L\rightarrow\rangle|R\leftarrow\rangle.$$

Таким образом, ответ ДА при измерении левой частицы автоматически помещает правую частицу в состояние $|R\rightarrow\rangle$, а ответ НЕТ – в состояние $|R\leftarrow\rangle$. Какое бы направление для измерения спина левой частицы мы ни выбрали, мы получим соответствующий, отличный от прочих, результат.

Что в подобного рода ситуациях замечательно, так это то, что простой выбор направления оси спина левой частицы определяет, судя по всему, направление оси спина правой частицы. Более того, пока не получен результат левого измерения, никакой реальной информации правой частице не передается. Одно лишь «установление направления оси спина» не производит, само по себе, никакого реально наблюдаемого эффекта. Несмотря на то, что сегодня все это хорошо понимают, до сих пор встречаются люди, которые тешат себя надеждой отыскать способ использовать ЭПР-эффект для мгновенной передачи сигналов из одного места в другое; ведь редукция вектора состояния R «редуцирует» квантовое состояние ЭПР-пары частиц мгновенно, вне зависимости от того, какое расстояние их разделяет. Как это ни печально, однако способа передать посредством описанной процедуры сигнал от левой частицы к правой не существует (см. [145]).

Согласно стандартному квантовомеханическому формализму всё, действительно, так и выглядит: немедленно по выполнении измерения, скажем, левой частицы происходит редукция полного состояния системы – из начального сцепленного состояния (где ни одна частица в отдельности определенного спинового состояния не имеет) в состояние, при котором левое состояние «расцепляется» с правым, а оба спина приобретают вполне определенное значение. В математическом описании в терминах вектора состояния измерение слева и в самом деле производит на правую частицу мгновенное воздействие. Но, как я уже говорил, передать посредством такого «мгновенного воздействия» физический сигнал, увы, невозможно.

Согласно принципам теории относительности, физические сигналы (т.е. всё, что способно передавать реальную информацию) неизбежно ограничены в своем распространении скоростью света: они могут распространяться медленнее, но быстрее – никогда. Однако для ЭПР-эффектов такое рассмотрение не годится. Представление об ЭПР-эффектах как о конечных сигналах, распространение которых ограничено скоростью света, противоречит всем предсказаниям

квантовой теории. (Это обстоятельство хорошо иллюстрируется примером с магическими додекаэдрами – сцепленность между моим додекаэдром и додекаэдром моего коллеги гарантирует их мгновенное взаимодействие, и нет необходимости ждать четыре года, которые затратит на преодоление расстояния между нами световой сигнал; см. §5.3, §5.4, а также примечание 4 в конце главы.³¹) Следовательно, ЭПР-эффекты не могут быть сигналами в обычном смысле этого слова.

Как же в таком случае объяснить тот факт, что ЭПР-эффекты способны-таки повлечь за собой вполне наблюдаемые последствия? То, что они способны, следует, например, из знаменитой теоремы Джона Белла (см. §5.4). Совместные вероятности, предсказываемые квантовой теорией для различных возможных измерений состояния двух частиц со спином $\frac{1}{2}$ (с независимым выбором направления оси спина левой и правой частицы), невозможно получить ни в какой классической модели несообщающихся левого и правого объектов. (Такого рода примеры описаны и в НРК, с. 284–285 и 301.) Магические додекаэдры из §5.3 дают еще более сильный эффект – здесь речь идет уже не просто о вероятностях, но о вполне точных «да/нет» ограничениях. Таким образом, хотя левая и правая частицы не сообщаются друг с другом в смысле реальной возможности мгновенной передачи сообщений от одного к другому, они, тем не менее, остаются сцепленными в том смысле, что их нельзя рассматривать как отдельные независимые объекты, – до того момента, пока их окончательно не расцепит измерение. Квантовая сцепленность – это загадочный феномен, находящийся где-то между прямым сообщением и полным разделением и не имеющий классического аналога. Более того, эффект сцепленности не ослабевает с увеличением расстояния между объектами (в отличие, скажем, от гравитационного или электрического притяжения, величина которого обратно пропорциональна этому самому расстоянию). Эйнштейна это свойство сцепленности крайне нервировало, он называл его «жутковатым действием на расстоянии» (см. [259]).

Квантовая сцепленность не обращает никакого внимания не только на разделенность в пространстве, но и на разделенность во времени. Если измерение одного из компонентов ЭПР-пары выполнено прежде такого же измерения другого компонента, то в обычном квантовомеханическом описании считается, как правило, что расцепленность пары явилась результатом именно первого измерения; второе же измерение «захватывает» уже только один, расцепленный, компонент – собственно тот, над которым оно производится. Однако в точности такие же наблюдаемые результаты мы получим, если допустим, что второе измерение каким-то образом ретроактивно вызвало расцепление, оставив первое в стороне. Окончательный результат не зависит от порядка выполнения измерений – иначе говоря, измерения коммутируют (см. §5.14).

Такая симметрия является необходимым свойством ЭПР-измерений – в противном случае, они противоречили бы наблюдаемым результатам специальной теории относительности. Измерения, производимые над пространственноподобно разделенными событиями (например, событиями, находящимися вне световых конусов друг друга; см. рис. 5.25 и объяснение, приведенное в §4.4 {= МОИ № 17}), неминуемо должны коммутировать – при этом и в самом деле абсолютно неважно, какое именно измерение мы будем полагать «первым», – согласно незыблемым принципам специальной теории относительности. Для того, чтобы в этом убедиться, предположим, что вся эта физическая ситуация описывается с точек зрения двух разных наблюдателей, движущихся каждый в своей системе отсчета (см. рис. 5.26, а также НРК, с. 287). (Эти «наблюдатели» вовсе не обязаны иметь какое бы то ни было отношение к тем, кто выполняет измерения.) В представленной ситуации наблюдатели получают совершенно противоположные представления о том, какое измерение было в действительности выполнено «первым». В отношении измерений ЭПР-типа, феномен квантовой сцепленности – или, если угодно, расцепленности³² – не знает ни разделенности в пространстве, ни последовательности во времени!

³¹ В.Э.: У меня помечено выше в этом томе как *4.

³² Можно привести примеры [393], когда сцепленность пары частиц сама может оказаться компонентом сцепленной пары!



Рис. 5.25. Два события в пространстве-времени называются пространственноподобно разделенными, если каждое из них находится вне светового конуса другого (см. также рис. 4.1, с. 349). В этом случае события не могут оказывать друг на друга никакого причинно-следственного воздействия, следовательно, измерения, производимые над этими событиями, должны коммутировать.

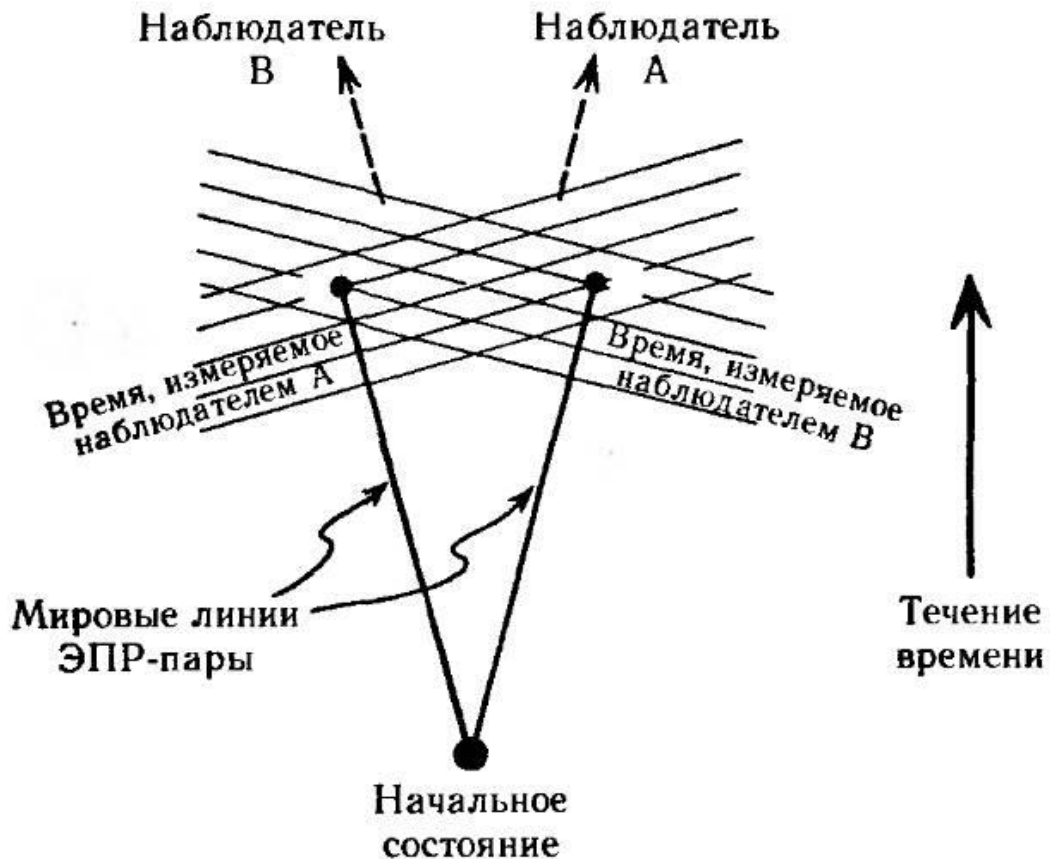


Рис. 5.26. Согласно специальной теории относительности, наблюдатели А и В, движущиеся относительно друг друга, получают различные представления о том, какое из двух пространственноподобно разделенных событий Р и Q произошло первым (наблюдатель А полагает, что первым было событие Q, а наблюдатель В уверен, что событие Р).

§5.18. Объяснение загадки магических додекаэдров

Для ЭПР-пары частиц со спином $\frac{1}{2}$ эта пространственная или временная нелокальность проявляется исключительно в виде вероятностей. Однако на деле феномен квантовой сцепленности вероятностями не ограничивается – он гораздо более конкретен и точен.

Магические додекаэдры (и кое-какие более ранние конфигурации³³ убедительно показывают, что странная нелокальность квантовой сцепленности не только порождает вероятности, но и является причиной вполне определенных «да/нет»-эффектов, которые никакими классическими построениями объяснить невозможно.

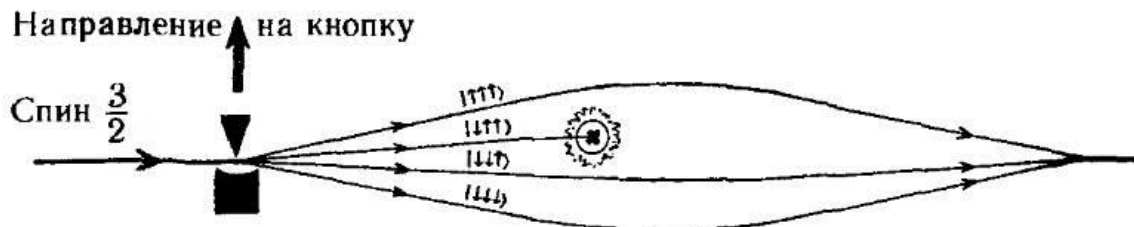


Рис. 5.27. «Квинтэссенциальные Товары» устроили всё таким образом, что при нажатии на кнопку в одной из вершин додекаэдра выполняется измерение спина атома со спином $3/2$ в направлении на кнопку (какое направление принимается за направление «вверх»). Если при этом измерении обнаруживается состояние $|\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$, то звенит звонок (результат ДА). Если получен результат НЕТ, лучи сводятся вместе, и измерение повторяется в каком-либо другом направлении.

Попытаемся разобраться в квантовой механике феномена магических додекаэдров из §5.3. Вспомним, что «Квинтэссенциальные Товары», там, у себя, на Бетельгейзе, взяли систему с общим спином 0 (начальное состояние $|\Omega\rangle$), разделили ее на два атома (каждый со спином $3/2$) и подвесили аккуратно каждый атом в центр додекаэдра. Додекаэдры затем тщательно упаковали и отправили почтой (один – мне, а другой – моему коллеге в систему альфы Центавра), обеспечив при этом полную неизменность спиновых состояний этих самых атомов до тех пор, пока кто-то из нас не выполнит, наконец, измерение спина, нажав на одну из кнопок, размещенных в вершинах додекаэдров. Дело в том, что нажатие на кнопку активирует (скажем, с помощью неоднородного магнитного поля, упомянутого в §5.10) измерение (типа измерения Штерна–Герлаха) атома, расположенного в центре соответствующего додекаэдра, – а возможных результатов измерения частицы со спином $3/2$, как нам известно, всего четыре, и они соответствуют (в случае, если измерительное устройство сориентировано вертикально) четырем взаимно ортогональным состояниям: $|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$, $|\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$, $|\downarrow\downarrow\uparrow\rangle$ и $|\downarrow\downarrow\downarrow\rangle$. Различаются эти состояния по местоположению атома после прохождения через устройство в одном из четырех возможных лучей. Однако «Квинтэссенциальные Товары» устроили всё таким образом, что при нажатии на любую кнопку измерительное устройство непременно оказывается сориентировано в направлении (от центра додекаэдра) на эту самую кнопку. Звонок звенит (результат ДА), если атом при измерении обнаруживается во втором из четырех возможных местоположений (см. рис. 5.27). Иначе говоря, ответ ДА (для случая, когда устройство ориентировано вертикально) вызывается состоянием $|\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$ – звенит звонок, за которым следует впечатляющий фейерверк, – остальные три состояния никакой реакции не вызывают (ответ НЕТ). В случае ответа НЕТ три оставшиеся луча сводятся вместе (скажем, посредством изменения направленности неоднородного магнитного поля на обратную), что не сопровождается никакими разрушительными эффектами, – и мы снова можем нажимать на какую-нибудь другую кнопку, выбирая тем самым новое направление изменения поля. Отметим тот факт, что каждое нажатие кнопки является, по сути своей, примитивным измерением, согласно определению этого термина, данному в §5.13.

Общее состояние $|\Omega\rangle$ нашей системы из двух атомов со спином $3/2$ можно записать следующим образом:

$$|\Omega\rangle = |L\uparrow\uparrow\uparrow\rangle|R\downarrow\downarrow\downarrow\rangle - |L\uparrow\uparrow\downarrow\rangle|R\downarrow\downarrow\uparrow\rangle + |L\uparrow\downarrow\downarrow\rangle|R\downarrow\uparrow\uparrow\rangle - |L\downarrow\downarrow\downarrow\rangle|R\uparrow\uparrow\uparrow\rangle.$$

Будем считать мой атом правым; в этом случае, если я обнаруживаю, что он действительно находится в состоянии $|R\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$, поскольку звонок звенит при моем первом нажатии на верхнюю кнопку, то звонок додекаэдра моего коллеги должен зазвенеть, если тому случится нажать первой кнопкой, противоположную моей, т.е. состояние его атома $|L\uparrow\downarrow\downarrow\rangle$. Более того, если при нажатии

³³ См., например, [225], а также ссылки, перечисленные в примечании 6 (у меня отмечено как *6 – В.Э.).

первой кнопки мой звонок не зазвонит, то не зазвонит и его звонок при нажатии противоположной кнопки.

Теперь необходимо убедиться, что при таких примитивных «кнопочных» измерениях действительно выполняются гарантируемые «Квинтэссенциальными Товарами» свойства (а) и (б). В Приложении С приведены некоторые математические подробности предложенного Майораной описания спиновых состояний (в частности, для спина 3/2), вполне достаточные для какого угодно доказательства. Для упрощения рассуждений представим себе, что сфера Римана проходит через все вершины рассматриваемого додекаэдра, т.е. описывает додекаэдр. Отметим далее, что в описании Майораны ДА-состояние для нажатия кнопки в некоторой вершине P додекаэдра включает в себя дважды саму точку P , а также точку P^* , антиподальную P , – что и в самом деле соответствует состоянию $|R\downarrow\uparrow\uparrow\rangle$, если точка P находится на северном полюсе додекаэдра. Иначе говоря, это ДА-состояние мы можем обозначить через $|P^*PP\rangle$.

Ключевым свойством спина 3/2 является то, что ДА-состояния для примитивных измерений, соответствующих нажатиям на кнопки при двух «следующих соседних» вершинах, ортогональны. В чем тут причина? Покажем, что майорановы состояния $|A^*AA\rangle$ и $|C^*CC\rangle$ действительно ортогональны для любых следующих соседних вершин A и C додекаэдра. Как видно из рис. 5.28, следующими соседними являются вершины додекаэдра, совпадающие с соседними вершинами куба, вписанного в додекаэдр и имеющего с ним общие центр и восемь вершин. Согласно Приложению С (последний абзац, с. 473), состояния $|A^*AA\rangle$ и $|C^*CC\rangle$ ортогональны, если вершины A и C являются соседними вершинами куба, так что свойство можно считать доказанным.

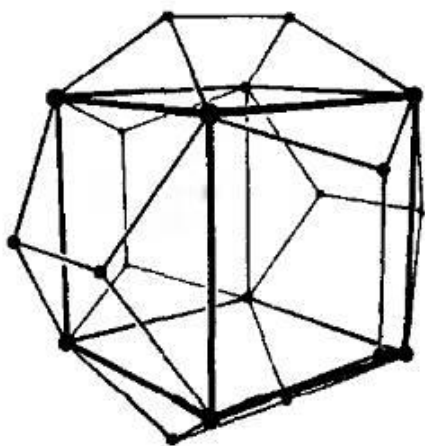


Рис. 5.28. Внутри правильного додекаэдра можно поместить куб, который будет иметь общие с додекаэдром центр и восемь (из двадцати) вершин. Отметим, что соседние вершины куба являются следующими соседними вершинами додекаэдра.

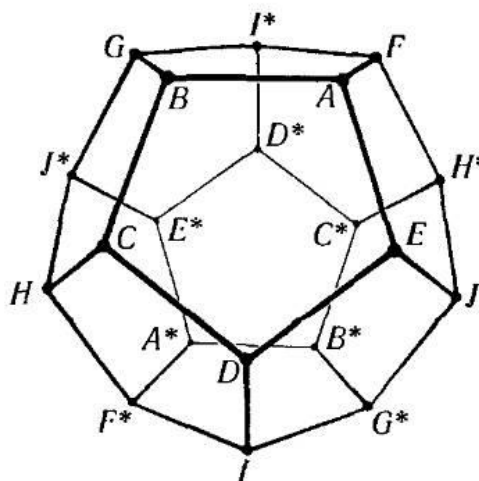


Рис. 5.29. Обозначение вершин додекаэдра, используемое в §5.18 и Приложении В (с. 467).

О чем это нам говорит? В частности, о том, что нажатия кнопок при трех вершинах додекаэдра, соседних с **ВЫБРАННОЙ** вершиной представляют собой коммутирующие измерения (§5.14), поскольку по отношению друг к другу эти вершины являются следующими соседними. Таким образом, порядок, в котором я буду на них нажимать, никак не повлияет на исход дела. Не имеет никакого значения и то, в каком порядке будет нажимать на кнопки своего додекаэдра мой коллега на альфе Центавра. Если его **ВЫБРАННОЙ** вершиной является вершина, противоположная моей, то противоположны моим и три коммутирующие кнопки его додекаэдра. Согласно всему вышесказанному, мой и его звонки должны зазвенеть при нажатии нами на противоположные кнопки независимо от того, в каком порядке каждый из нас нажимает на кнопки своего додекаэдра, – либо ни мой, ни его звонок не зазвонит вообще. Свойство (а) доказано.

Перейдем к свойству (б). Отметим, что гильбертово пространство для спина 3/2 четырёхмерно, так что три взаимно ортогональных возможных нажатия, при которых звонок мог

бы зазвенеть – скажем, те, которым соответствуют состояния $|A^*AA\rangle$, $|C^*CC\rangle$ и $|G^*GG\rangle$ (в качестве ВЫБРАННОЙ возьмем вершину В), – не вполне исчерпывают всех возможных альтернативных исходов. Остается еще вариант, когда не «звенит» ни одна из этих кнопок, в результате чего мы имеем нулевое измерение (все три кнопки были нажаты, а звонок не прозвенел), т.е. перед нами еще одно состояние (уникальное), ортогональное остальным трем $|A^*AA\rangle$, $|C^*CC\rangle$, $|G^*GG\rangle$. Обозначим это состояние через $|RST\rangle$, где R, S и T – точки на сфере Римана, необходимые для описания состояния по Майоране. Установить действительное расположение этих трех точек – задача далеко не тривиальная (но вполне решаемая, см. [395]). Впрочем, в настоящий момент нам абсолютно неважно, где именно они располагаются. Достаточно знать, что они где-то на сфере Римана и что их расположение определяется геометрией додекаэдра относительно ВЫБРАННОЙ вершины В. Так, в частности (благодаря симметричности додекаэдра), возьми я в качестве ВЫБРАННОЙ вместо В антиподальную ей вершину V^* , тогда результатом отсутствия звонка при нажатии всех кнопок при соседних с V^* вершинах A^* , C^* и G^* стало бы состояние $|R^*S^*T^*\rangle$, где R^* , S^* и T^* – точки, антиподальные точкам R, S и T.

Предположим теперь, что мой коллега ВЫБИРАЕТ на своем додекаэдре вершину В, в точности соответствующую той вершине В, что ВЫБРАЛ на своем додекаэдре я. Если при этом его звонок не звенит при нажатии любой из трех его кнопок при вершинах А, С и G, соседних с В, то его измерения (коммутирующие) неизбежно вынуждают мой атом перейти в состояние, ортогональное трем состояниям, соответствующим нажатиям на кнопки при противоположных вершинах A^* , C^* и G^* моего додекаэдра, т.е. в состоянии $|R^*S^*T^*\rangle$. Если же мой звонок также не звенит, когда я нажимаю на кнопки при вершинах А, С и G моего додекаэдра, то мой атом должен находиться в состоянии $|RST\rangle$. Однако, согласно свойству С.1 из Приложения С (с. 471), состояние $|RST\rangle$ ортогонально состоянию $|R^*S^*T^*\rangle$; следовательно, невозможно нажать все шесть кнопок без того, чтобы не зазвенел звонок, т.е. свойство (б) также можно считать доказанным.

Вышесказанное объясняет, каким образом «Квинтэссенциальным Товарам» удастся, используя феномен квантовой сцепленности, гарантировать наличие у додекаэдров свойств (а) и (б). Как было показано в §5.3, если бы наши додекаэдры вели себя как независимые объекты, из этого немедленно воспоследовали бы «раскрасочные» свойства (в), (г) и (д), что, в свою очередь, привело бы к неразрешимой проблеме раскрашиваемости вершин (каковая неразрешимость явно продемонстрирована в Приложении В, с. 467). Таким образом, то, чего ухитрились добиться с помощью квантовой сцепленности «Квинтэссенциальные товары», было бы просто-напросто невозможно, оказались бы магические додекаэдры по выходе за ворота фабрики «Квинтэссенциальных Товаров» действительно независимыми объектами, никак не связанными между собой. Квантовая сцепленность – это не просто досадная морока, не позволяющая нам с легким сердцем игнорировать вероятностные эффекты внешнего окружения на физическую ситуацию. Когда ее влияние удастся должным образом обособить, перед нами возникает феномен, точно описываемый математически и зачастую обладающий четкой геометрической организацией.

Предсказания квантовомеханического формализма нельзя описать в терминах объектов, рассматриваемых отдельно один от другого. Феномены квантовой сцепленности невозможно, в общем случае, объяснить рассуждениями «бертлмано-носочного» типа. Следуя правилам стандартной квантовомеханической эволюции – нашей процедуры U, – мы приходим к заключению, что «сцепленные» этим диковинным образом объекты остаются сцепленными вне зависимости от того, на какое расстояние им случится удалиться друг от друга. Сцепленность эту может разрушить только процедура R. Однако «реальна» ли процедура R? Если нет, то сцепленность никуда не исчезает, она остается навечно, пусть и скрытая от наших глаз чрезвычайной сложностью реального мира.

Означает ли это, что всё во Вселенной сцеплено со всем? Как уже было отмечено ранее (см. §5.17), феномен квантовой сцепленности не похож на феномены, рассматриваемые классической физикой, где интенсивность действия неминуемо убывает на расстоянии, благодаря чему объяснение поведения объектов в лаборатории на Земле не требует от нас знания того, что происходит в данный момент в галактике Туманность Андромеды. Квантовая же сцепленность представляется на первый взгляд как раз тем самым «жутковатым действием на расстоянии», столь раздражавшим Эйнштейна. Однако «действие» это чрезвычайно тонкого рода, и его невозможно использовать для реальной передачи сообщений.

Несмотря на то, что прямого сообщения с ее помощью осуществить не удастся, потенциальные дистанционные («жутковатые») эффекты квантовой сцепленности игнорировать нельзя. Коль скоро сцепленность не разрушается, мы, строго говоря, не можем полагать отдельным и независимым ни один объект во Вселенной. Складывающееся в результате в физической теории положение дел представляется мне весьма далеким от удовлетворительного. Никто не может по-настоящему объяснить, не выходя за рамки стандартной теории, почему на практике сцепленность можно-таки не принимать в расчет. Почему нам вовсе не обязательно представлять Вселенную в виде единого целого, такого невероятно сложного квантосцепленного спутанного клубка, не имеющего ничего общего с тем классическим по виду миром, который мы в реальности наблюдаем? На практике квантовые сцепленности разрушаются то и дело применяемой процедурой редукции R , что небезуспешно проделали и мы с коллегой, выполнив измерения над сцепленными атомами, помещенными внутрь наших додекаэдров. Является ли, в таком случае, эта самая редукция R реальным физическим процессом? Иными словами, действительно ли R , в том или ином смысле, разрушает квантовые сцепления? Или это надо понимать просто как фигуру речи, призванную обозначить некое иллюзорное действие?

В следующей главе мы попытаемся ответить на эти каверзные вопросы. Я убежден, что именно они являются центральными в нашем поиске места невычислимости в физических процессах.

Приложение В: Нераскрашиваемость додекаэдра

Напомним условие задачи, поставленной в §5.3. Предлагается показать, что невозможно раскрасить все вершины додекаэдра в БЕЛЫЙ и ЧЕРНЫЙ цвета, соблюдая следующие условия: две «следующие соседние» вершины не могут обе быть БЕЛЫМИ, а шесть вершин, соседних с двумя противоположными (антиподальными) вершинами, не могут быть все ЧЕРНЫМИ. При исключении возможных вариантов раскраски чрезвычайно полезной оказывается симметричность додекаэдра.

Обозначим вершины, как указано на рис. 5.29. Вершины A, B, C, D и E образуют ближайшую к нам пятиугольную грань додекаэдра; дальше, в том же порядке, следуют соседние с ними вершины F, G, H, I и J . Как и в §5.18, соответствующие антиподальные вершины обозначены через A^*, \dots, J^* . Для начала отметим, что, согласно второму свойству условия, среди вершин додекаэдра хотя бы одна должна быть БЕЛОЙ – пусть это будет A .

Предположим теперь, что среди непосредственных соседей БЕЛОЙ вершины A имеется еще одна БЕЛАЯ вершина – скажем, B (см. рис. 5.29). тогда все десять вершин, окружающие эту пару, – $C, D, E, J, H^*, F, I^*, G, J^*$ и H – должны быть ЧЕРНЫМИ, так как каждая из них является следующей соседней по отношению либо к A , либо к B . Далее, возьмем шесть вершин, соседних с вершинами из антиподальной пары H, H^* . В этой шестерке должна быть хотя бы одна БЕЛАЯ вершина, значит, БЕЛОЙ будет либо F^* , либо C^* (или обе сразу). Прделав ту же процедуру с парой J, J^* , приходим к выводу, что здесь БЕЛОЙ должна быть либо вершина G^* , либо E^* (или, опять же, обе сразу). Но это невозможно! И G^* , и E^* являются следующими соседними по отношению как к F^* , так и к C^* . Следовательно, вариант, когда у БЕЛОЙ вершины A имеется БЕЛЫЙ же непосредственный сосед, исключается – в самом деле, ввиду симметричности додекаэдра, невозможной оказывается любая пара соседних БЕЛЫХ вершин.

Таким образом, вершина A должна быть окружена исключительно ЧЕРНЫМИ вершинами $B, C, D, E, J, H^*, F, I^*$ и G , поскольку каждая из этих вершин является по отношению к A либо соседней, либо следующей соседней. Обратим наше внимание на шесть вершин, соседних с вершинами из антиподальной пары A, A^* . Очевидно, что одна из вершин B^*, E^* или F^* должна быть БЕЛОЙ, причем, в силу симметричности додекаэдра, неважно, какая именно, – пусть будет F^* . Отметим, что вершины E^* и G^* являются следующими соседними по отношению к F^* , значит, они обе должны быть ЧЕРНЫМИ; ЧЕРНОЙ должна быть и вершина H , поскольку она соседствует с F^* , а мы только что исключили возможность существования соседних БЕЛЫХ вершин. Однако так раскрашивать вершины нельзя, потому что при этом все соседи антиподальных вершин J, J^* оказываются ЧЕРНЫМИ. Вот, собственно, и всё доказательство – в классическом мире магические додекаэдры невозможны!

Приложение С: Ортогональность общих спиновых состояний

Предложенное Майораной обобщенное описание спиновых состояний не пользуется широкой известностью среди физиков, хотя оно весьма удобно и геометрически наглядно. Я расскажу здесь вкратце об основных формулах и о некоторых их геометрических приложениях. Мы, в частности, получим необходимые для рассуждения в §5.18 отношения ортогональности, определяющие геометрию магических додекаэдров. Мои описания существенно отличаются от тех, что первоначально сформулировал Майорана [252], приближаясь, скорее, к описаниям, данным в [299] и [396].

Идея заключается в том, что берется неупорядоченное множество из n точек на сфере Римана, каковые точки рассматриваются как корни комплексного полинома степени n , коэффициенты которого, в свою очередь, используются в качестве координат $(n + 1)$ -мерного гильбертова пространства спиновых состояний (массивной) частицы со спином $\frac{1}{2} n$. Как и в §5.10, основными состояниями будем считать различные возможные результаты измерения спина в вертикальном направлении; представим эти состояния в виде одночленов (добавив соответствующие нормирующие множители, чтобы сохранить единичную длину векторов состояний):

$$\begin{aligned}
 | \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \dots \uparrow \uparrow \rangle & \quad \text{—} \quad x^n \\
 | \downarrow \uparrow \uparrow \uparrow \dots \uparrow \uparrow \rangle & \quad \text{—} \quad n^{1/2} x^{n-1} \\
 | \downarrow \downarrow \uparrow \uparrow \dots \uparrow \uparrow \rangle & \quad \text{—} \quad \{n(n-1)/2!\}^{1/2} x^{n-2} \\
 | \downarrow \downarrow \downarrow \uparrow \dots \uparrow \uparrow \rangle & \quad \text{—} \quad \{n(n-1)(n-2)/3!\}^{1/2} x^{n-3} \\
 & \quad \dots \\
 | \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \dots \downarrow \uparrow \rangle & \quad \text{—} \quad n^{1/2} x \\
 | \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \dots \downarrow \downarrow \rangle & \quad \text{—} \quad 1.
 \end{aligned}$$

(Выражения в фигурных скобках – биномиальные коэффициенты.) Таким образом, общее состояние спина $\frac{1}{2} n$,

$$z_0 | \uparrow \uparrow \uparrow \dots \uparrow \rangle + z_1 | \downarrow \uparrow \uparrow \dots \uparrow \rangle + z_2 | \downarrow \downarrow \uparrow \dots \uparrow \rangle + z_3 | \downarrow \downarrow \downarrow \dots \uparrow \rangle + \dots + z_n | \downarrow \downarrow \downarrow \dots \downarrow \rangle,$$

представляется в виде полинома

$$p(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n,$$

где

$$a_0 = z_0, \quad a_1 = n^{1/2} z_1, \quad a_2 = \{n(n-1)/2!\}^{1/2} z_2, \quad \dots \quad a_n = z_n.$$

Корням $x = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ полинома $p(x) = 0$ соответствуют n точек на сфере Римана, определяющие описание Майораны. Допускается и майоранова точка, задаваемая корнем $x = \infty$, – южный полюс сферы, – это происходит, когда степень полинома $P(x)$ оказывается меньше n на величину, определяемую кратностью этой точки.

Вращение сферы осуществляется посредством следующего преобразования: сначала выполняем замену

$$x \mapsto (\lambda x - \mu)(\bar{\mu}x + \bar{\lambda})^{-1}$$

(где $\lambda\bar{\lambda} + \mu\bar{\mu} = 1$), а затем избавляемся от знаменателей, умножив всё выражение на $(\bar{\mu}x + \bar{\lambda})^n$. Таким образом, можно получить полиномы, соответствующие результатам измерений (скажем, с помощью установки Штерна–Герлаха) спина в произвольно выбранном направлении, что дает выражения вида

$$c(\lambda x - \mu)^p (\bar{\mu}x + \bar{\lambda})^{n-p}.$$

Точки, задаваемые отношениями μ/λ и $\bar{\mu}/\bar{\lambda}$, являются антиподальными на сфере Римана и соответствуют направлению измерения спина и направлению, противоположному ему. (Это

предполагает некий подходящий выбор фаз для состояний $|\uparrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, $|\downarrow\uparrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, $|\downarrow\downarrow\uparrow\dots\uparrow\rangle$, ..., $|\downarrow\downarrow\dots\downarrow\rangle$. Вышеупомянутые свойства и их детальное обоснование удобнее всего рассматривать в терминах 2-спинорного формализма. За подробностями отсылаю читателя к [301], с. 162 и §4.15.³⁴ Общее состояние спина $\frac{1}{2}n$ описывается там через симметрический n -валентный спинор, при этом майораново описание выводится из канонического разложения спинора на симметризованное произведение спиновых векторов.)

Для любой точки a на сфере Римана антиподальной является точка $-1/\underline{a}$. Таким образом, если отразить все майорановы точки, являющиеся корнями полинома

$$a(x) \equiv a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n,$$

относительно центра сферы, то мы получим корни полинома

$$a^*(x) \equiv \bar{a}_n - \bar{a}_{n-1}x + \bar{a}_{n-2}x^2 - \dots - (-1)^n \bar{a}_1x^{n-1} + (-1)^n \bar{a}_0x^n.$$

Пусть состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ заданы, соответственно, полиномами $a(x)$ и $b(x)$, где

$$b(x) \equiv b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_{n-1}x^{n-1} + b_nx^n,$$

тогда их скалярное произведение имеет вид

$$\langle\beta|\alpha\rangle = \bar{b}_0a_0 + \frac{1}{n}\bar{b}_1a_1 + \frac{2!}{n(n-1)}\bar{b}_2a_2 + \frac{3!}{n(n-1)(n-2)}\bar{b}_3a_3 + \dots + \bar{b}_na_n.$$

Это выражение инвариантно относительно вращений сферы, что можно непосредственно доказать, используя вышеприведенные формулы.

Применим полученное выражение для скалярного произведения к конкретному случаю $b(x) = a^*(x)$, т.е. к случаю двух состояний, майораново описание одного из которых состоит исключительно из точек, антиподальных точкам, составляющим майораново описание другого. Их скалярное произведение равно (с точностью до знака)

$$a_0a_n - \frac{1}{n}a_1a_{n-1} + \frac{2!}{n(n-1)}a_2a_{n-2} - \dots - (-1)^n \frac{1}{n}a_{n-1}a_1 + (-1)^na_na_0.$$

Нетрудно заметить, что при отрицательном n все члены выражения взаимно уничтожаются, а значит, можно сформулировать следующую теорему (напомним, что состояние, майораново описание которого имеет вид, скажем, P, Q, ..., S, обозначается через |PQ...S>; точка, антиподальная X, обозначается X*):

C.1 Если n нечетно, то состояние |PQR...T> ортогонально состоянию |P*Q*R*... T*>.

Из общего выражения для скалярного произведения можно вывести еще два свойства:

C.2 Состояние |PPP...P> ортогонально любому из состояний |P*AB...D>.

C.3 Состояние |QPP...P> ортогонально состоянию |ABC...E> в тех случаях, когда стереографическая проекция (из P*) точки Q* совпадает с центром тяжести множества стереографических проекций (из P*) точек A, B, C, ..., E.

(Центром тяжести множества точек называют центр тяжести совокупности равных точечных масс, размещенных в этих точках. О стереографических проекциях мы говорили в §5.10, рис. 5.19.) Для доказательства C.3 развернем сферу так, чтобы точка P* стала ее южным полюсом. Тогда состоянию |QPP...P> соответствует полином $x^{n-1}(x - \chi)$, где χ определяет точку Q на сфере Римана. Вычислив скалярное произведение этого состояния с состоянием, представленным полиномом $(x - \alpha_1)(x - \alpha_2)(x - \alpha_3)\dots(x - \alpha_n)$, майораново описание которого составляют корни $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$, находим, что это произведение обращается в нуль, когда

$$1 + n^{-1}\bar{\chi}(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n) = 0,$$

т.е. когда $-1/\underline{\chi}$ равно $(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n) / n$, иначе говоря, когда точка $-1/\underline{\chi}$ является центром тяжести (на комплексной плоскости) множества точек $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$. Что и доказывает свойство C.3. Для того, чтобы доказать C.2, поместим в южный полюс точку P. Тогда состоянию |PPP...P> соответствует постоянная величина, 1. Если рассматривать ее как полином степени n , то соответствующее скалярное произведение обращается в нуль, когда

$$\alpha_1\alpha_2\alpha_3 \dots \alpha_n = 0,$$

т.е. когда хотя бы одна точка из множества $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ равна 0 или, что то же самое, совпадает с северным полюсом сферы – в данном случае, с точкой P*. Что, собственно, и требовалось доказать.

³⁴ В.Э.: Видимо, это параграф ТОЙ книги Пенроуза и Риндлера.

Свойство С.2 позволяет интерпретировать майорановы точки в физическом смысле. Исходя из него, можно предположить, что эти точки определяют направления, измерение (типа измерения Штерна–Герлаха) спина в которых дает нулевую вероятность того, что полученное в результате измерения направление оси спина окажется диаметрально противоположным тому направлению, в котором это измерение выполнялось (см. НРК, с. 273). Кроме того, из С.2 можно вывести свойство для частного случая: если спин равен $\frac{1}{2}$ ($n = 1$), то ортогональными являются исключительно те состояния, майорановы точки которых антиподальны. Свойство С.3 позволяет получить общую геометрическую интерпретацию ортогональности в случае спина $3/2$ ($n = 2$). Примечателен частный случай, когда имеются два состояния, представленные в виде двух пар антиподальных точек, причем прямые, соединяющие эти точки, пересекаются в центре сферы под прямым углом. В случае спина $3/2$ ($n = 3$) свойства С.3 (с некоторой оглядкой на С.1) вполне достаточно для подкрепления объяснений, предложенных в §5.18. Геометрическую интерпретацию ортогональности в общем случае я здесь давать не буду; может быть, как-нибудь в другой раз.)

Упомянутое в §5.18 частное следствие из С.3 относится к частному случаю, когда P и Q являются соседними вершинами куба, вписанного в сферу Римана, т.е. PQ и Q*P* – противоположные ребра этого куба. Длина отрезка PQ* (или QP*) равна длине PQ (или P*Q*), умноженной на $\sqrt{2}$. Посредством несложных геометрических рассуждений можно показать, что состояния |P*PP⟩ и |Q*QQ⟩ ортогональны.

Глава 6. Квантовая теория и реальность

§6.1. Является ли R реальным процессом?

В предыдущей главе мы сделали попытку понять и принять головоломные Z-загадки квантовой теории. Не все эти феномены получили на настоящий момент экспериментальное подтверждение – например, квантовая сцепленность на расстоянии нескольких световых лет,³⁵ – и тем не менее, уже накопленных экспериментальных данных, свидетельствующих о существовании такого рода эффектов, вполне достаточно, чтобы убедиться в том, что Z-загадки и в самом деле следует принимать всерьез, поскольку они отражают истинные аспекты поведения самых разных объектов, составляющих тот мир, в котором мы живем.

Процессы, протекающие в нашем физическом мире на квантовом уровне, действительно не поддаются интуитивному осмыслению и во многом совершенно отличны от «классического» поведения, которое мы наблюдаем на более привычном уровне восприятия. Эффекты квантовой сцепленности на расстоянии нескольких метров являются неотъемлемой частью квантового поведения окружающих нас объектов – по крайней мере, это справедливо для объектов квантового уровня (таких, как электроны, фотоны, атомы и молекулы). Контраст между этим странным квантовым поведением «микроскопических» объектов (пусть и разделенных вполне макроскопическим расстоянием) и более привычным классическим поведением объектов «больших» лежит в основе проблемы X-загадок квантовой теории. Может ли, в самом деле, один физический закон выступать в двух различных ипостасях – каждая для «своего» уровня феноменов?

Такое предположение несколько расходится с тем, что мы обычно ожидаем от физического закона. Одним из величайших достижений физики семнадцатого века стала динамика Галилея–Ньютона, согласно которой движение небесных тел подчиняется в точности тем же законам, что управляют движением объектов у нас дома, на Земле. Со времен древних греков (или еще более ранних) ученые полагали, что в небе должны действовать одни законы, а на Земле – другие. Галилей же с Ньютоном смогли показать, что законы одни и те же, различия исключительно в масштабе – фундаментальное прозрение, роль которого в развитии науки переоценить

³⁵ Упомянутое в §5.16 «бозонное» свойство фотонов можно (в некотором смысле) рассматривать как пример проявления квантовой сцепленности, в каковом случае у нас имеется экспериментальное подтверждение и для взаимодействия на сверхбольших расстояниях – результаты наблюдений, полученные Хэнбери Брауном и Твиссом [187, 188] (см. примечание на с. 449) (у меня отмечено как *449 – В.Э.).

невозможно. Тем не менее (как указывает профессор Иэн Персивал из Лондонского университета), в отношении квантовой теории мы, похоже, решили перенять образ мышления древних греков – один набор законов у нас работает на классическом уровне, а другим, совершенно на первый непохожим, мы пользуемся для описания процессов на квантовом уровне. Я придерживаюсь мнения – и это мнение разделяет, если можно так выразиться, весьма представительное меньшинство физиков, – что такое состояние научной мысли является не чем иным, как временным ступором, и можно предположить, что отыскание соответствующих квантово-классических законов, действующих единообразно на всех уровнях феноменов, возвестит научный прорыв, сравнимый по масштабу с тем, у истоков которого стояли Галилей и Ньютон.

Читатель, впрочем, может вполне резонно поинтересоваться, действительно ли та картина, которую дает стандартная квантовая теория для феноменов квантового уровня, не годится для объяснения и классических феноменов. Я убежден, что нет; однако многие склонны это мое убеждение оспаривать, утверждая, что поведение больших или сложных (в некотором смысле) физических систем, каждый из компонентов которых действует в полном согласии с законами квантового уровня, в сущности совпадает с поведением классических объектов (если и не абсолютно, то с очень высокой степенью точности). Попробуем для начала выяснить, можно ли считать это утверждение – суть которого заключается в том, что наблюдаемое «классическое» поведение макроскопических объектов есть следствие совокупного квантового поведения их микроскопических составляющих, – хоть сколько-нибудь правдоподобным. Если обнаружится, что нельзя, то нам придется поискать другой путь, который, быть может, приведет нас к более последовательному выводу, имеющему смысл на всех уровнях феноменов. Мне, впрочем, следует предупредить читателя о том, что вся эта тема буквально кишит противоречиями. Существует множество самых разнообразных точек зрения, и пытаться дать всесторонний обзор их всех было бы с моей стороны крайне неблагоразумно, не говоря уже о том, чтобы представить детальное опровержение тех из них, что я нахожу невероятными или несостоятельными. Я прошу читателя отнестись снисходительно к тому, что точки зрения, о которых я так упомяну, будут во многом изложены так, как они выглядят с моей собственной колокольни. Очевидно, что я не смогу сохранить полную беспристрастность, говоря о людях, мнение которых настолько чуждо моему, поэтому я хочу заранее попросить прощения за все те, возможно несправедливые, слова, которые я скажу.

Первая фундаментальная трудность связана с отысканием четкой границы, где квантовые процессы, характеризующиеся сохранением суперпозиций различных альтернативных возможностей, действительно переходят – под действием редукции R – в процессы классического уровня, на котором суперпозиции, по-видимому, невозможны. Трудность эта является результатом свойственной процедуре R «скользкости» (с точки зрения наблюдателя), которая не дает нам обнаружить, когда именно она «происходит» – из-за этого, в частности, многие физики вообще не считают редукцию реальным феноменом. Судя по имеющимся данным, результат эксперимента никак не зависит от того, на каком уровне выполняется процедура R – необходимо лишь, чтобы этот уровень был выше, чем тот, на котором наблюдались эффекты квантовой интерференции, но ниже, чем тот, на котором мы можем непосредственно воспринимать вместо комплексных линейных суперпозиций реализовавшиеся благодаря редукции классические альтернативы (хотя, как мы вскоре увидим, некоторые физики полагают, что и на этом этапе суперпозиции сохраняются).

Как можно установить, на каком уровне действительно происходит редукция – если она, конечно, вообще происходит в физическом смысле? Какой физический эксперимент необходимо поставить для того, чтобы отыскать ответ на этот вопрос? Если R – физический процесс, то он может происходить на любом уровне из огромного множества возможных между микроскопическими уровнями наблюдаемой квантовой интерференции и макроскопическими уровнями классического непосредственного восприятия. Более того, эти различия в «уровнях», похоже, не связаны напрямую с физическими размерами – квантовая сцепленность, например (см. §5.4), с легкостью «растягивается» до нескольких метров. Мы вскоре покажем, что более подходящей, нежели физические размеры, мерой является в данном случае, разность энергий. Как бы то ни было, на нашей, «макроскопической», стороне процесса то место, где «остановится шарик», определяется исключительно нашим же сознательным восприятием. С точки зрения физической теории это весьма неудобно, так как нам доподлинно не известно, какие именно физические процессы в мозге отвечают за восприятие. Тем не менее, сама физическая природа этих процессов, похоже, дает для любой теории реальной редукции R макроскопический предел.

Впрочем, и здесь диапазон возможных вариантов между двумя крайностями чрезвычайно велик, что способствует формированию самых разнообразных позиций в отношении того, что же на самом деле происходит в тот момент, когда на сцену выходит процедура R.

Одним из важнейших является вопрос о «реальности» квантового формализма – или даже квантового мира вообще. Не могу удержаться и не процитировать в этой связи одно замечание профессора Чикагского университета Боба Уолда. Несколько лет назад на одном из банкетов он сказал мне:

«Если вы и вправду верите в квантовую механику, значит, всерьез вы ее не принимаете».

Мне кажется, что в этом замечании содержится некая глубокая истина как о самой квантовой теории, так и об отношении к ней людей. Те из адептов теории, кто особенно яростно отрицает необходимость какой бы то ни было ее модификации, не склонны полагать, что она описывает действительное поведение «реального» квантового мира. Нильс Бор, один из создателей и выдающийся интерпретатор квантовой теории, придерживался в этом отношении наиболее непримиримой позиции. Вектор состояния он, судя по всему, считал не более чем удобной условностью, полезной лишь для вычисления вероятностей результатов допускаемых системой «измерений». Сам по себе вектор состояния и не должен давать объективного описания той или иной квантовой реальности, он призван лишь олицетворять «наше знание» о системе. В самом деле, разве можно всерьез полагать, будто понятие «реальность» осмысленно применимо к происходящим на квантовом уровне процессам? Бор, несомненно, принадлежал к тем, кто «и вправду верит в квантовую механику», и, на его взгляд, вектор состояния как раз и не следовало «принимать всерьез» в качестве средства описания физической реальности на квантовом уровне.

Общая альтернатива этой квантовомеханической точке зрения заключается в предположении, что вектор состояния дает-таки строгое математическое описание реального квантового мира – мира, эволюционирующего по чрезвычайно точным законам, хотя, возможно, и не в полном соответствии с математическими правилами, задаваемыми уравнениями квантовой теории. Отсюда, как мне представляется, открываются два основных пути. Одни ученые полагают, что процедура U исчерпывающе описывает всё, что связано с эволюцией квантового состояния. Процедура же R, соответственно, рассматривается как своего рода иллюзия, условность или аппроксимация, но ни в коем случае не как часть действительной эволюции реальности, описываемой квантовым состоянием. Такое мнение, на мой взгляд, ведет в направлении так называемой концепции множественности миров, или интерпретации Эверетта.³⁶ Об этой концепции мы поподробнее поговорим буквально через минуту. Другие – как раз те, кто принимает квантовый формализм в наибольшей степени «всерьез», – уверены, что обе процедуры, как U, так и R, представляют (с достаточно большой степенью точности) действительное физическое поведение физически реального, описываемого вектором состояния, квантового/классического мира. Однако если принимать квантовый формализм настолько всерьез, становится очень нелегко искренне верить в то, что существующая квантовая теория целиком и полностью верна на всех уровнях. Взять хотя бы то, что процедура R, в ее теперешнем определении, противоречит многим свойствам процедуры U, в частности, линейности последней. В этом смысле, разумеется, продолжать и далее «вправду верить в квантовую механику» невозможно. В последующих параграфах мы обсудим упомянутые точки зрения более основательно.

§6.2. О множественности миров

Попробуем для начала выяснить, насколько далеко мы сможем уйти, следуя первым из «реалистических» путей – тому, что ведет в конечном счете к представлению о существовании «множественных» миров. За истинное описание реальности здесь принимается вектор состояния, эволюционирующий исключительно под действием процедуры U. Отсюда неизбежно следует, что законам квантовой линейной суперпозиции должны подчиняться и объекты классического уровня (такие, как бильярдные шары или даже люди). Можно предположить, что никаких серьезных проблем в связи с этим возникнуть не должно, поскольку такие суперпозиции состояний на классическом уровне – явление чрезвычайно редкое, и это еще слабо сказано.

³⁶ См. [116], [382], [90] и [143].

Проблема, однако, есть и связана она с линейностью эволюции U . Под действием U весовые коэффициенты состояний в суперпозиции всегда остаются одинаковыми, вне зависимости от того, какое количество вещества участвует в процессе. Сама по себе процедура U не способна, если можно так выразиться, «разделить» суперпозицию состояний только потому, что система выросла в размерах или усложнилась. Суперпозиции при этом отнюдь не проявляют тенденции к «исчезновению» при переходе на классический уровень, в результате чего выраженные суперпозиции состояний классических объектов должны стать не менее распространенным феноменом, нежели суперпозиции квантовых состояний. Отсюда неизбежно следует вопрос: почему в таком случае мы, воспринимая мир классических объектов, не сталкиваемся с такими макроскопическими суперпозициями альтернативных состояний ежедневно?

У приверженцев концепции множественности миров имеется на этот счет объяснение. Попробуем в нем разобраться. Представим себе ситуацию, подобную той, что мы рассматривали в §5.17, – детектор фотонов, описываемый состоянием $|\Psi\rangle$, оказывается на пути фотона, находящегося в суперпозиции состояний $|\alpha\rangle + |\beta\rangle$, причем $|\alpha\rangle$ активирует детектор, $|\beta\rangle$ же оставляет всё как есть. (Возможно, фотон, испущенный некоторым источником, успел по пути встретиться с полупрозрачным зеркалом, и состояния $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ описывают, соответственно, пропущенную и отраженную части общего состояния фотона.) Мы здесь не говорим о применимости концепции вектора состояния к объектам классического уровня (весь детектор целиком), так как в рамках данной точки зрения векторы состояния являются точными представлениями реальности на всех ее уровнях. Таким образом, состояние $|\Psi\rangle$ может описывать весь детектор целиком, а не только лишь некоторые квантовые его элементы, первыми встречающие фотон, как было в §5.17. Отметим, что, как и в §5.17, после собственно момента столкновения состояния детектора и фотона эволюционируют из произведения $|\Psi\rangle(|\alpha\rangle + |\beta\rangle)$ в сцепленное состояние

$$|\Psi_D\rangle + |\Psi_N\rangle|\beta'\rangle.$$

Реальность описывается теперь вот этим вот сцепленным состоянием, рассматриваемым как единое целое. Мы не говорим: «либо детектор зарегистрировал и поглотил фотон (состояние $|\Psi_D\rangle$), либо детектор фотона не зарегистрировал, и фотон остался свободным (состояние $|\Psi_N\rangle|\beta'\rangle$)». Вместо этого мы говорим: «обе альтернативы сосуществуют в суперпозиции, как часть всеобщей реальности, в которой все такие суперпозиции сохраняются». Можно распространить ситуацию и вообразить себе экспериментатора-человека, который разглядывает детектор с целью выяснить, зарегистрировал ли тот прибытие фотона. Прежде чем обратить свой взор к детектору, человек также должен был пребывать в некотором квантовом состоянии, скажем, $|\Sigma\rangle$; таким образом, мы получаем на данном этапе следующее совокупное «произведение» состояний:

$$|\Sigma\rangle(|\Psi_D\rangle + |\Psi_N\rangle|\beta'\rangle).$$

Далее, изучив состояние детектора, наблюдатель каким-то образом воспринимает, что либо детектор зарегистрировал и поглотил фотон (состояние $|\Sigma_D\rangle$), либо детектор фотона не зарегистрировал (ортогональное состояние $|\Sigma_N\rangle$). Если допустить, что наблюдатель не взаимодействует с детектором после наблюдения, то ситуация описывается следующим вектором состояния:

$$|\Sigma_D\rangle(|\Psi'_D\rangle + |\Sigma_N\rangle|\Psi'_N\rangle|\beta''\rangle).$$

То есть, теперь у нас имеется два различных (ортогональных) состояния наблюдателя, каждое из которых вносит свой вклад в общее состояние системы. Согласно первому, наблюдатель находится в состоянии восприятия регистрации детектором прибытия фотона; это состояние сопровождается состоянием детектора, при котором фотон действительно регистрируется. Согласно же второму, наблюдатель находится в состоянии восприятия отсутствия регистрации детектором прибытия фотона; это состояние сопровождается состоянием детектора, при котором фотон не регистрируется, и состоянием фотона, свободно улетающего прочь. При этом, в соответствии с концепцией множественности миров, в рамках одного общего состояния сосуществуют различные экземпляры (варианты, копии) «Я» наблюдателя, располагающие различным опытом восприятия окружающего мира. Действительное состояние мира, окружающего каждый экземпляр, будет соответствовать опыту восприятия, которым этот экземпляр располагает.

Это представление можно обобщить на более «реалистичные» физические ситуации, где одновременно сосуществуют уже не два возможных варианта развития событий, как в приведенном примере, а огромные количества различных квантовых альтернатив, непрерывно возникающих на протяжении всей истории Вселенной. Таким образом, общее состояние Вселенной действительно объединяет в себе множество различных «миров», а любой наблюдатель-человек

существует во множестве различных экземпляров сразу. Каждый экземпляр воспринимает тот мир, который не противоречит его собственному опыту восприятия, при этом нас с вами хотят убедить в том, что для построения удовлетворительной теории ничего больше и не нужно. Процедура R , согласно такой точке зрения, оказывается иллюзией, возникающей как следствие некоторых особенностей восприятия квантовосцепленного мира макроскопическим наблюдателем.

Что касается меня, то должен сказать, что я вообще не нахожу эту точку зрения сколько-нибудь удовлетворительной. И дело здесь не столько в исключительной расточительности такой картины мира – хотя это и само по себе уже достаточно подозрительно, если не сказать больше. Более серьезное возражение состоит в том, что концепция множественности миров не дает настоящего решения «проблемы измерения», т.е. не достигает цели, ради которой была создана.

Решить проблему квантового измерения – значит понять, каким образом макроскопическое поведение в U -эволюционирующих квантовых системах порождает (или эффективно порождает) в качестве своего свойства процедуру R . Эта проблема не решается простым указанием на возможный сценарий, предположительно допускающий R -подобное поведение. Необходима теория, позволяющая хоть как-то понять, какие именно обстоятельства вызывают к жизни процедуру R (или, на худой конец, ее иллюзию). Более того, необходимо найти объяснение той замечательной точности, с которой работает процедура R . Судя по всему, люди склонны полагать, что вся точность квантовой теории заключена в ее динамических уравнениях – в эволюции U . Однако и редукция R сама по себе ничуть не менее точна в предсказании вероятностей, и до тех пор, пока мы не поймем, каким образом ей это удается, удовлетворительной теории у нас не будет.

Поскольку ничего большего концепция множественности миров не предлагает, действительного и исчерпывающего объяснения ни одному из этих феноменов мы не получаем. В отсутствие теории, описывающей, каким образом «воспринимающее сознание» разделяет мир на ортогональные альтернативы, у нас нет никаких причин ожидать, что такое сознание не будет способно осознавать линейные суперпозиции совершенно различных состояний теннисных мячей или, скажем, слонов. (Следует отметить, что одна лишь ортогональность «воспринимаемых состояний» – например, состояний $|\Psi_D\rangle$ и $|\Psi_N\rangle$ в приведенном выше примере – никоим образом не помогает эти состояния разделить. Сравните, например, пару состояний $|L\leftarrow\rangle$ и $|L\rightarrow\rangle$ с парой $|L\uparrow\rangle$ и $|L\downarrow\rangle$, которыми мы пользовались при обсуждении ЭПР-феноменов в §5.17. Обе пары состояний ортогональны, точно так же как ортогональны состояния $|\Psi_D\rangle$ и $|\Psi_N\rangle$, однако выбрать одну пару в ущерб другой мы не можем.) И еще одно: концепция множественности миров никак не объясняет чрезвычайную точность того удивительного правила, которое чудесным образом превращает квадраты модулей комплексных весовых коэффициентов в относительные вероятности.³⁷ (См. также §6.6 и §6.7.)

§6.3. Не принимая вектор $|\psi\rangle$ всерьез

Существует много различных вариантов точки зрения, согласно которой вектор состояния $|\psi\rangle$ не следует рассматривать как действительное отображение той или иной физической реальности, существующей на квантовом уровне. Вектор $|\psi\rangle$ вводится лишь в качестве вычислительного приема, удобного исключительно для вычисления вероятностей, либо служит для выражения «состояния знания» экспериментатора о физической системе. Иногда под $|\psi\rangle$ понимается не состояние индивидуальной физической системы, но целый ансамбль возможных подобных физических систем. Часто утверждают, что поведение вектора сложносцепленного состояния $|\psi\rangle$ ничем, с практической точки зрения (*for all practical purposes*³⁸ или просто FAPP с легкой руки Джона Белла³⁹), не отличается от поведения такого ансамбля физических систем – а большего о проблеме измерения физикам знать и не нужно. Иногда можно услышать, что вектор $|\psi\rangle$ не может описывать какую бы то ни было квантовую реальность, так как понятие «реальность» к феноменам квантового уровня неприменимо – оно теряет здесь всякий смысл, поскольку реальным является лишь то, что можно «измерить».

³⁷ См. [355] и [357].

³⁸ С практической точки зрения (англ.). – Прим. перев.

³⁹ См. [23].

Многие (в том числе и я – а также Эйнштейн и Шрёдингер, так что компания подобралась очень даже неплохая), впрочем, убеждены, что ничуть не больше смысла в ограничении «реальности» лишь объектами, которые мы способны воспринять – например, при помощи измерительных устройств (некоторых из них, по крайней мере), – и лишении «права на реальность» объектов, существующих на более глубоком, более фундаментальном уровне. Я не сомневаюсь, что мир на квантовом уровне выглядит странно и непривычно, но он отнюдь не становится от этого «нереальным». В самом деле, разве могут реальные объекты состоять из нереальных компонентов? Более того, управляющие квантовым миром математические закономерности замечательно точны – ничуть не менее точны, нежели более привычные уравнения, описывающие поведение макроскопических объектов, – несмотря на все те туманные образы, с которыми в нашем сознании ассоциируются «квантовые флуктуации» и «принцип неопределенности».

Однако убежденность в том, что хоть какая-то реальность должна существовать и на квантовом уровне, не избавляет нас от сомнений в возможности точно описать эту самую реальность посредством вектора состояния $|\psi\rangle$. В доказательство «нереальности» $|\psi\rangle$ выдвигаются самые различные аргументы. Во-первых, вектор $|\psi\rangle$, по всей видимости, вынужден время от времени претерпевать этот загадочный нелокальный разрывный «скачок», который я обозначаю здесь буквой R. Несколько неподобающее поведение для физически приемлемого описания мира, особенно если учесть, что у нас уже имеется изумительно точное и непрерывное уравнение Шрёдингера U, согласно которому, как предполагается, и эволюционирует вектор $|\psi\rangle$ (большую часть времени). Однако, как мы успели убедиться, эволюция U сама по себе заводит нас в дебри сложностей и неясностей множественно-мировых интерпретаций; если же мы хотим получить картину, сколько-нибудь адекватно описывающую реальную Вселенную, которая, как нам представляется, нас окружает, то нам просто необходима какая-никакая процедура R.

Другое нередко выдвигаемое возражение против реальности вектора $|\psi\rangle$ сводится к следующему: чередование U, R, U, R, U, R, ..., представляющее собой, в сущности, типичное описание процесса в квантовой теории, не симметрично во времени (каждое U-действие начинается с процедуры R, но не завершается ею), и существует другое, полностью эквивалентное первому описание, в котором U-эволюции обращены во времени (см. НРК, с. 355, 356; рис. 8.1, 8.2). Почему первое описание соответствует «реальности», а второе нет? Есть мнение, что всерьез следует принимать оба описания (как прямую, так и обратную эволюцию вектора состояния) – они сосуществуют и дают в совокупности полное описание физической реальности (см. [61], [381] и [2]). Я склонен думать, что предположения эти, скорее всего, не лишены серьезных оснований, однако в настоящий момент мы на них останавливаться не будем. Мы вкратце коснемся их (и некоторых других родственных им) ниже, в §7.12.

Одно из наиболее частых возражений против принятия вектора $|\psi\rangle$ всерьез в качестве описания реальных процессов состоит в том, что его нельзя непосредственно «измерить» – в том смысле, что не существует экспериментального способа определить вектор состояния (пусть и с точностью до коэффициента пропорциональности), если мы об этом состоянии ничего не знаем. Возьмем для примера атом со спином $\frac{1}{2}$. Вспомним (§5.10, рис. 5.19), что каждое возможное состояние спина такого атома характеризуется каким-то конкретным направлением в обычном пространстве. Однако если мы не имеем ни малейшего понятия, что это за направление, определить его мы никак не сможем. Мы можем лишь выбрать какое-либо одно направление и выяснить, в этом направлении ориентирована ось спина (ДА) или же в противоположном (НЕТ). Каким бы ни было начальное состояние спина, соответствующее направление в гильбертовом пространстве проецируется либо в ДА-пространство, либо в НЕТ-пространство; каждый исход реализуется с вполне определенной вероятностью. И тут мы теряем большую часть информации о том, каким было «действительное» начальное состояние спина. Всё, что мы можем получить из измерения направления спина (в случае атома со спином $\frac{1}{2}$), укладывается в один бит информации (ответ на общий вопрос ДА или НЕТ), тогда как возможные состояния направления оси спина образуют континуум, для точного определения которого потребуется бесконечное количество битов информации.

Всё это так, и всё же противоположную позицию принять ничуть не легче – ту, согласно которой вектор состояния $|\psi\rangle$ оказывается в некотором роде физически «нереальным», являя собой лишь оболочку, содержащую полную сумму «наших знаний» о физической системе. Я бы даже сказал, что принять эту позицию невероятно трудно, особенно если учесть, что подобная роль «знания» подразумевает немалую долю субъективности. О чем, в конце концов, знании

идет здесь речь? Совершенно точно – не о моем. Я очень мало действительно знаю об отдельных векторах состояния, детально описывающих поведение всех до единого окружающих меня объектов. А они, как ни в чем не бывало, продолжают себе свою идеально организованную деятельность, нимало не заботясь ни о том, что именно может стать кому-то «известно» о том или ином векторе состояния, ни о том, кто же станет счастливым обладателем этого драгоценного знания. Разве разные экспериментаторы, располагающие разным знанием о какой-либо физической системе, описывают эту самую систему с помощью различных векторов состояния? Отнюдь; все возникающие здесь различия относятся к тем особенностям каждого конкретного эксперимента, которые не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на конечный результат.

Один из наиболее сильных доводов⁴⁰ в опровержение этой субъективной точки зрения на реальность $|\psi\rangle$ следует из того факта, что, каким бы ни был вектор состояния $|\psi\rangle$, всегда возможно (по крайней мере, в принципе) осуществить примитивное измерение (см. §5.13), ДА-пространство которого представляет собой луч в гильбертовом пространстве, определяемый вектором $|\psi\rangle$. Дело в том, что физическое состояние $|\psi\rangle$ (определяемое лучом комплексных кратных $|\psi\rangle$) определено однозначно, в силу того, что результат ДА для данного состояния является абсолютно достоверным. Никакое другое состояние таким свойством не обладает. Для любого другого состояния речь может идти лишь о некоторой вероятности (всегда меньшей, нежели полная уверенность) получения результата ДА, не исключающей и возможности того, что будет получен результат НЕТ. Таким образом, хотя мы и не можем посредством какого бы то ни было измерения выяснить, что же такое в действительности представляет собой вектор $|\psi\rangle$, физическое состояние $|\psi\rangle$ однозначно определяется тем, что должно (согласно соответствующему вектору) являться результатом измерения, которое могло бы быть осуществлено над этим состоянием. Здесь мы вновь встречаемся с контрфактуальностью (см. §5.2, §5.3); впрочем, мы уже видели, насколько важную роль в предсказаниях квантовой теории играют контрфактуальные соображения.

Дабы прибавить нашему рассуждению убедительности, вообразим, что квантовая система установлена в некое известное состояние, скажем, $|\phi\rangle$, и что, согласно вычислениям, это состояние по прошествии времени t эволюционирует под действием процедуры U в другое состояние, скажем, $|\psi\rangle$. Пусть состояние $|\phi\rangle$ представляет, например, состояние «спин вверх» ($|\phi\rangle = |\uparrow\rangle$) атома со спином $\frac{1}{2}$, и предположим, что система оказалась в этом состоянии под действием какого-то предыдущего измерения. Допустим, что наш атом обладает магнитным моментом, направление которого совпадает с направлением оси спина (т.е. представляет собой маленький магнит, ориентированный в направлении оси спина). Направление же оси спина атома, помещенного в магнитное поле, вполне определенным образом прецессирует, что можно точно вычислить и представить как действие процедуры U , переводящее спин за время t в новое состояние, скажем, $|\psi\rangle = |\rightarrow\rangle$. Следует ли это вычисленное состояние принимать всерьез как часть физической реальности? Не вижу причин в этом ему отказывать. Поскольку состояние $|\psi\rangle$ никак не может не учитывать возможность того, что нам вдруг взбрдет в голову измерить его посредством вышеупомянутого примитивного измерения, того самого измерения, ДА-пространство которого состоит исключительно из кратных вектора $|\psi\rangle$. В данном случае таким измерением является измерение спина в направлении \rightarrow . На это измерение система должна давать уверенный ответ ДА, а этого не может гарантировать никакое состояние спина атома, кроме $|\psi\rangle = |\rightarrow\rangle$.

Можно отыскать множество самых разнообразных физических ситуаций, в которых подобное примитивное измерение окажется практически неосуществимым. И всё же стандартные правила квантовой теории предполагают, что в принципе такие измерения возможны. Если же мы полагаем, что в случае некоторых «достаточно сложных» разновидностей состояний $|\psi\rangle$ примитивные измерения невозможны в принципе, то нам придется пересмотреть самые основы квантовой теории. Может быть, их и впрямь стоит пересмотреть (некоторые конкретные шаги в этом направлении я предложу в §6.12). Следует, впрочем, понимать, какого рода пересмотр потребует, если мы и впредь намерены отрицать объективные различия между разными квантовыми состояниями или, что одно и то же, объективную реальность вектора состояния $|\psi\rangle$ в

⁴⁰ В [3] приводится другой весьма серьезный довод в пользу объективной реальности волновой функции.

некотором строгом физическом смысле (пусть и с точностью до коэффициента пропорциональности).

В качестве «минимального» пересмотра, затрагивающего лишь теорию измерения, часто предлагают ввести так называемые правила суперселекции,⁴¹ которые и в самом деле эффективно отрицают возможность выполнения определенных типов примитивных измерений системы. Мне не хочется рассматривать здесь эти правила в подробностях, так как ни одно подобное предложение, насколько мне известно, не дошло в своем развитии до той стадии, на которой можно было бы говорить о формировании сколько-нибудь связной общей позиции в отношении проблемы измерения. Подчеркну лишь, что даже минимальный пересмотр подобного рода всё равно остается пересмотром и лишь подтверждает наличие насущной необходимости в пересмотре теории в целом.

В заключение, думаю, следует упомянуть о том, что существует и множество иных подходов к квантовой механике, которые хоть и не противоречат предсказаниям традиционной теории в принципе, но всё же дают «картины реальности», так или иначе отличные от той реальности, где вектор состояния $|\psi\rangle$ «принимают всерьез», полагая, что он эту реальность и представляет. Среди них – пилотно-волновая теория Луи де Бройля [77] и Дэвида Бома [33], нелокальная теория, согласно которой существуют объекты, эквивалентные одновременно волновым функциям и системам классических частиц, причем и те, и другие полагаются в данной теории «реальными». (См. также [34].) Другие точки зрения (вдохновленные Ричардом Фейнманом и его подходом к квантовой теории [118]) оперируют целыми «историями» возможного поведения – согласно этим точкам зрения, истинная картина «физической реальности» несколько отличается от той, которую дает обыкновенный вектор состояния $|\psi\rangle$. Аналогичной общей позиции, которая, впрочем, учитывает еще и возможность, по сути, многократных частичных измерений (в соответствии с анализом, предпринятым в [4]), придерживаются авторы работ [174], [279] и [141]. Было бы неуместно, как мне кажется, углубляться здесь в обсуждение этих разнообразных альтернативных точек зрения (хотя следует всё же упомянуть о том, что формализм матриц плотности, который вводится в следующем параграфе, играет в некоторых из этих теоретических построений не последнюю роль – как и в операторном подходе Хаага [179]). Скажу лишь, что, хотя многое в этих процедурах представляет значительный интерес и обладает некоторой вдохновляющей оригинальностью, я всё же совершенно не убежден, что с их помощью можно действительно решить проблему измерения. Разумеется, я могу и ошибаться, но это покажет лишь время.

§6.4. Матрица плотности

Многие физики, полагая себя людьми практичными, вопросами «реальности» вектора $|\psi\rangle$ не интересуются. От $|\psi\rangle$ им нужно лишь одно – возможность вычислять с его помощью вероятности того или иного дальнейшего физического поведения объекта. Часто бывает так, что состояние, выбранное изначально для представления физической ситуации, приобретает под действием эволюции чрезвычайную сложность, а его сцепленности с элементами окружения становятся настолько запутанными, что на практике совершенно невозможно проследить за эффектами квантовой интерференции, отличающими такое состояние от множества других ему подобных. Все уверения в том, что явившийся результатом данной конкретной эволюции вектор состояния сколько-нибудь более реален, нежели прочие, на практике от него неотличимые, наши «практичные» физики, без сомнения, сочтут абсолютно лишены смысла. В самом деле, скажут они, любой отдельный вектор состояния, пригодный для описания «реальности», всегда можно заменить подходящей вероятностной комбинацией векторов состояния. Если применение процедуры U к некоему вектору состояния, представляющему начальное состояние системы, дает результат, с практической точки зрения (FAPP-подход Белла) неотличимый от того, что был бы получен с помощью такой вот вероятностной комбинации векторов состояния, то вероятностная комбинация достаточно хороша для описания мира и отыскивать U -эволюционировавший вектор состояния нужды нет.

Часто утверждают, что с такими же мерками можно подходить и к процедуре R – по крайней мере, на практике (всё тот же FAPP). Двумя параграфами ниже мы попытаемся найти ответ на вопрос, можно ли в самом деле разрешить кажущийся U/R -парадокс одними лишь этими

⁴¹ См., например, [82].

методами. Однако, прежде я хотел бы рассказать подробнее о процедурах, принятых в стандартных FAPP-подходах к объяснению R-процесса (реального или кажущегося).

Ключевым в этих процедурах является математический объект, называемый матрицей плотности. Понятие матрицы плотности играет в квантовой теории весьма важную роль, и именно она, а не вектор состояния, лежит в основе большинства стандартных математических описаний процесса измерения. Центральную роль отводит матрице плотности и мой, менее традиционный, подход, особенно в том, что касается ее связи со стандартными FAPP-процедурами. По этой причине нам, к сожалению, придется углубиться в математический формализм квантовой теории несколько далее, нежели было необходимо прежде. Надеюсь, что читателя-неспециалиста такая перспектива не отпугнет. Даже при отсутствии полного понимания, мне думается, любому читателю будет полезно хотя бы бегло просматривать математические рассуждения по мере их появления – несомненно, со временем придет и осмысление. Это стало бы существенным подспорьем для понимания некоторых из дальнейших аргументов и тонкостей, сопровождающих поиски ответа на вопрос, почему нам действительно и насущно необходима усовершенствованная теория квантовой механики.

В отличие от отдельного единичного вектора состояния, матрицу плотности можно рассматривать как представление комбинации вероятностей нескольких возможных альтернативных векторов состояния. Говоря о «комбинации вероятностей», мы подразумеваем лишь, что существует некоторая неопределенность в отношении действительного состояния системы, при этом каждому из возможных альтернативных векторов состояния поставлена в соответствие некоторая вероятность – самая обычная классическая вероятность, выраженная самым обычным вещественным числом. Однако матрица плотности вносит в это описание некоторую путаницу (заложенную изначально), поскольку не отличает классические вероятности, фигурирующие в вышеупомянутой взвешенной вероятностной комбинации, от вероятностей квантовомеханических, возникающих в результате процедуры R. Дело в том, что операционными методами различить эти вероятности невозможно, поэтому в операционном же смысле вполне уместным представляется математическое описание (матрица плотности), которое такого различия не делает.

Как выглядит это математическое описание? Я не стану углубляться в ненужные здесь подробности, лишь вкратце изложу основные концепции. Идея матрицы плотности, вообще говоря, весьма изящна.⁴² Начать с того, что вместо каждого отдельного состояния $|\psi\rangle$ мы используем объект вида

$$|\psi\rangle\langle\psi|.$$

Что означает такая запись? Не прибегая к точному математическому определению, которое для нас сейчас несущественно, можно сказать, что это выражение представляет собой особого рода «произведение» (точнее, вид тензорного произведения, см. §5.15) вектора состояния $|\psi\rangle$ и «комплексно сопряженного» ему вектора $\langle\psi|$. Вектор состояния $|\psi\rangle$ мы полагаем нормированным (т.е. $\langle\psi|\psi\rangle = 1$); тогда выражение $|\psi\rangle\langle\psi|$ однозначно определяется физическим состоянием, представленным вектором $|\psi\rangle$ (поскольку не зависит от изменений фазового множителя $|\psi\rangle \rightarrow e^{i\theta}|\psi\rangle$, см. §5.10). В системе обозначений Дирака исходный вектор $|\psi\rangle$ называется «кет»-вектором, а соответствующий ему $\langle\psi|$ – «бра»-вектором. Бра-вектор $\langle\psi|$ и кет-вектор $|\phi\rangle$ могут образовывать и скалярное произведение («bra-ket»⁴³):

$$\langle\psi|\phi\rangle,$$

с таким обозначением мы уже встречались в §5.12. Значением скалярного произведения является самое обычное комплексное число, тогда как тензорное произведение $|\psi\rangle\langle\phi|$ в матрице плотности дает более сложный математический «объект» – элемент некоторого векторного пространства.

Перейти от непонятного «объекта» к обычному комплексному числу позволяет особая математическая операция, называемая вычислением следа (или суммы элементов главной

⁴² Эта идея была предложена в 1932 году выдающимся венгерско-американским математиком Джоном фон Нейманом. Ему же, главным образом, мы обязаны теорией, опирающейся на первопроектные труды Алана Тьюринга и положившей начало развитию электронных компьютеров. Кроме того, фон Нейман стоял у истоков теории игр (см. ссылку в примечании 9 после третьей главы, с. 335 {= **МОИ № 17, с.148, сноска 212**}) и, что ближе к теме нашего разговора, первым четко определил две квантовые процедуры, которые я обозначил здесь буквами «U» и «R».

⁴³ Словуочно английскому *bracket* «скобка». – *Прим. перев.*

диагонали) матрицы. Для простого выражения $|\psi\rangle\langle\phi|$ эта операция сводится к простой перестановке членов, дающей в результате скалярное произведение:

$$\text{СЛЕД } |\psi\rangle\langle\phi| = \langle\phi|\psi\rangle.$$

В случае суммы членов «след» вычисляется линейно: например,

$$\text{СЛЕД } (z|\psi\rangle\langle\phi| + w|\alpha\rangle\langle\beta|) = z\langle\phi|\psi\rangle + w\langle\beta|\alpha\rangle.$$

Я не стану в подробностях выводить все математические свойства таких объектов, как $\langle\psi|$ и $|\psi\rangle\langle\phi|$, однако кое о чем упомянуть стоит. Во-первых, произведение $|\psi\rangle\langle\phi|$ подчиняется тем же алгебраическим правилам, что перечислены на с. 446⁴⁴ для произведения $|\psi\rangle|\phi\rangle$ (за исключением последнего, которое к данному случаю неприменимо):

$$\begin{aligned}(z|\psi\rangle)\langle\phi| &= z(|\psi\rangle\langle\phi|) = |\psi\rangle(z\langle\phi|), \\ (|\psi\rangle + |\chi\rangle)\langle\phi| &= |\psi\rangle\langle\phi| + |\chi\rangle\langle\phi|, \\ |\psi\rangle(\langle\phi| + \langle\chi|) &= |\psi\rangle\langle\phi| + |\psi\rangle\langle\chi|.\end{aligned}$$

Следует также отметить, что бра-вектор $\langle\psi|$ является комплексным сопряженным кет- вектора $z|\psi\rangle$ (поскольку число $\langle\psi|$ есть комплексное сопряженное комплексного числа z , см. с. 412⁴⁵), а сумма $\langle\psi| + \langle\chi|$ – комплексным сопряженным суммы $|\psi\rangle + |\chi\rangle$.

Допустим, нам нужно составить матрицу плотности, представляющую некоторую комбинацию вероятностей нормированных состояний, скажем, $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$; вероятности, соответственно, равны a и b . Правильная матрица плотности в данном случае будет иметь вид

$$D = a|\alpha\rangle\langle\alpha| + b|\beta\rangle\langle\beta|.$$

Для трех нормированных состояний $|\alpha\rangle$, $|\beta\rangle$, $|\gamma\rangle$ с соответствующими вероятностями a , b , c имеем

$$D = a|\alpha\rangle\langle\alpha| + b|\beta\rangle\langle\beta| + c|\gamma\rangle\langle\gamma|,$$

и так далее. Из того, что вероятности всех альтернативных вариантов должны в сумме давать единицу, можно вывести важное свойство, справедливое для любой матрицы плотности:

$$\text{СЛЕД } (D) = 1.$$

Как же использовать матрицу плотности для вычисления вероятностей, результатов измерения? Рассмотрим сначала простой случай примитивного измерения. Спросим, находится ли система в физическом состоянии $|\psi\rangle$ (ДА) или в ином состоянии, ортогональном $|\psi\rangle$ (НЕТ). Само измерение представляет собой математический объект (так называемый проектор), очень похожий на матрицу плотности:

$$E = |\psi\rangle\langle\psi|.$$

Вероятность p получения ответа ДА определяется из выражения

$$p = \text{СЛЕД } (DE),$$

где произведение DE само представляет собой объект, подобный матрице плотности. Оно вычисляется с помощью несложных алгебраических правил, необходимо лишь соблюдать порядок «умножений». Например, для вышеприведенной двучленной суммы $D = a|\alpha\rangle\langle\alpha| + b|\beta\rangle\langle\beta|$ имеем

$$\begin{aligned}DE &= (a|\alpha\rangle\langle\alpha| + b|\beta\rangle\langle\beta|)|\psi\rangle\langle\psi| = \\ &= a|\alpha\rangle\langle\alpha|\psi\rangle\langle\psi| + b|\beta\rangle\langle\beta|\psi\rangle\langle\psi| = \\ &= (a\langle\alpha|\psi\rangle)|\alpha\rangle\langle\psi| + (b\langle\beta|\psi\rangle)|\beta\rangle\langle\psi|.\end{aligned}$$

Члены $\langle\alpha|\psi\rangle$ и $\langle\beta|\psi\rangle$ могут «коммутировать» с другими выражениями, так как они представляют собой просто числа, порядок же таких «объектов», как $|\alpha\rangle$ и $\langle\psi|$ необходимо тщательно соблюдать. Далее получаем (учитывая, что $zz = |z|^2$, см. с. 412)

$$\begin{aligned}\text{СЛЕД } (DE) &= (a\langle\alpha|\psi\rangle)\langle\psi|\alpha\rangle + (b\langle\beta|\psi\rangle)\langle\psi|\beta\rangle = \\ &= a|\langle\alpha|\psi\rangle|^2 + b|\langle\beta|\psi\rangle|^2.\end{aligned}$$

Напомню (см. §5.13, с. 443), что величины $|\langle\alpha|\psi\rangle|^2$ и $|\langle\beta|\psi\rangle|^2$ представляют собой квантовые вероятности соответствующих конечных состояний $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$, тогда как a и b суть классические вклады в полную вероятность. Таким образом, в окончательном выражении квантовые и классические вероятности оказываются смешаны.

⁴⁴ В.Э.: §5.15 выше в этом томе.

⁴⁵ В.Э.: §5.8 выше в этом томе.

В случае более общего измерения типа «да/нет» рассуждение в целом не изменяется, только вместо определенного выше проектора «E» используется проектор более общего вида

$$E = |\psi\rangle\langle\psi| + |\phi\rangle\langle\phi| + \dots + |\chi\rangle\langle\chi|,$$

где $|\psi\rangle, |\phi\rangle, \dots, |\chi\rangle$ – взаимно ортогональные нормированные состояния, заполняющие пространство ДА-состояний в гильбертовом пространстве. Как мы видим, проекторы обладают общим свойством

$$E^2 = E.$$

Вероятность получения ответа ДА при измерении, определяемом проектором E, системы с матрицей плотности D равна следу (DE) – в точности, как и в предыдущем примере.

Отметим важный факт: искомую вероятность можно вычислить, если нам всего-навсего известны матрица плотности и проектор, описывающий измерение. Нам не нужно знать, каким именно образом из индивидуальных состояний была составлена матрица плотности. Полная вероятность получается сама собой в виде соответствующей комбинации классических и квантовых вероятностей, а нам не приходится беспокоиться, какая ее часть откуда взялась.

Рассмотрим повнимательнее это любопытное переплетение классических и квантовых вероятностей в матрице плотности. Допустим, например, что у нас имеется частица со спином $1/2$, и мы абсолютно не уверены, в каком спиновом состоянии (нормированном) она в данный момент пребывает – $|\uparrow\rangle$ или $|\downarrow\rangle$. Предположив, что соответствующие вероятности этих состояний равны $1/2$ и $1/2$, построим матрицу плотности

$$D = \frac{1}{2}|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + \frac{1}{2}|\downarrow\rangle\langle\downarrow|.$$

Простое вычисление показывает, что в точности такая же матрица плотности D получается в случае комбинации равных вероятностей ($1/2$ и $1/2$) любых других ортогональных возможностей – скажем, состояний (нормированных) $|\rightarrow\rangle$ и $|\leftarrow\rangle$, где $|\rightarrow\rangle = (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ и $|\leftarrow\rangle = (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$:

$$D = \frac{1}{2}|\rightarrow\rangle\langle\rightarrow| + \frac{1}{2}|\leftarrow\rangle\langle\leftarrow|.$$

Допустим, мы решили измерять спин частицы в направлении «вверх», т.е. соответствующий проектор имеет вид

$$E = |\uparrow\rangle\langle\uparrow|.$$

Тогда для вероятности получения ответа ДА, согласно первому описанию, находим

$$\begin{aligned} \text{СЛЕД}(DE) &= \frac{1}{2}|\langle\uparrow|\uparrow\rangle|^2 + \frac{1}{2}|\langle\downarrow|\uparrow\rangle|^2 = \\ &= \frac{1}{2} \times 1^2 + \frac{1}{2} \times 0^2 = \\ &= \frac{1}{2}, \end{aligned}$$

где мы полагаем $\langle\uparrow|\uparrow\rangle = 1$ и $\langle\downarrow|\downarrow\rangle = 0$ (поскольку состояния нормированы и ортогональны). Согласно второму описанию, находим

$$\begin{aligned} \text{СЛЕД}(DE) &= \frac{1}{2}|\langle\rightarrow|\uparrow\rangle|^2 + \frac{1}{2}|\langle\leftarrow|\uparrow\rangle|^2 = \\ &= \frac{1}{2} \times (1/\sqrt{2})^2 + \frac{1}{2} \times (1/\sqrt{2})^2 = \\ &= \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}; \end{aligned}$$

правое $|\rightarrow\rangle$ и левое $|\leftarrow\rangle$ состояния здесь не являются ни ортогональными, ни параллельными измеряемому состоянию $|\uparrow\rangle$, т.е. на деле $|\langle\rightarrow|\uparrow\rangle| = |\langle\leftarrow|\uparrow\rangle| = 1/\sqrt{2}$.

Хотя полученные вероятности оказываются одинаковыми (как, собственно, и должно быть, поскольку одинаковы матрицы плотности), физические интерпретации этих двух описаний совершенно различны. Мы согласны с тем, что физическая «реальность» любой ситуации описывается некоторым вполне определенным вектором состояния, однако существует классическая неопределенность в отношении того, каким окажется этот вектор в действительности. В первом предложенном описании атом находится либо в состоянии $|\uparrow\rangle$, либо в состоянии $|\downarrow\rangle$, и мы не знаем, в каком из двух. Во втором описании – либо в состоянии $|\rightarrow\rangle$, либо в состоянии $|\leftarrow\rangle$, и мы снова не знаем, в каком именно. Когда мы в первом случае выполняем измерение с целью

выяснить, не находится ли атом в состоянии $|\uparrow\rangle$, мы имеем дело с самыми обычными классическими вероятностями: вероятность того, что атом находится в состоянии $|\uparrow\rangle$, совершенно очевидно равна $\frac{1}{2}$, и больше тут говорить не о чем. Когда мы задаем тот же вопрос во втором случае, измерению подвергается уже комбинация вероятностей состояний $|\rightarrow\rangle$ и $|\leftarrow\rangle$, и каждое из них вносит в полную вероятность свой классический вклад $\frac{1}{2}$, помноженный на свой же квантовомеханический вклад $\frac{1}{2}$, что дает в итоге $\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2}$. Как можно видеть, матрица плотности ухитряется сосчитать нам верную вероятность вне зависимости от того, какие классические и квантовомеханические доли эту вероятность, по нашему предположению, составляют.

Приведенный выше пример является в некотором роде особым, поскольку так называемые «собственные значения» матрицы плотности в этом случае оказываются вырожденными (в силу того, что обе классические вероятности здесь – $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{2}$ – одинаковы); именно эта «особость» и позволяет нам составить более одного описания в комбинациях вероятностей ортогональных альтернатив. Впрочем, для наших рассуждений это ограничение несущественно. (А упомянул я о нем исключительно для того, чтобы избежать упреков в невежестве со стороны возможно читающих эти строки специалистов.) Всегда можно представить, что комбинация вероятностей охватывает гораздо большее число состояний, нежели просто набор взаимно ортогональных альтернатив. Например, в вышеописанной ситуации мы вполне могли бы составить очень сложные вероятностные комбинации множества возможных различных направлений оси спина. Иначе говоря, существует огромное количество совершенно различных способов представить одну и ту же матрицу плотности в виде комбинации вероятностей альтернативных состояний, и это верно для любых матриц плотности, а не только для тех, собственные значения которых вырождены.

§6.5. Матрицы плотности для ЭПР-пар

Перейдем к ситуациям, описание которых в терминах матриц плотности представляется особенно уместным – и в то же время выявляет один почти парадоксальный аспект интерпретации такой матрицы. Речь идет об ЭПР-эффектах и квантовой сцепленности. Рассмотрим физическую ситуацию, описанную в §5.17: частица со спином 0 (в состоянии $|\Omega\rangle$) расщепляется на две частицы (каждая со спином $\frac{1}{2}$), которые разлетаются вправо и влево, удаляясь на значительное расстояние друг от друга, в результате чего выражение для их совокупного (сцепленного) состояния принимает вид:

$$|\Omega\rangle = |L\uparrow\rangle|R\downarrow\rangle - |L\downarrow\rangle|R\uparrow\rangle.$$

Предположим, что некий наблюдатель⁴⁶ имеет намерение измерить спин правой частицы с помощью некоего измерительного устройства, левая же частица успела уже удалиться на такое огромное расстояние, что добраться до нее наблюдатель не может. Как наш наблюдатель опишет состояние спина правой частицы?

Скорее всего, он весьма благообразно воспользуется матрицей плотности

$$D = \frac{1}{2}|R\uparrow\rangle\langle R\uparrow| + \frac{1}{2}|R\downarrow\rangle\langle R\downarrow|,$$

поскольку ничто не мешает ему вообразить, что некий другой наблюдатель – скажем, коллега, по случаю оказавшийся неподалеку от левой частицы, – решил измерить спин этой левой частицы в направлении «вверх/вниз». Узнать, какой именно результат получил упомянутый воображаемый коллега, нашему наблюдателю неоткуда. Однако он знает, что если коллега получил результат $|L\uparrow\rangle$, то его собственная (правая) частица должна находиться в состоянии $|R\downarrow\rangle$, если же коллега получил при измерении состояние $|L\downarrow\rangle$, то правая частица должна находиться в состоянии $|R\uparrow\rangle$. Нашему наблюдателю также известно (из стандартных правил квантовой теории, касающихся вероятностей, какие можно ожидать в данной ситуации), что воображаемый коллега может получить с равной вероятностью как результат $|L\uparrow\rangle$, так и результат $|L\downarrow\rangle$. Из всего этого наблюдатель заключает, что состояние его собственной частицы описывается комбинацией равных вероятностей ($\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{2}$, соответственно) двух альтернатив, $|R\uparrow\rangle$ и $|R\downarrow\rangle$, так что матрица плотности D с его стороны действительно должна быть такой, какую мы только что записали.

Он, впрочем, может предположить, что его коллега производил измерение левой частицы в направлении «влево/вправо». В этом случае совершенно аналогичное вышеизложенному рассуж-

⁴⁶ См. обращение к читателю в начале книги, с. 18 {= МОИ № 17, с.8}.

дение (на сей раз опирающееся на альтернативное описание $|\Omega\rangle = |L\leftarrow\rangle|R\rightarrow\rangle - |L\rightarrow\rangle|R\leftarrow\rangle$, см. с. 454⁴⁷) приведет нашего наблюдателя к заключению, что спиновое состояние его собственной (правой) частицы описывается комбинацией равных вероятностей направлений оси спина «влево» и «вправо», а соответствующая матрица плотности имеет вид

$$D = \frac{1}{2}|R\rightarrow\rangle\langle R\rightarrow| + \frac{1}{2}|R\leftarrow\rangle\langle R\leftarrow|,$$

Как мы уже видели, эти матрицы плотности в точности одинаковы, однако их интерпретации – как комбинаций вероятностей альтернативных состояний – существенно различаются. Совершенно не важно, какую именно интерпретацию выберет наблюдатель. Из своей матрицы плотности он получит всю возможную информацию, требуемую для вычисления вероятностей результатов измерений спина правой (и только правой) частицы. Более того, поскольку коллега является воображаемым, нашего наблюдателя вообще не должно волновать, выполнялось ли хоть какое-то измерение спина левой частицы. Всё та же матрица плотности D скажет ему всё, что можно узнать о состоянии спина правой частицы до того, как он действительно выполнит измерение. В самом деле, уж наверное матрица плотности D определит «действительное состояние» правой частицы с гораздо большей точностью, нежели какой бы то ни было отдельный вектор состояния.

Руководствуясь подобными общими соображениями, люди порой приходят к выводу, что в определенных ситуациях матрицы плотности дают более адекватное описание квантовой «реальности», чем векторы состояния. Однако в ситуациях, подобных рассматриваемой, это не так. Ничто в принципе не мешает воображаемому коллеге превратиться в коллегу реального, а двум наблюдателям – передать друг другу результаты своих наблюдений. Корреляции между измерениями, выполненными одним наблюдателем, и измерениями, выполненными другим, невозможно объяснить отдельными матрицами плотности, описывающими каждая свою частицу. Для такого объяснения необходимо всё сцепленное состояние целиком, в том виде, в каком оно представлено выше выражением для действительного вектора состояния $|\Omega\rangle$.

Например, если оба наблюдателя решат измерять спины своих частиц в направлении «вверх/вниз», то они неизбежно должны получить диаметрально противоположные результаты. Индивидуальные матрицы плотности такой информации не содержат. Еще более серьезное возражение: как недвусмысленно показывает теорема Белла (§5.4), моделировать сцепленное состояние связанной пары частиц какими бы то ни было локальными классическими методами (вроде «носков Бертлмана») до измерения невозможно. (Простая демонстрация этого факта приводится в НРК, примечание 14 после шестой главы, с. 301 {= МОИ № 15, с.109., прим.130} – идея этой демонстрации, вообще говоря, принадлежит Стаппу [359], см. также [360]. Описан случай, когда один из наблюдателей измеряет спин своей частицы в вертикальном, «вверх/вниз», или горизонтальном, «вправо/влево», направлении, тогда как другой выбирает для измерения одно из направлений под углом в 45° к тем двум. Если заменить частицы со спином $1/2$ частицами со спином $3/2$, то такую демонстрацию можно сделать еще более убедительной, воспользовавшись магическими додекаэдрами из §5.3, так как при этом нам не понадобятся вероятности.)

Таким образом, в данной ситуации «матричное» описание может быть признано адекватным «реальности», только если имеется какая-либо причина, в принципе не позволяющая выполнить (и сравнить) измерения на обоих концах системы. В обычных условиях таких причин, как правило, не существует. В условиях необычных – например, в ситуации, предложенной Стивенем Хокингом [191], где одна из частиц ЭПР-пары оказывается заключенной внутри черной дыры, – могут появиться и более серьезные доводы в пользу матричного описания на фундаментальном уровне (что, собственно, и доказывает Хокинг). Однако такие доводы сами по себе предполагают некий серьезный пересмотр самих основ квантовой теории. Пока такого пересмотра не произошло, существенная роль матрицы плотности остается скорее практической (FAPP), нежели фундаментальной – что, впрочем, отнюдь не уменьшает ее важности.

§6.6. FAPP-объяснение процедуры R

Теперь давайте посмотрим, какую же, в самом деле, роль играют матрицы плотности в рамках стандартного (FAPP-) подхода к объяснению «наблюдаемой» природы процедуры R. Идея заключается в том, что квантовая система и измерительное устройство (вместе с занимае-

⁴⁷ В.Э.: §5.17 выше в этом томе.

мым ими окружением) – все три, предполагается, эволюционируют вместе в соответствии с процедурой U – ведут себя так, будто всякий раз, когда эффекты измерения оказываются нерасторжимо сцеплены с этим самым окружением, происходит процедура R .

Изначально квантовая система считается изолированной от окружения, однако в момент «измерения» в измерительном устройстве инициируются макроскопические эффекты, которые вскоре приводят к возникновению сцепленностей с элементами окружения, причем количество этих сцепленностей непрерывно возрастает. На этом этапе картина во многом напоминает описанную в предыдущем параграфе ЭПР-ситуацию. Квантовая система (вместе с только что сработавшим измерительным устройством) выступает в роли правой частицы, тогда как возмущенное окружение аналогично отдаленной левой частице. Физик, намеревающийся осмотреть измерительное устройство, играет роль, схожую с ролью наблюдателя, предполагающего исследовать правую частицу. Наблюдатель не имеет доступа к каким бы то ни было измерениям, которые могли быть выполнены на левой частице; аналогично, нашему физика недоступна подробная картина возмущений, предположительно произведенных в окружении измерительным устройством. Окружение состоит из огромного количества случайным образом движущихся частиц, и можно смело утверждать, что детальная и точная информация относительно того, какому именно возмущению подверглись частицы окружения, будет безвозвратно потеряна для физика. Аналогичным образом, наблюдателю у правой частицы из предыдущего примера недоступны какие бы то ни было сведения о спине левой частицы. Как и в случае с правой частицей, состояние измерительного устройства адекватно описывается не отдельным вектором состояния, но матрицей плотности; соответственно, измерительное устройство рассматривается не как чистое, отдельно взятое квантовое состояние, но как комбинация вероятностей состояний. Согласно стандартной интерпретации, эта комбинация вероятностей дает те же вероятностно-взвешенные альтернативы, что мы получили бы в результате процедуры R – по крайней мере, с практической точки зрения.

Рассмотрим пример. Допустим, некий источник испускает фотон в направлении детектора. Между источником и детектором помещено полусеребряное зеркало, после столкновения с которым фотон переходит в суперпозицию состояний

$$w|\alpha\rangle + z|\beta\rangle;$$

при этом состояние $|\alpha\rangle$ (пропущенный фотон) активирует детектор (ДА), а состояние $|\beta\rangle$ (отраженный фотон) никак детектора не затрагивает (НЕТ). Полагая все состояния нормированными, получим, в соответствии с процедурой R , следующие вероятности:

$$\text{вероятность ответа ДА} = |w|^2,$$

$$\text{вероятность ответа НЕТ} = |z|^2.$$

Поскольку зеркало полупрозрачно (как в исходном примере, рассмотренном в §5.7, где теперешним $|\alpha\rangle$ и $|\beta\rangle$ соответствовали состояния $|B\rangle$ и $|C\rangle$), каждая из этих вероятностей равна $1/2$, т.е. $|w| = |z| = 1/\sqrt{2}$.

Детектор находится первоначально в состоянии $|\Psi\rangle$, которое по поглощению фотона (в состоянии $|\alpha\rangle$) эволюционирует в состояние $|\Psi_D\rangle$ (ДА), а в отсутствие поглощения фотона (в состоянии $|\beta\rangle$) – в состояние $|\Psi_N\rangle$ (НЕТ). Если игнорировать окружение, то состояние системы на данном этапе имеет вид

$$w|\Psi_D\rangle + z|\Psi_N\rangle|\beta\rangle$$

(все состояния мы полагаем нормированными). Предположим, однако, что детектор, будучи макроскопическим объектом, сразу же вступает во взаимодействие с окружением, – частью такого окружения можно считать и «сбежавший» фотон (первоначально в состоянии $|\beta\rangle$), поглощенный стеной лаборатории. Как и прежде, детектор, в зависимости от того, зарегистрировал он фотон или нет, переходит в одно из своих новых состояний $|\Psi_D\rangle$ или $|\Psi_N\rangle$, соответственно), однако в процессе перехода он по-разному возмущает окружение. Состояние окружения, сопутствующее состоянию детектора $|\Psi_D\rangle$, обозначим через $|\Phi_D\rangle$, а состояние окружения, сопутствующее состоянию детектора $|\Psi_N\rangle$, – через $|\Phi_N\rangle$ (эти состояния мы также полагаем нормированными, но не обязательно ортогональными). Полное состояние сцепленной системы можно записать так:

$$w|\Phi_D\rangle|\Psi_D\rangle + z|\Phi_N\rangle|\Psi_N\rangle.$$

До сих пор физик в процессе не участвовал, однако теперь он собирается осмотреть детектор, чтобы узнать, какой результат тот зафиксировал (ДА или НЕТ). Каким образом физик может оценить квантовое состояние детектора в момент, непосредственно предшествующий

осмотру? Как и наблюдатель, измерявший в предыдущем параграфе спин правой частицы, наш физик резонно воспользуется матрицей плотности. Можно предположить, что никакого измерения окружения с целью выяснить, находится оно в состоянии $|\Phi_D\rangle$ или $|\Phi_H\rangle$, в действительности не проводилось – точно так же, как никто не измерял спин левой частицы в описанной выше ЭПР-паре. Соответственно, матрица плотности и в самом деле даст адекватное квантовое описание детектора.

Какова эта матрица плотности? Рассуждая стандартным образом⁴⁸ (который основывается на некоем частном способе моделирования упомянутого окружения – исходя при этом из неких не вполне обоснованных допущений, таких, например, как допущение о несущественности корреляций ЭПР-типа), приходим к заключению, что матрица плотности в данном случае должна очень быстро принять вид, очень хорошее приближение к которому дает следующее выражение:

$$D = a|\Psi_D\rangle\langle\Psi_D| + b|\Psi_H\rangle\langle\Psi_H|,$$

где

$$a = |w|^2 \text{ и } b = |z|^2.$$

Эту матрицу плотности можно интерпретировать, как представление комбинации вероятностей двух альтернатив: регистрация детектором фотона (результат ДА) с вероятностью $|w|^2$ и отсутствие регистрации детектором фотона (результат НЕТ) с вероятностью $|z|^2$. Если бы имела место процедура R, то именно к такому результату и должен был бы прийти физик по завершении своего эксперимента – или нет?

Думаю, здесь следует проявить некоторую осторожность. Матрица плотности D и в самом деле позволяет физика вычислить необходимые ему значения вероятностей, если предположить, что альтернатив всего две: либо $|\Psi_D\rangle$, либо $|\Psi_H\rangle$. Но из наших рассуждений такое предположение никоим образом не следует. Вспомним из предыдущего параграфа, что матрицы плотности, как комбинации вероятностей состояний, допускают множество альтернативных интерпретаций. В частности, поскольку зеркало полупрозрачно, мы имеем здесь в точности такую же матрицу плотности, как и та, какую мы получили выше для частицы со спином $\frac{1}{2}$:

$$D = \frac{1}{2}|\Psi_D\rangle\langle\Psi_D| + \frac{1}{2}|\Psi_H\rangle\langle\Psi_H|,$$

Можно записать ее иначе; скажем, так:

$$D = \frac{1}{2}|\Psi_P\rangle\langle\Psi_P| + \frac{1}{2}|\Psi_Q\rangle\langle\Psi_Q|,$$

где $|\Psi_P\rangle$ и $|\Psi_Q\rangle$ – два других возможных ортогональных состояния детектора (что представляет собой, надо сказать, совершенную нелепость с точки зрения классической физики), причем

$$|\Psi_P\rangle = (|\Psi_D\rangle + |\Psi_H\rangle)/\sqrt{2} \text{ и } |\Psi_Q\rangle = (|\Psi_D\rangle - |\Psi_H\rangle)/\sqrt{2}.$$

Тот факт, что наш физик полагает, будто состояние его детектора описывается матрицей плотности D, никак не объясняет, почему он всегда обнаруживает детектор либо в состоянии ДА (что соответствует $|\Psi_D\rangle$), либо в состоянии НЕТ ($|\Psi_H\rangle$). Потому что совершенно такую матрицу плотности он получил бы, если состояние системы представляло собой равновесную вероятностную комбинацию, по классическим меркам, нелепостей $|\Psi_P\rangle$ и $|\Psi_Q\rangle$ (описывающих, соответственно, квантовые линейные суперпозиции «ДА плюс НЕТ» и «ДА минус НЕТ»)!

Для того, чтобы подчеркнуть физическую абсурдность состояний, подобных $|\Psi_P\rangle$ и $|\Psi_Q\rangle$, в случае макроскопического детектора, рассмотрим «измерительное устройство», состоящее из ящика и помещенной внутрь него кошки, причем ящик снабжен неким устройством, убивающим кошку, если детектор регистрирует фотон (в состоянии $|\alpha\rangle$), если же детектор ничего не регистрирует (фотон в состоянии $|\beta\rangle$), то кошка остается жива – это измерительное устройство широко известно под названием шрёдингерова кошка (см. §5.1 и рис. 6.3). Результат ДА представляется здесь как «кошка мертва», а результат НЕТ – как «кошка жива». Однако из одного лишь того, что нам известно, что матрица плотности имеет вид равновесной комбинации этих двух состояний, вовсе не следует, что кошка либо мертва, либо жива (с равной вероятностью), так как эта же кошка может также быть (с равной вероятностью) либо «мертва плюс жива», либо «мертва минус жива»! Сама по себе матрица плотности ничего не говорит о том, что эти последние классически абсурдные возможности в известном нам реальном мире никогда не реализуются. Как и во «множественно мировом» подходе к объяснению R, нам, похоже, вновь предлагается поразмыслить над тем, какого рода состояния мы намерены позволить воспринимать обладающему сознанием наблюдателю (в данном случае, нашему «физику»). С чего мы, собственно говоря, взяли, что состояния вроде «кошка мертва плюс кошка

⁴⁸ См. [82], [399], [400] и [283].

жива» совершенно и абсолютно недоступны восприятию некоего сознательного внешнего⁴⁹ наблюдателя?

Мне могут возразить, что «измерение» детектора, которое наш физик намерен произвести, состоит всего лишь в том, чтобы узнать, какой результат из двух (ДА или НЕТ) этот самый детектор зафиксировал – или, как в примере с кошкой, выяснить, мертва она или жива. (Вспомним и о наблюдателе из предыдущего параграфа, который собирался всего лишь определить, вверх направлена ось спина правой частицы или вниз.) Для такого измерения матрица плотности и в самом деле дает верные значения вероятностей, в каком бы виде мы ее ни представили. А вот тут начинаются проблемы. Почему мы должны считать таким измерением простой взгляд на кошку? В U-эволюции квантовой системы нет ни единого правила, запрещающего нашему сознанию в процессе «разглядывания» и, как следствие, восприятия квантовой системы осознавать комбинации вроде «кошка мертва плюс кошка жива». Так! Здесь мы, кажется, уже проходили. Что такое сознание? Как на самом деле устроен наш мозг? Ведь первой и самой очевидной причиной поисков FAPP-объяснения процедуры R как раз и было желание избежать необходимости связываться с такого рода вопросами!

Кто-то скажет: всё дело в том, что мы выбрали для нашего примера нехарактерный особый случай с двумя равными вероятностями $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{2}$ (случай «вырожденных собственных значений»). Только в таких ситуациях матрица плотности допускает более одного представления в виде взвешенной вероятностной комбинации взаимно ортогональных альтернатив. Это ограничение не существенно, поскольку для интерпретации матрицы плотности как комбинации вероятностей ортогональность альтернатив непременным требованием не является. Более того, как показали в своей недавней работе Хьюстон, Йожа и Вуперс [210], в ситуациях, подобных вышеописанным (т.е. там, где матрица плотности вводится потому, что рассматриваемая система сцеплена с какой-то другой изолированной системой), для любой комбинации вероятностей альтернативных состояний, выбранной вами для составления матрицы плотности, всегда найдется измерение, выполнимое в той самой изолированной системе, которое даст в точности такое же представление матрицы плотности. Как бы то ни было, одно то, что неоднозначность возникает уже в случае равных вероятностей, ясно показывает, что для описания действительных альтернативных состояний нашего детектора матричного представления недостаточно.

Итак, одно лишь знание матрицы плотности D не дает никаких оснований полагать, что система представляет собой вероятностную комбинацию тех самых состояний, которые эту конкретную матрицу D составляют. Точно такую же матрицу D можно получить и из множества других самых различных комбинаций состояний, большая часть которых окажутся совершенно «абсурдными» с точки зрения здравого смысла. Более того, такая неоднозначность свойственна любой матрице плотности, какую ни возьми.

Стандартные рассуждения не часто заходят дальше требования «диагональности» матрицы плотности. «Диагональной», по сути, является такая матрица плотности, которую можно выразить в виде взвешенной вероятностной комбинации взаимно ортогональных альтернатив – точнее, не всяких альтернатив, а тех классических альтернатив, которые нас в данном случае интересуют. (Если убрать это последнее условие, то диагональными окажутся все матрицы плотности!) Однако мы уже убедились, что один лишь факт «выразимости» матрицы плотности в таком виде сам по себе отнюдь не является гарантией того, что детекторы не предстанут перед нами в какой-нибудь «абсурдной» квантовой суперпозиции состояний ДА и НЕТ.

Таким образом, вопреки всем и всяческим уверениям, стандартное рассуждение не объясняет, как то или иное приближенное описание U-эволюции в условиях неустранимого воздействия окружения порождает «иллюзию» процедуры R. Оно демонстрирует всего лишь, что в такой ситуации процедура R и U-эволюция могут мирно сосуществовать. Нам всё еще нужно в квантовой теории место для процедуры R, отличное от того, что занимает U-эволюция (по крайней мере, пока не появится теория, жестко предписывающая, какого рода состояния способны воспринимать существа, обладающие сознанием).

Отыскание такого места само по себе важно для общей непротиворечивости квантовой теории. Однако не менее важно понять, что это сосуществование и эта непротиворечивость

⁴⁹ Нельзя, разумеется, забывать и о сознании кошки! На эту сторону дела обратил наше самое пристальное внимание Юджин П. Вигнер, предложив свой вариант парадокса шрёдингеровой кошки [385]. «Друг Вигнера» разделяет с шрёдингеровой кошкой некоторые из ее лишений, однако в каждом из состояний суперпозиции остается в полном сознании!

имеют статус скорее практического приближения (FAPP), нежели строго научный. В конце предыдущего параграфа мы говорили о том, что описание правой частицы посредством матрицы плотности является адекватным лишь в отсутствие возможности сравнения измерений, выполненных на обоих частицах. Если же такая возможность есть, то необходимо рассматривать полное состояние системы с ее квантовыми, а не просто взвешенно-вероятностными суперпозициями. Аналогичным образом, матричное описание детектора в настоящем параграфе адекватно лишь в том случае, если отсутствует возможность детально измерить состояние окружения и сравнить результаты измерения с результатами наблюдения детектора экспериментатором. Редукция R может сосуществовать с эволюцией U исключительно при условии, что мельчайшие элементы окружения останутся недоступными измерению, а тонкие эффекты квантовой интерференции, надежно укрытые (согласно стандартной квантовой теории) невообразимой сложностью точного описания окружения, избегнут наблюдения.

Очевидно, что какая-то (и даже немалая) доля правды в стандартном объяснении есть, однако полным оно быть никак не может. Разве можем мы быть уверены в том, что в ближайшем будущем не появится какая-нибудь новая технология, с помощью которой все эти интерференционные феномены будут детально описаны? Необходимо ввести некое строгое физическое правило, определяющее, какие из экспериментов, невозможных сегодня практически, являются невозможными в принципе. Согласно такому правилу, должен существовать некий уровень физических процессов, получение каких бы то ни было данных об эффектах интерференции на котором невозможно в принципе. Придется, по всей видимости, постулировать некий новый физический феномен, благодаря которому комплексно-взвешенные суперпозиции физики квантового уровня действительно станут классическими альтернативами, а не просто будут считаться таковыми в FAPP-приближении. В существующем же виде FAPP-подход не дает картины действительной физической реальности. Он не может быть ничем иным, как временной полумерой в отсутствие настоящей физической теории – хотя и весьма полезной, надо сказать, полумерой, – и важно иметь это в виду, когда мы будем рассматривать выдвигаемые мною в §6.12 предположения.

§6.7. FAPP-объяснение правила квадратов модулей

В предыдущих трех параграфах неявно присутствовало одно далеко идущее допущение, к которому я намеренно не привлекал излишнего внимания. Одна лишь необходимость такого допущения эффективно аннулирует любое предположение о том, что из U-эволюции можно вывести правило квадратов модулей для процедуры R – даже в FAPP-приближении. Уже самим фактом использования матрицы плотности мы неявно допускаем, что взвешенная вероятностная комбинация может быть описана таким объектом вполне адекватно. Уже сама уместность использования выражений вроде $|\alpha\rangle\langle\alpha|$ (которые, в свою очередь, принадлежат к виду «объект, умноженный на собственное комплексное сопряженное») определенно намекает на присутствие где-то рядом правила квадратов модулей. Правило получения значений вероятности из матрицы плотности корректно сочетает классические и квантовые вероятности только потому, что правило квадратов модулей встроено в саму концепцию матрицы плотности.

Хотя процесс унитарной эволюции (U) действительно очень хорошо стыкуется (математически) с концепциями матрицы плотности и скалярного произведения $\langle\alpha|\beta\rangle$ в гильбертовом пространстве, это вовсе не означает, что вычисляемые с помощью квадратов модулей величины непременно являются вероятностями. То есть речь снова идет о сосуществовании R и U, а не об объяснении происхождения R из U. Унитарной эволюции абсолютно ничего не известно о понятии вероятности. То, что квантовые вероятности можно вычислять с помощью этой процедуры, совершенно очевидно является дополнительным допущением, вне зависимости от того, каким образом мы пытаемся обосновать взаимоотношения процедур R и U – привлекая к делу множественность миров или используя FAPP-подход.

Поскольку почти все экспериментальные подтверждения, какими может похвастаться квантовая механика, основаны на предписываемой теорией процедуре вычисления вероятностей, игнорировать R-часть квантовой механики мы можем лишь на свой страх и риск. Редукция R отлична от эволюции U и не следует из U, как бы громко и часто теоретики ни уверяли нас в обратном. А раз так, то придется нам смириться с R как с отдельным, самостоятельным физическим процессом. Я отнюдь не настаиваю на немедленном присвоении редукции статуса отдельного, самостоятельного физического закона. Ничуть не сомневаюсь, что она представляет

собой приближение чего-то такого, о чем мы, возможно, еще не имеем никакого представления. Рассуждения в конце предыдущего параграфа недвусмысленно указывают на то, что применение R-процедуры в процессе измерения действительно носит приближенный характер.

Согласимся пока с тем, что необходимо искать какие-то новые объяснения, и попробуем, соблюдая должную осторожность, двинуться дальше теми тропами в неизвестное, что, возможно, еще открыты перед нами.

§6.8. О редукции вектора состояния посредством сознания

Среди тех, кто всерьез полагает, что вектор состояния $|\psi\rangle$ описывает реальный физический мир, есть такие, кто утверждает – в противовес уповающим на эволюцию U на всех уровнях, т.е. приверженцам концепции множественности миров, что нечто подобное процедуре R действительно происходит, причем происходит тогда, когда в процесс вовлекается сознание наблюдателя. Выдающийся физик Юджин Вигнер как-то даже набросал вкратце теорию такого процесса [385]. Общая идея заключается в том, что бессознательная материя – или, возможно, всего лишь неживая материя – эволюционирует в соответствии с U, однако как только состояние системы оказывается сцеплено с состоянием какого-либо сознательного (или просто «живого») существа, появляется нечто новое, в дело вступает некий физический процесс, приводящий к R, он-то и редуцирует в действительности состояние системы.

Не думаю, что есть необходимость формулировать предположение (следуя такой точке зрения), что сознательное существо каким-то образом приобретает способность оказывать «воздействие» на тот выбор, какой делает в этот момент Природа. Такое предположение увлекло бы нас в чрезвычайно коварные воды – насколько я могу судить, наблюдаемые факты резко противоречат любым подобного рода упрощенным заявлениям, сводящимся к тому, что сознательный волевой акт способен воздействовать на результат квантовомеханического эксперимента. Таким образом, мы не станем в рамках нашего исследования настаивать на том, что процедура R должна непременно требовать активного участия «свободной сознательной воли» (альтернативным точкам зрения, впрочем, уделено некоторое внимание в §7.1).

Не сомневаюсь, что кое-кто из читателей ожидал, что идеи подобного рода должны были привлечь на свою сторону и меня (раз уж я занимаюсь поиском связей между проблемой квантового измерения и проблемой сознания). Уверяю вас, это не так. В конце концов, вполне возможно, что в нашей Вселенной сознание – феномен достаточно редкий. На поверхности Земли обладающие сознанием существа встречаются в самых различных местах, однако, насколько позволяют судить имеющиеся у нас на данный момент экспериментальные свидетельства,⁵⁰ в глубинах Вселенной, на расстоянии многих световых лет от нас, высокоразвитого – или какого-либо иного – сознания нет. Получается весьма странная картина: «реальная» физическая вселенная, физические объекты в которой эволюционируют так или иначе в зависимости от того, может ли их видеть, слышать или как-то иначе ощущать какой-либо из разумных обитателей этой самой вселенной.

Возьмем для примера погоду. Синоптические ситуации, развивающиеся в атмосфере любой планеты, обусловлены хаотическими физическими процессами (см. §1.7 {= МОИ № 17}) и, как следствие, очень чувствительны к многочисленным единичным квантовым событиям. Если в отсутствие сознания процесс R и вправду не происходит, тогда расплывчатое марево альтернатив квантовых суперпозиций никогда не стухнет в какую-то определенную синоптическую ситуацию. Можем ли мы и в самом деле полагать, что погода на какой-нибудь далекой планете так и пребывает в виде некоей совокупности комплексных суперпозиций бесконечного количества различных возможных вариантов (этакой полной неразберихи, не имеющей ничего общего с настоящей погодой), пока ее не воспримет своими органами чувств какое-нибудь забредшее туда случайно разумное создание, – в какой момент, и ни мгновением раньше, вся эта куча суперпозиций превратится, наконец, в погоду?

Можно возразить, что с операционной точки зрения – т.е. с операционной точки зрения обладающего сознанием существа – такая «погода суперпозиций» ничем не отличается от настоящей неизвестной заранее погоды (FAPP!). Однако такое решение проблемы физической реальности не является, само по себе, удовлетворительным. Как мы уже видели, FAPP-подход не

⁵⁰ Именно к этому, похоже, сводятся результаты программы SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence – Поиск внеземного разума (англ.) – *Прим. перев.*), у истоков которой стоял Ф. Дрейк.

объясняет «реальность» на таком фундаментальном уровне, но служит лишь в качестве временной полумеры, которая позволяет в рамках современной квантовой механики объединить U- и R-процедуры – до тех пор, по крайней мере, пока технический прогресс не заведет нас туда, где нам потребуется более точная и последовательная теория.

Словом, я предлагаю направить наши поиски решения проблем квантовой механики в какую-нибудь другую сторону. Хотя и нельзя исключить, что проблема разума окажется в конечном счете связана с проблемой квантового измерения – или U/R-парадоксом квантовой механики, – сознание само по себе (в том виде, в каком мы представляем его себе сейчас) не способно, по моему глубокому убеждению, разрешить внутренние физические конфликты квантовой теории. Думаю, что мы должны обратиться к проблеме квантового измерения и решить ее прежде, чем можно будет ожидать какого-либо реального прогресса в объяснении сознания в терминах физических процессов – причем решать эту проблему следует исключительно физическими средствами. Когда у нас появится удовлетворительное решение, мы, возможно, окажемся в лучшем положении для поиска ответов на загадку сознания. Я считаю, что решение проблемы квантового измерения является необходимым условием для понимания работы разума,⁵¹ но никогда не утверждал, что это одна и та же проблема. Проблема разума неизмеримо сложнее проблемы измерения!

§6.9. А теперь попробуем принять $|\psi\rangle$ действительно всерьез

Как выяснилось, те точки зрения, что на данный момент претендуют на серьезное отношение к квантовому описанию мира, в действительности всерьез его не принимают. Возможно, квантовый формализм слишком нам чужд, чтобы его можно было с легкостью принимать всерьез, и большинство физиков опасается чересчур сильно в него углубляться. Ведь кроме вектора состояния $|\psi\rangle$, эволюционирующего согласно U, пока система остается на квантовом уровне, нам приходится здесь иметь дело с крайне неприятным, дискретным и вероятностным, действием процедуры R, которое, по всей видимости, вызывает дискретные «скачки» вектора $|\psi\rangle$, когда квантовые эффекты переходят на классический уровень. Таким образом, если мы намерены предположить, что вектор $|\psi\rangle$ описывает реальность, то необходимо признать физически реальными и эти скачки, как бы неуютно мы себя в этой связи ни чувствовали. Впрочем, если мы и впрямь принимаем реальность описания в терминах квантового вектора состояния настолько всерьез, то нам следует быть готовыми к внесению в существующие правила квантовой теории некоторых (предпочтительно очень тонких) изменений, поскольку действие эволюции U, строго говоря, несовместимо с процедурой R и для того, чтобы прикрыть зияющие провалы между описаниями квантового и классического уровней поведения, нам предстоит проделать некоторую деликатную «бумажную работу».

Надо сказать, что за последние годы уже было предпринято несколько попыток построить на основании этих соображений нетрадиционную непротиворечивую теорию. В 1966 году ученые венгерской школы под руководством Карольхази (Будапешт) представили [216] точку зрения, согласно которой реальный физический феномен R-процедуры обусловлен гравитационными эффектами (см. также [227]). Следуя несколько иной линии рассуждения, Филип Перл из Гамильтон-колледжа (Клинтон, шт. Нью-Йорк, США) выдвинул в 1976 году [284] негравитационную теорию, в которой R также фигурировала в качестве реального физического феномена. Позднее, в 1986 году, Джанкарло Гирарди, Альберто Римини и Туллио Вебер предложили новый интересный подход к решению проблемы; подход этот получил весьма положительную оценку самого Джона Белла, вследствие чего не заставили себя ждать

⁵¹ В.Э.: А скорее – наоборот. Разум-то можно объяснить, вообще не вспоминая о квантовой механике. Но когда мы разберемся с работой разума, то яснее станут и многие проблемы физики – в том числе и «проблема измерения». Сам я лично, как уже говорил, не хочу предлагать никаких решений в области физики. Но это не потому, что считаю Веданскую теорию вообще не способной ничего дать физике, а только потому, что не считаю свои личные знания по этим проблемам физики достаточно глубокими, чтобы находить решения. Тут нужен человек, который хорошо владел бы одновременно и физикой, и Веданской теорией. Глубокое понимание работы интеллекта должно отразиться на всё, что интеллектом создается, – а физика тоже создается им.

многочисленные дальнейшие доработки и усовершенствования оригинальной идеи другими исследователями.⁵²

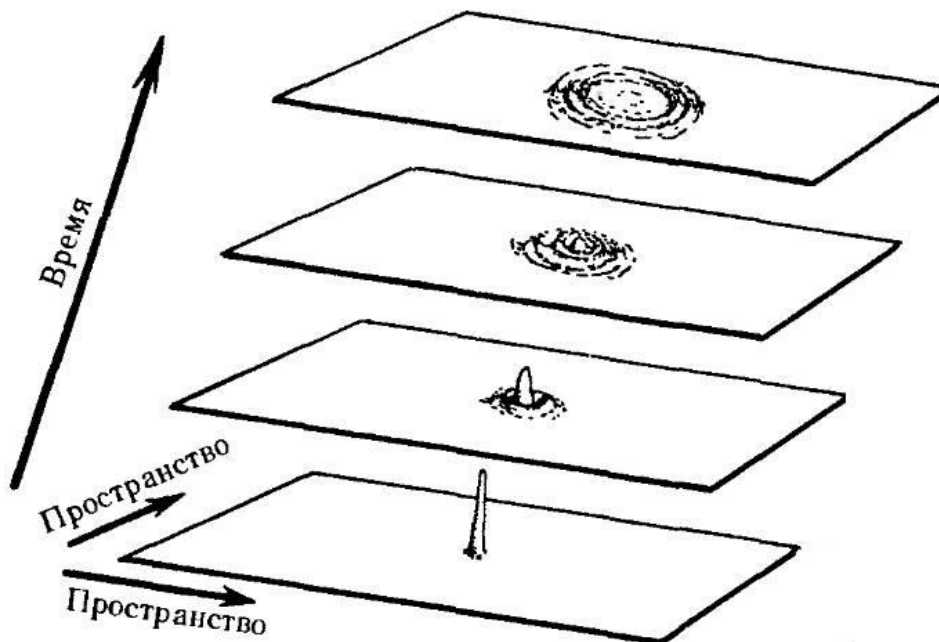


Рис. 6.1. Шрёдингера эволюция волновой функции частицы во времени: первоначально функция плотно локализована в одной точке, а затем распространяется во всех направлениях в пространстве.

Прежде чем мы перейдем в следующих параграфах к изложению моей собственной точки зрения на предмет, немало позаимствовавшей из схемы Гирарди–Римини–Вебера (ГРВ-схемы), будет полезно ознакомиться вкратце с собственно оригиналом. Основная идея состоит в том, что вектор состояния $|\psi\rangle$ предполагается реальным, а U-процедуры – в основном точными. Тогда, согласно уравнению Шрёдингера, волновая функция отдельной, изначально локализованной свободной частицы стремится с течением времени распространиться во всех направлениях в пространстве (см. рис. 6.1). (Вспомним, что волновая функция частицы определяет комплексные весовые коэффициенты для различных возможных местоположений этой самой частицы. Графики на рис. 6.1 мы можем рассматривать как схематические описания поведения вещественных частей этих весовых коэффициентов.) Таким образом, со временем частица становится всё менее и менее локализованной. Новым в ГРВ-схеме является допущение, что существует некоторая очень малая вероятность того, что волновая функция частицы внезапно умножится на функцию с выраженным максимумом (так называемую гауссову функцию) и известным размахом, определяемым некоторым параметром σ . Это событие схематически показано на рис. 6.2. При этом происходит мгновенная локализация волновой функции частицы, после чего функция вновь начинает «расползаться» вширь. Вероятность того, что пик гауссовой функции придется на то или иное конкретное местоположение частицы, пропорциональна квадрату модуля значения ее волновой функции в этой точке. Таким образом постигается совместимость со стандартным «правилом квадратов модулей» квантовой теории.

⁵² Мое собственное предположение безоговорочно принадлежит к «гравитационному» лагерю, хотя сколько-нибудь конкретный вид оно обрело лишь недавно (см. [295] и [300]). С оригинальным предположением Гирарди–Римини–Вебера его объединяет идея о том, что редукция должна представлять собой внезапный, дискретный процесс. Большинство же современных исследователей, вслед за Перлом [284], склонны рассматривать редукцию состояний как процесс непрерывный (стохастический). См. [93], [148] и [303]. Аналогичные рассуждения, но с попыткой сохранения совместимости предлагаемой схемы с теорией относительности, представлены в [149], [151] и [152].

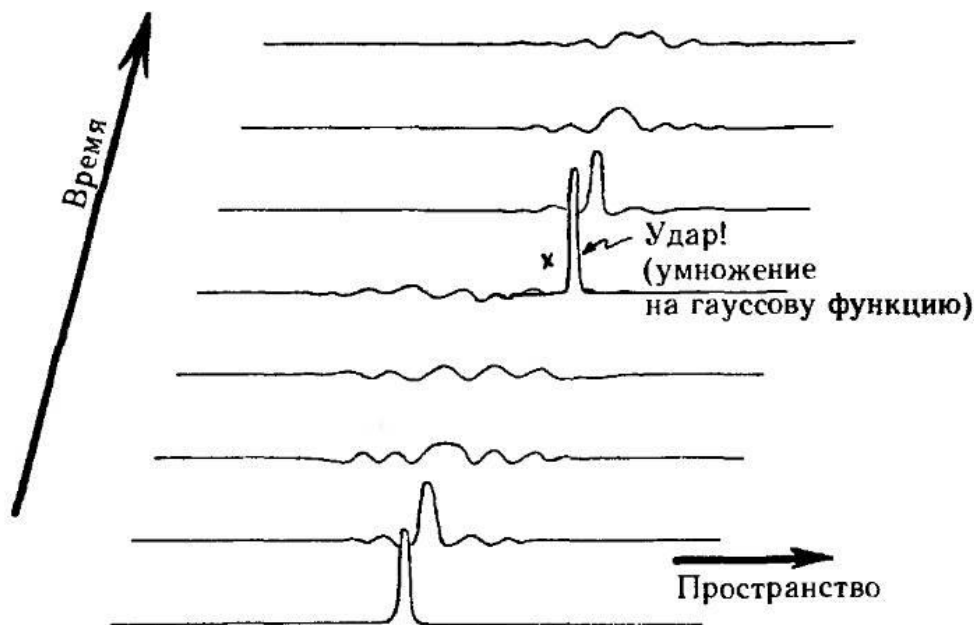


Рис. 6.2. В первоначальной схеме Гиради–Римини–Вебера (ГРВ-схеме) волновая функция большую часть времени эволюционирует согласно стандартной шрёдингеровой U -эволюции, однако приблизительно раз в 10^8 лет (на одну частицу) состояние частицы претерпевает своего рода «удар», при котором волновая функция частицы умножается на гауссову функцию с выраженным максимумом – ГРВ-интерпретация процедуры R .

Как часто происходит подобная процедура? Предполагается, что приблизительно раз в сто миллионов (10^8) лет. Обозначим этот период времени буквой T . Тогда вероятность того, что такая редукция состояния случится с частицей в течение, скажем, одной секунды, составит менее 10^{-15} (поскольку секунд в году около 3×10^7). Таким образом, в случае единичной частицы никто бы ничего и не заметил. А теперь представьте себе, что у нас имеется некий достаточно большой объект, каждая из частиц которого подвергается той же самой процедуре. Если наш объект содержит порядка 10^{25} частиц (примерно столько умещается в небольших размеров мыши), то вероятность того, что какая-либо из его частиц испытает такого рода «удар», чрезвычайно возрастает, и можно ожидать, что удары внутри объекта будут происходить с интервалом приблизительно в 10^{-10} секунд. Каждый такой удар будет воздействовать на состояние объекта в целом, поскольку предполагается, что состояние каждой конкретной частицы, испытавшей удар, сцеплено с состояниями остальных частиц объекта.

Попробуем применить такой подход к шрёдингеровой кошке.⁵³ Этот парадокс – главная, в сущности, X -загадка квантовой теории – возникает, когда макроскопический объект (например, кошка) помещается в квантовую линейную суперпозицию двух очевидно различных состояний, скажем, «кошка жива» и «кошка мертва» (см. также §5.1 и §6.6). В квантовомеханическом смысле в такой суперпозиции ничего необычного нет, однако если рассматривать результирующую ситуацию как феномен окружающего нас с вами реального мира, то она представляется крайне невероятной, – что Шрёдингер неустанно подчеркивал (отдельные « $|\psi\rangle$ -реалисты»), впрочем, Шрёдингеру не поверили и решили отыскать-таки разгадку, обратившись кто к множественности миров, кто к редукции состояния посредством сознания, кто еще куда; см., например, §6.2 и §6.8). Для построения модели шрёдингеровой кошки нам необходимо лишь некое подходящее квантовое событие, вызывающее макроскопический эффект, – по сути, измерение. Например, единичный фотон, испущенный источником и либо отраженный от полупрозрачного зеркала, либо прошедший сквозь него (см. §5.7). Допустим, что пропущенная часть волновой функции фотона вызывает срабатывание детектора, который соединен с неким устройством, убивающим кошку, тогда как отраженная часть минует детектор, и кошка остается жива (см. рис. 6.3). Как и в приведенном выше рассуждении (§6.6) результатом будет сцепленное состояние, одна часть которого включает в себя мертвую кошку, а другая – живую кошку и

⁵³ [334], также см. НРК, с. 290–296 {= [МОИ № 15](#), с.47}.

вылетающий из системы фотон. Обе возможности входят в вектор состояния одновременно до тех пор, пока не произойдет редукция (R). Вот эта вот загадка «измерения» и составляет центральную X-загадку квантовой теории.

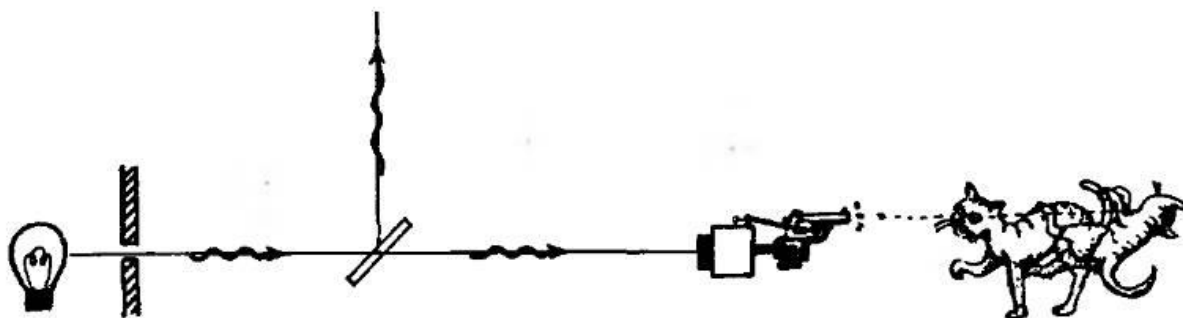


Рис. 6.3. Шрёдингера кошка. Соответствующее квантовое состояние представляет собой линейную суперпозицию отраженного и пропущенного фотона. Пропущенный компонент вызывает срабатывание устройства, которое убивает кошку; иначе говоря, согласно U-эволюции, кошка существует в суперпозиции жизни и смерти. В ГРВ-схеме ситуация разрешается, поскольку составляющие кошку частицы почти мгновенно начинают испытывать «удары», первый же из которых локализует состояние кошки – и кошка оказывается либо жива, либо мертва.

В схеме же ГРВ одна из частиц объекта «кошачьих» размеров (что-то около 10^{27} ядерных частиц) почти мгновенно «ударяется» гауссовой функцией (см. рис. 6.2), и, поскольку состояние любой отдельной частицы сцеплено с состояниями всех остальных частиц кошки, редукция состояния этой частицы «увлекает» за собой всю кошку, каковая тут же оказывается либо живой, либо мертвой. Таким образом разрешается X-загадка шрёдингеровой кошки – и проблемы измерения вообще.

Схема чрезвычайно остроумна, однако страдает некоторой нарочитостью. Нигде больше в физике вы не найдете никаких указаний на подобные процессы, сами же предполагаемые значения T и σ были просто «взяты с потолка», с тем чтобы получить «приемлемые» результаты. (В 1989 году Диози предложил [92] схему, напоминающую схему ГРВ, только параметры T и σ здесь уже связываются с ньютоновской гравитационной постоянной G . С идеями Диози перекликаются те, что будут изложены в следующем параграфе.) Более серьезным возражением против подобного рода схем является то, что они подразумевают нарушение принципа сохранения энергии (пусть и незначительное). Подробнее эту важную проблему мы обсудим в §6.12.

§6.10. Гравитационная редукция вектора состояния

Есть веские причины⁵⁴ подозревать, что модификация квантовой теории – необходимая, если мы намерены выдать ту или иную форму R за реальный физический процесс, – должна самым серьезным образом задействовать эффекты гравитации. Некоторые из этих причин связаны с тем фактом, что сама структура стандартной квантовой теории очень плохо уживается с концепцией искривленного пространства, которая является неотъемлемой частью эйнштейновской теории гравитации. Даже такие понятия, как энергия и время – понятия, участвующие в фундаментальных процедурах квантовой теории, – невозможно точно определить во вполне общем гравитационном контексте, сохранив совместимость с самыми обычными требованиями стандартной квантовой теории. Вспомним также об эффекте «наклона» световых конусов (§4.4), уникальном свойстве физического феномена гравитации. Можно, таким образом, предположить, что ожидаемая модификация основных принципов квантовой теории явится результатом ее закономерного (и окончательного) объединения с общей теорией относительности Эйнштейна.

⁵⁴ Эти причины я уже изложил весьма подробно в НРК (главы 7 и 8 {= [МОИ № 16](#)}) и не вижу необходимости повторять свои рассуждения здесь. Достаточно будет сказать, что все они до сих пор остаются в силе – хотя критерий редукции из §6.12 существенно отличается от того, что был представлен в НРК (на с. 367–371).

Впрочем, большинство физиков, похоже, не склонны допускать возможность того, что для обеспечения успеха подобного союза модификации следует подвергнуть именно квантовую теорию. Модификации, по их мнению, требует сама теория Эйнштейна. Они указывают (и, надо сказать, не без оснований) на то, что в классической общей теории относительности хватает и своих проблем, поскольку она предполагает существование пространственно-временных сингулярностей – таких, например, как черные дыры и собственно Большой Взрыв, – где кривизна пространства достигает бесконечности, а сами понятия пространства и времени вообще теряют смысл (см. НРК, гл. 7 {= [МОИ № 16](#)}). Я несколько не сомневаюсь, что в процессе слияния двух теорий нам предстоит модифицировать и общую теорию относительности. Равно как не вызывает сомнения и то, что такая модификация поможет нам лучше понять, что же в действительности происходит в тех областях, которые мы сегодня называем «сингулярностями». Но это отнюдь не освобождает квантовую теорию от необходимости пересмотра. В §4.5 {= [МОИ № 17](#)} мы могли убедиться, что общая теория относительности исключительно точна – ничуть не менее точна, чем та же квантовая теория. Когда мы, наконец, сумеем должным образом эти две теории объединить, большая часть физических основ как теории Эйнштейна, так и квантовой теории непременно войдет в полученную в результате общую теорию, причем в неизменном виде.

Тем не менее, многие из тех, кто мог бы, в принципе, с вышесказанным согласиться, всё не понимают: соответствующие масштабы длины, в которых способна действовать какая бы то ни было форма квантовой гравитации, совершенно не годятся для решения проблемы квантового измерения. В самом деле, масштаб длины, характерный для квантовой гравитации (так называемая планковская длина), составляет 10^{-33} см, что даже меньше (где-то на 20 порядков) диаметра ядерной частицы. Нас строго спрашивают, каким же это таким образом физические взаимодействия на столь крохотных расстояниях могут пролить свет на проблему измерения, которая как-никак имеет дело с феноменами уровня, пограничного (по меньшей мере) с макроскопическим. Все эти вопросы и возражения вызваны только и исключительно неверным пониманием применения идеи квантовой гравитации к данному случаю. Масштаб 10^{-33} см имеет к проблеме квантового измерения самое непосредственное отношение, но не в том смысле, какой первым делом приходит в голову.

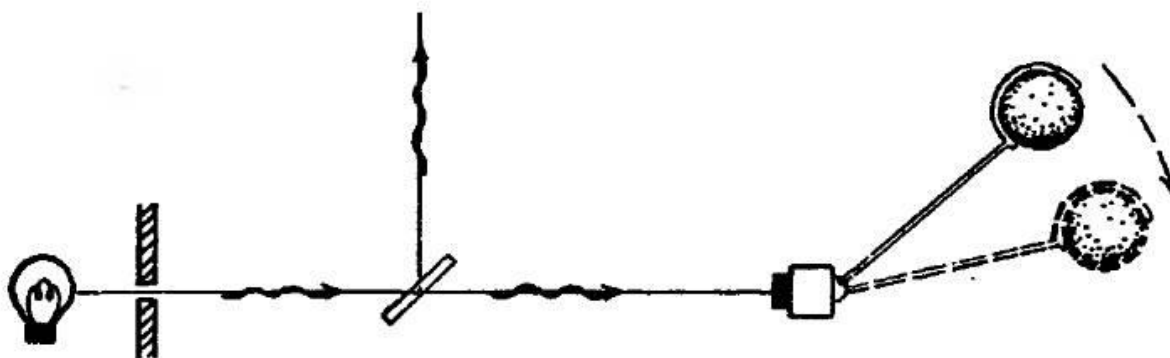


Рис. 6.4. Оставив в покое кошку, выберем в качестве предмета измерения движение сферического макроскопического объекта. Насколько велик или массивен должен быть объект, или насколько далеко он должен переместиться для того, чтобы произошла редукция R?

Рассмотрим ситуацию, аналогичную той, в какой оказалась шрёдингерова кошка, – аналогичную тем, что здесь мы также попытаемся получить состояние линейной суперпозиции двух макроскопически различимых альтернатив. Пример такой ситуации представлен на рис. 6.4: фотон падает на полупрозрачное зеркало и оказывается в результате в состоянии линейной суперпозиции пропущенного и отраженного состояний. Пропущенная часть волновой функции фотона активирует (или способна активировать) устройство, которое перемещает некий макроскопический массивный сферический объект (не кошку) из одного пространственного положения в другое. До тех пор, пока действует шрёдингерова эволюция U, «местоположение» объекта определяется квантовой суперпозицией состояний «объект на прежнем месте» и «объект переместился на новое место». Как только в действие вступает редукция R, рассматриваемая как реальный физический процесс, объект скачкообразно занимает либо одно положение, либо

другое – т.е. происходит собственно «измерение». Идея заключается в том, что, как и в ГРВ-теории, процесс этот является целиком и полностью объективным и физическим и происходит всякий раз, когда масса объекта (или расстояние, на которое он перемещается) достигает достаточной величины. (В частности, этот процесс никоим образом не зависит от того, «воспринимает» ли перемещение объекта или отсутствие такового некое случайно оказавшееся поблизости обладающее сознанием существо.) Допустим, что устройство, которое регистрирует прибытие фотона и перемещает объект, само по себе достаточно мало и может рассматриваться исключительно квантовомеханически, а измерению подвергается только лишь сферический массивный объект. В крайнем случае, мы можем просто-напросто вообразить, что объект установлен настолько неустойчиво, что силы удара одного-единственного фотона вполне достаточно для того, чтобы вызвать значительное его смещение.

Применив стандартные U-процедуры квантовой механики, находим, что состояние фотона после его столкновения с зеркалом складывается из двух компонентов в очень разных положениях. Один из компонентов оказывается далее сцеплен с устройством и в конечном счете со сферическим объектом, т.е. получаем квантовое состояние, представляющее собой линейную суперпозицию двух различных местоположений объекта. Объект имеет собственное гравитационное поле, которое также следует учесть в этой суперпозиции. Таким образом, в состоянии добавляется суперпозиция двух различных гравитационных полей. Согласно теории Эйнштейна, отсюда следует, что наша суперпозиция охватывает две различные пространственно-временные геометрии! Закономерно возникает вопрос: существует ли точка, в которой эти две геометрии расходятся настолько, что становятся неприменимыми правила квантовой механики, в результате чего Природа прекращает «укладывать» в суперпозицию две разные геометрии и выбирает из них какую-то одну – т.е. физически осуществляет некую R-подобную процедуру редукции?

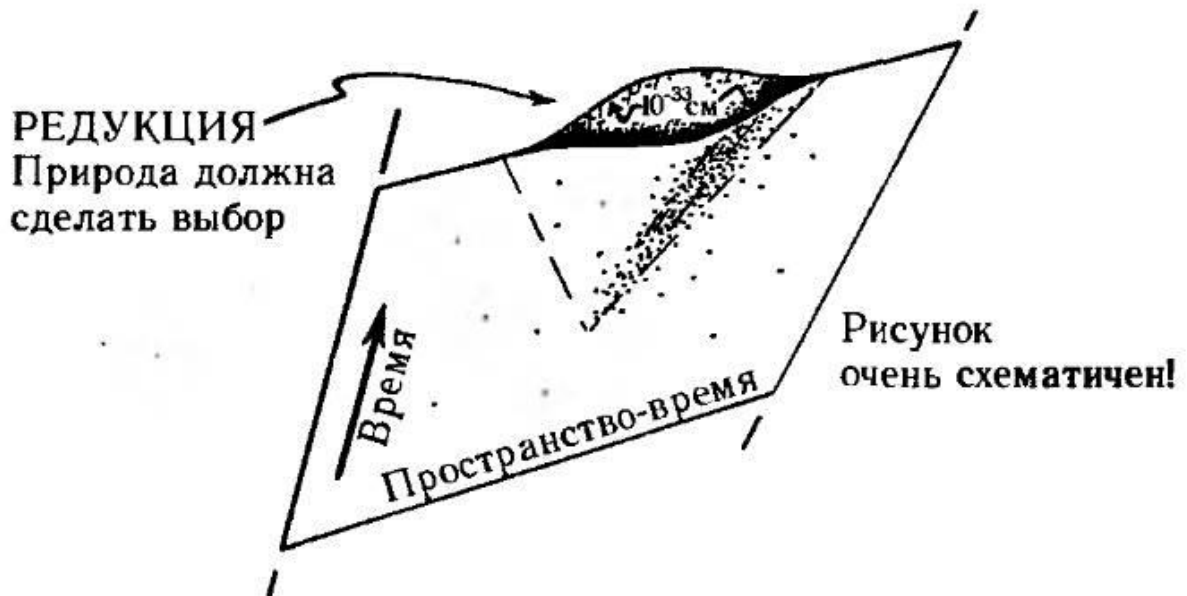


Рис. 6.5. Планковская длина 10^{-33} см и редукция квантового состояния. Идея заключается примерно в следующем: редукция происходит тогда, когда разница между состояниями в суперпозиции подразумевает перемещение достаточно большой массы на достаточно большое расстояние (такой массы и на такое расстояние, что различие между соответствующими пространствами-временами составляет величину порядка 10^{-33} см).

Дело в том, что мы не имеем ни малейшего понятия, как поступать с линейными суперпозициями состояний в тех случаях, когда эти самые состояния включают в себя различные пространственно-временные геометрии. На этот счет «стандартная теория» может порадовать нас лишь фундаментальным пробелом: в случае существенного различия между пространственно-временными геометриями мы не располагаем никакими абсолютными средствами, позволяющими сопоставить точку одной геометрии какой-либо определенной точке другой (поскольку эти геометрии представляют собой строго разделенные пространства), в связи с чем сама идея

возможности построения суперпозиции материальных состояний в таких отдельных пространствах представляется крайне сомнительной.

Осталось только выяснить, когда же две геометрии становятся «существенно различными». Вот тут-то на сцену и выходит планковская длина 10^{-33} см. Рассуждение выглядит приблизительно так: для того, чтобы произошла редукция, масштаб различия между этими геометриями должен составлять, в некотором подходящем смысле, величину порядка 10^{-33} см или более. Можно попробовать, например, представить себе (см. рис. 6.5), что две различные геометрии стремятся, как правило, слиться в одну, однако когда мера их различия становится для такого масштаба слишком велика, происходит редукция R – и вместо того, чтобы поддерживать суперпозицию, предполагаемую эволюцией U , Природа вынуждена выбирать какую-то одну из имеющихся геометрий.

Какой масштаб массы (или расстояния, на которое переместится объект) соответствует столь малому изменению в геометрии пространства-времени? Вообще говоря, именно благодаря малости гравитационных эффектов масштаб этот оказывается величиной довольно-таки значительной и вполне годится на роль демаркационной линии между квантовым и классическим уровнями. Для придания картине большей наглядности, необходимо еще сказать несколько слов о так называемых абсолютных (или планковских) единицах.

§6.11. Абсолютные единицы

Идея (первоначально⁵⁵ предложенная Максом Планком (1906) [308] и доведенная до блеска Джоном А. Уилером (1975) [383]) заключается в том, что три наиболее фундаментальные постоянные Вселенной – скорость света c , постоянная Планка (разделенная на 2π) \hbar и ньютоновская гравитационная постоянная G – используются в качестве единиц для преобразования всех физических мер в чистые (безразмерные) числа. Для этого единицы длины, массы и времени необходимо выбрать таким образом, чтобы каждая из трех вышеупомянутых постоянных стала равна единице:

$$c = 1, \hbar = 1, G = 1.$$

Планковская длина 10^{-33} см, которая в обычных единицах выражается в виде $(G\hbar/c^3)^{1/2}$, принимает при этом простое значение 1 и оказывается, таким образом, абсолютной единицей длины. Соответствующая единица времени, т.е. время, за которое свет пройдет расстояние, равное планковской длине, называется планковским временем $((G\hbar/c^5)^{1/2})$ и равна приблизительно 10^{-43} секунд. Существует также абсолютная единица массы, так называемая планковская масса $((\hbar c/G)^{1/2})$, равная 2×10^{-5} г – масса, чрезвычайно большая с точки зрения масштаба обычных квантовых феноменов, однако весьма незначительная в нашем повседневном понимании – примерно столько весит блоха.

Понятно, что в классическом мире единицы эти не очень удобны – за исключением, разве что, планковской массы, – однако они оказываются как нельзя более полезными при рассмотрении эффектов, предположительно связанных с квантовой гравитацией. Ниже приведены некоторые из наиболее значимых физических величин, выраженные в абсолютных единицах (очень приблизительно):

секунда	$= 1,9 \times 10^{43}$
сутки	$= 1,6 \times 10^{48}$
год	$= 5,9 \times 10^{50}$
метр	$= 6,3 \times 10^{34}$
сантиметр	$= 6,3 \times 10^{32}$
микрон	$= 6,3 \times 10^{28}$
ферми («радиус сильного взаимодействия»)	$= 6,3 \times 10^{19}$
масса нуклона	$= 7,8 \times 10^{-20}$
грамм	$= 4,7 \times 10^4$
эрг	$= 5,2 \times 10^{-17}$
кельвин	$= 4 \times 10^{-33}$
плотность воды	$= 1,9 \times 10^{-94}$.

⁵⁵ Двадцатью пятью годами раньше очень похожую идею выдвинул ирландский физик Джордж Джонстон Стоуни [362]; правда, в качестве одной из основных единиц он выбрал не постоянную Планка (о существовании которой тогда никто и не подозревал), а заряд электрона. (На это мое упущение мне указал Джон Барроу, за что я ему чрезвычайно благодарен.)

§6.12. Новый критерий

В этом параграфе я сформулирую новый критерий⁵⁶ гравитационной редукции вектора состояния, существенно отличный от того, что был предложен в НРК, но близкий к некоторым идеям, высказанным в последнее время Диози и другими учеными. Причины, побудившие меня к поискам связи между R-процедурой и гравитацией, остаются в силе, однако моя теперешняя гипотеза получила с тех пор дополнительную теоретическую поддержку с другой стороны. Более того, мне удалось избавиться от некоторых концептуальных проблем, присущих прежнему варианту, и сделать его более удобным для применения. В НРК я предлагал отыскивать критерий, который позволял бы определить, когда два состояния (каждое со своим гравитационным полем – т.е. пространством-временем) оказываются слишком различными для того, чтобы продолжать сосуществовать в квантовой линейной суперпозиции. Соответственно, на этом этапе должна была происходить редукция R. Нынешняя идея несколько отличается от прежней. Мы больше не ищем некую абсолютную меру гравитационной разницы между состояниями, чтобы выяснить с ее помощью, в какой момент состояния разойдутся настолько, что суперпозиция станет невозможна. Вместо этого, мы рассматриваем суперпозицию сколь угодно разных состояний как нестабильную – в том смысле, в каком нестабильно, например, ядро урана – и вводим величину скорости редукции вектора состояния, каковая скорость определяется как раз степенью разности состояний. Чем больше разность, тем выше скорость редукции.

Для наглядности применим новый критерий сначала к конкретной ситуации, описанной в §6.10, хотя его несложно обобщить и на многие другие случаи. Нас, в частности, интересует энергия, необходимая в упомянутой ситуации для того, чтобы сдвинуть одну копию объекта относительно другой, с учетом лишь гравитационных эффектов. Итак, мы представляем себе, что два объекта (две массы) первоначально занимают один и тот же объем пространства (см. рис. 6.6); затем одна копия объекта начинает медленно удаляться от другой, уменьшая по мере движения степень взаимопроникновения, пока, наконец, не произойдет полное их разделение, т.е., в контексте рассматриваемой ситуации, пока не будет достигнута суперпозиция состояний. Взяв величину, обратную затраченной на эту операцию гравитационной энергии (в абсолютных единицах)⁵⁷, мы получим приближенное время (также в абсолютных единицах), по истечении которого произойдет редукция состояния, в результате которой объект из состояния суперпозиции самопроизвольно и скачкообразно перейдет в то или иное локализованное состояние.

Если в качестве объекта был выбран шар с массой m и радиусом a , то для энергии мы получим величину порядка m^2/a . Вообще говоря, действительное значение энергии зависит еще и от того, на какое расстояние перемещается объект, однако в данном случае это расстояние очень незначительно, поскольку в окончательной конфигурации две копии объекта расходятся лишь настолько, чтобы не перекрывать друг друга. Дополнительная энергия, необходимая для перемещения объекта от точки касания на любое расстояние (вплоть до бесконечности), есть величина того же порядка (коэффициент $5/7$), что и энергия, затрачиваемая на перемещение от

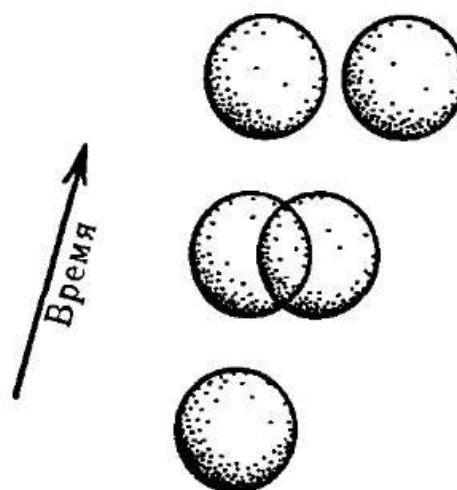


Рис. 6.6. Для того чтобы найти время редукции \hbar/E , представим себе объект в виде двух расходящихся копий и вычислим энергию E , затрачиваемую на такое расхождение, учитывая лишь гравитационное притяжение объектов.

⁵⁶ См. также [92], [147] и [295].

⁵⁷ Ничто, впрочем, не мешает нам выразить время редукции в более привычных, нежели введенные выше абсолютные, единицах. В этом случае время редукции определяется просто как \hbar/E , где E – всё та же гравитационная энергия разделения, а \hbar – единственная постоянная, которая нам понадобится. То обстоятельство, что в выражении никак не участвует скорость света c , наводит на мысль о целесообразности рассмотрения теории «ньютоновской» модели такого рода (см., напр., [50]).

полного взаимопокрытия до точки касания. Таким образом, пока нас интересует лишь порядок величины; вкладом в общую энергию, вносимым расхождением копий объекта уже после разделения, можно пренебречь, коль скоро разделение (по большей части) таки состоялось. Согласно такой схеме, время редукции составит величину порядка

$$\frac{a}{m^2}$$

(в абсолютных единицах) или, очень приближенно,

$$\frac{1}{20\rho^2 a^5},$$

где ρ – плотность объекта. То есть в случае объекта обычной плотности (скажем, капли воды) время редукции примерно равно $10^{186}/a^5$.

В определенных простых ситуациях эта схема дает вполне «приемлемые» значения. Возьмем, например, нуклон (протон или нейтрон): если a – это «радиус сильного взаимодействия» 10^{-13} см, что в абсолютных единицах составляет почти 10^{20} , а масса m приблизительно равна 10^{19} , то время редукции будет что-то около 10^{58} , т.е. более десяти миллионов лет. То, что это время велико, обнадеживает, поскольку на отдельных нейтронах эффекты квантовой интерференции наблюдались экспериментально.⁵⁸ Получи мы очень малое время редукции, наши рассуждения вошли бы в противоречие с результатами этих наблюдений.

Объекты более «макроскопические», скажем, мельчайшие водяные капли радиуса 10^{-5} см, дадут время редукции порядка нескольких часов. Если увеличить радиус до 10^{-4} см (1 микрон), то время редукции уменьшится до приблизительно двенадцатой доли секунды; при радиусе 10^{-3} см время редукции составит менее одной миллионной секунды. В общем случае, при рассмотрении объекта в суперпозиции двух пространственно разделенных состояний мы просто определяем, какую энергию необходимо затратить на такое разделение, учитывая при этом лишь гравитационное взаимодействие между двумя «участниками» суперпозиции. Величина, обратная этой энергии, представляет собой нечто вроде «периода полураспада» суперпозиции состояний. Чем больше энергия, тем меньше время, в течение которого может существовать суперпозиция.

В реальной экспериментальной ситуации чрезвычайно сложно добиться того, чтобы объекты в квантовой суперпозиции не оказывали возмущающего воздействия на вещество окружения (образуя тем самым сцепленное с ним состояние), вследствие чего приходится учитывать и гравитационные эффекты, связанные с окружением. Такая необходимость возникает даже в тех случаях, когда возмущение не вызывает значительного макроскопического перемещения масс в окружении. Существенными могут оказаться даже самые незначительные перемещения отдельных частиц – хотя здесь для редукции обычно требуются несколько бóльшие общие массы, нежели в случае перемещения макроскопического «объекта».

Для того, чтобы наглядно продемонстрировать, какой эффект возмущение такого рода может оказать на предлагаемую схему, заменим перемещающее устройство в вышеописанной идеализированной экспериментальной ситуации неким объемом жидкости, которая просто-напросто поглощает фотон, если тот ухитрится пройти сквозь зеркало (см. рис. 6.7), так что теперь роль «окружения» отводится уже самому объекту. Вместо линейной суперпозиции двух состояний, различных на макроскопическом уровне в силу того, что одна копия объекта вся целиком перемещается относительно другой, мы теперь рассматриваем всего лишь различие между двумя конфигурациями взаимного расположения атомов, причем смещение одной конфигурации относительно другой носит случайный характер. Можно ожидать, что для объема обычной жидкости радиуса a мы получим время редукции порядка $10^{130}/a^3$ (точная величина будет зависеть до некоторой степени от первоначальных допущений), что существенно отличается от $10^{186}/a^5$, времени редукции в опыте со взаимным перемещением объектов. То есть редукция в случае перемещения объектов целиком требует меньших масс, нежели редукция в случае возмущения атомных конфигураций. Тем не менее, в соответствии с нашей схемой редукция произойдет и здесь, при полном отсутствии какого бы то ни было макроскопического движения.

⁵⁸ См. [392].

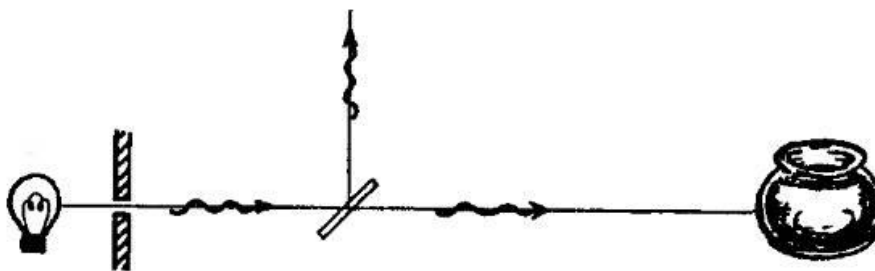


Рис. 6.7. Предположим, что пропущенный сквозь зеркало фотон не перемещает сферический объект, а всего лишь поглощается неким объемом жидкости.

В §5.8 при обсуждении квантовой интерференции мы рассматривали экспериментальную установку с материальным препятствием, перехватывающим фотонный луч. Простого поглощения – или даже потенциальной возможности поглощения – фотона таким препятствием вполне достаточно для редукции R , несмотря на то, что при этом не происходит ничего макроскопического, что можно было бы реально наблюдать. Иначе говоря, достаточно сильное возмущение окружения, сцепленного с рассматриваемой системой, само по себе способно вызвать R , что отсылает нас к более традиционным FAPP-процедурам.

В самом деле, практически любой реальный процесс измерения почти наверняка сопровождается возмущением большого количества микроскопических частиц окружения. Согласно выдвигаемым здесь предположениям, часто доминантным эффектом оказывается именно это возмущение, а вовсе не макроскопическое движение массивных объектов, как в описанной выше ситуации с перемещением шара. Если эксперимент не подразумевает особо тщательного контроля за окружением, любое макроскопическое перемещение макроскопического же объекта весьма существенно возмущает окружающую среду, и вполне возможно, что именно время редукции окружения – величина порядка $10^{130}/b^3$, где буквой b обозначен радиус области окружения, сцепленной с рассматриваемым объектом (плотность окружения принимается равной плотности воды) – оказывается в данном случае доминирующим (т.е. гораздо меньшим, нежели время редукции $10^{186}/a^5$, характерное для собственно объекта). Например, если радиус b возмущенного окружения составляет всего лишь десятую долю миллиметра, то только по одной этой причине время редукции сократится до миллионной доли секунды.

Такая картина во многом близка к традиционному описанию, о котором мы говорили в §6.6, однако теперь у нас имеется вполне определенный критерий, позволяющий точно сказать, когда действительно происходит редукция в данном окружении. Вспомним возражения, высказанные в §6.6 против допущения, что традиционный FAPP-подход адекватно описывает действительную физическую реальность. С введением такого критерия эти возражения больше не имеют силы. Как только окружение подвергается достаточно сильному возмущению, в этом окружении очень быстро происходит (действительно происходит) редукция – каковая редукция незамедлительно сопровождается редукцией в любом «измерительном устройстве», с каким окружение на тот момент сцеплено. Редукция эта принципиально необратима, и восстановить первоначальное сцепленное состояние невозможно, какие бы сногшибательные достижения технического прогресса мы себе ни вообразили. Соответственно, не возникает и противоречия с тем, что реальные измерительные устройства неизменно регистрируют либо ДА, либо НЕТ – в предлагаемой картине они делают в точности то же самое.

Мне думается, что подобного рода описание может оказаться весьма полезным при изучении различных биологических процессов; в частности, с его помощью можно вполне правдоподобно объяснить, почему биологические структуры размерами много меньше микрона часто способны на самое что ни на есть классическое поведение. Поскольку биологическая система очень тесно сцеплена со своим окружением описанным выше образом, ее собственное состояние непрерывно подвергается редукции вследствие столь же непрерывной редукции этого самого окружения. С другой стороны, можно предположить, что по какой-то причине биологическая система может «предпочесть», чтобы в тех или иных обстоятельствах ее состояние не редуцировалось в течение некоторого длительного промежутка времени. В этом случае системе необходимо найти какой-нибудь эффективный способ изоляции от окружающего ее вещества. К этим соображениям мы в дальнейшем еще вернемся (§7.5).

Следует особо подчеркнуть, что энергия, определяющая время существования суперпозиции состояний, представляет собой разницу энергий, а не общую (массу-)энергию всей системы как целого. Таким образом, в тех случаях, когда перемещаемый объект хотя и велик, но передвигается на небольшое расстояние (и если он к тому же обладает еще и кристаллической структурой, т.е. составляющие его отдельные атомы не склонны к случайным блужданиям), квантовые суперпозиции могут сохраняться в течение довольно долгого времени. Такой объект может быть гораздо больше, чем рассматриваемые выше водяные капли. Поблизости вполне «безнаказанно» могут находиться и другие, гораздо бóльшие массы – при условии, что они не сцеплены сколько-нибудь существенно с нашей суперпозицией состояний. (Эти соображения играют важную роль при конструировании различных твердотельных устройств, таких, например, как гравитационные детекторы, в которых используются когерентно осциллирующие твердые – иногда кристаллические – тела.⁵⁹)

До сих пор порядки величин выглядят вполне правдоподобно, однако этого, очевидно, недостаточно – необходимо выяснить, выдержит ли идея более суровую проверку. Решающим доказательством могло бы послужить отыскание экспериментальных ситуаций, в которых возникают, в соответствии с предсказаниями стандартной теории, эффекты, обусловленные макроскопическими квантовыми суперпозициями, но на уровне, на котором, согласно высказанным выше предположениям, такие суперпозиции не могут существовать в течение сколько-нибудь длительного времени. Если в таких ситуациях наблюдение подтвердит традиционные квантовые предположения, то от выдвигаемых мною здесь идей придется отказаться – или, по крайней мере, серьезно их пересмотреть. Если же наблюдение установит, что суперпозиции не сохраняются, то эти идеи получат некоторое достоверное подтверждение. К сожалению, на данный момент я не располагаю сведениями о каких-либо практических предложениях о проведении соответствующих экспериментов. Многообещающие возможности для такого рода экспериментирования предоставляют сверхпроводники и такие устройства, как СКВИДы (сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики, в основе действия которых лежат макроскопические квантовые суперпозиции, возникающие в сверхпроводниках); см. [235]. Впрочем, прежде чем приступать непосредственно к экспериментам со сверхпроводниками, предлагаемые идеи следует тщательно доработать. Суперпозиции состояний в сверхпроводнике отличаются очень незначительным смещением масс. Вместо этого здесь имеет место весьма существенное изменение импульса, каковая ситуация требует дополнительного теоретического исследования.

Необходимость в некоторой переформулировке вышеизложенной схемы возникает даже в случае простого опыта с камерой Вильсона – иначе, конденсационной камерой, присутствие заряженной частицы в которой сопровождается конденсацией крошечных капель из окружающего частицу пара. Предположим, что заряженная частица находится в квантовом состоянии, представляющем собой линейную суперпозицию состояний «частица находится где-то внутри камеры Вильсона» и «частица находится вне камеры». «Внутренняя» часть вектора состояния частицы инициирует образование капли жидкости, в то время как та часть, согласно которой частица находится снаружи камеры, ничего подобного не делает – т.е. состояние частицы теперь можно рассматривать как суперпозицию двух макроскопически различных состояний. В одном из этих состояний из пара в камере конденсируется капля, в другом – заполняющий камеру пар остается однородным. Нам же предстоит оценить гравитационную энергию, необходимую для перемещения молекул пара в каждом из образующих суперпозицию состояний. Тут, однако, возникает дополнительное осложнение: следует учесть еще и разницу между собственной гравитационной энергией капли и собственной гравитационной энергией неконденсированного пара. Для корректного описания таких ситуаций необходима иная формулировка предложенного выше критерия. Возможно, здесь следует рассматривать собственную гравитационную энергию того распределения масс, которое представляет собой разницу между распределениями масс в двух альтернативных состояниях данной квантовой линейной суперпозиции. Таким образом, ожидаемое время редукции будет определяться величиной, обратной этой собственной энергии (см. [300]). В сущности, такая альтернативная формулировка дает в точности тот же результат, что мы уже получили в предыдущих ситуациях, разве что в случае камеры Вильсона время редукции оказывается несколько иным (меньшим). Более того, существуют различные альтернативные общие схемы для определения времени редукции, которые в определенных

⁵⁹ См. [379], [39].

ситуациях дают различные значения этого самого времени, но которые, тем не менее, вполне согласуются между собой в случае простой суперпозиции двух состояний перемещаемого целиком объекта (см. пример в начале этого параграфа). Первая такая схема была предложена Диози [92] (на некоторые ее недостатки указали Гиранди, Грасси и Римини [147]); они же предложили способ устранения этих недостатков). В последующих главах мы не станем останавливаться на различиях между теми или иными конкретными вариантами, но будем говорить в общем о «предположении (или критерии) из §6.12».

Для чего же нам понадобилось вводить такой особый критерий для «времени редукции»? Мои собственные первоначальные обоснования (см. [295]) носили чересчур специальный характер, чтобы их здесь воспроизводить, и вообще были не очень убедительны и неполны.⁶⁰ Чуть ниже я приведу независимые аргументы в подтверждение уместности соответствующей физической схемы. Хотя в существующем виде эта аргументация также не совсем полна, она, по всей видимости, всё же имеет в своей основе некое мощное требование непротиворечивости, которое дает дополнительное подтверждение предположению о том, что редукция состояний должна, в конечном счете, представлять собой гравитационный феномен, в общем и целом укладывающийся в рамки предлагаемого здесь описания.

О проблеме с сохранением энергии в схемах ГРВ-типа мы уже упоминали в §6.9. «Удары», которым подвергаются частицы (когда их волновые функции самопроизвольно умножаются на гауссову функцию), влекут за собой незначительные нарушения закона сохранения энергии. Более того, передача энергии носит, по всей видимости, нелокальный характер. Это, похоже, является характерной – и, вероятно, неизбежной – особенностью общих теорий такого рода, в которых R-процедура считается реальным физическим эффектом. Мне представляется, что эта особенность может послужить убедительным дополнительным свидетельством в пользу теорий, отводящих ключевую роль в редукции гравитационным эффектам, – поскольку в общей теории относительности сохранение энергии всегда было предметом тонким и даже скользким. Гравитационное поле содержит в себе энергию, которая вносит вполне измеримый вклад в общую энергию (и, стало быть, согласно эйнштейновскому $E = mc^2$, массу) системы. С другой стороны, эта энергия представляет собой некую эфемерную субстанцию, существующую в пустом пространстве каким-то загадочным нелокальным образом.⁶¹ Вспомним, в частности, о массе-энергии, что в виде гравитационных волн излучается системой двойного пульсара PSR 1913+16 (см. §4.5 {= МОИ № 17}); эти волны суть рябь в самой структуре пустого пространства. Энергия, содержащаяся в полях взаимного притяжения двух нейтронных звезд, также является важной составляющей их динамики, каковую составляющую мы не можем игнорировать. Как раз такая разновидность энергии, «обитающая» в пустом пространстве, и является самой неуловимой из всех. Ее нельзя получить простым «сложением» локальных вкладов плотности энергии, ее даже нельзя локализовать в какой-либо конкретной области пространства-времени (см. НРК, с. 220–221). Возникает искушение соотнести столь же скользкие проблемы нелокальной энергии R-процедуры с аналогичными проблемами классической гравитации – сопоставить одни проблемы с другими в надежде разглядеть за ними логически связную общую картину.

Обеспечивают ли такую логическую связность выдвигаемые мною здесь предположения? Думаю, что со временем мы от них этого непременно добьемся, однако на настоящий момент четкой теоретической основы у нас пока нет. Всё, впрочем, говорит за то, что в принципе эта грандиозная задача вполне решаема. В самом деле, как мы уже отмечали ранее, процесс редукции можно сравнить с распадом нестабильной частицы или ядра атома. Представьте себе суперпозицию состояний объекта в двух различных положениях как своего рода нестабильное ядро, распадающееся по истечении некоего характеристического времени «полураспада» на какие-то более стабильные продукты. Аналогичным образом суперпозиция положений объекта – нестабильное квантовое состояние – переходит по истечении некоего характеристического «времени жизни» (определяемого, в грубом приближении, величиной, обратной гравитационной энергии разделения) в состояние стабильное, когда объект оказывается либо в одном положении, либо в другом, что дает нам две возможные формы распада.

⁶⁰ Впрочем, похоже, что предложенный здесь критерий отвечает общим требованиям, изложенным в НРК (глава 7), гораздо лучше (как я, собственно, и предполагал в [295]), нежели сформулированный всё в том же НРК «одногравитонный критерий». Для того, чтобы составить об этом соответствии более конкретное представление, необходимы дополнительные исследования.

⁶¹ См. [293]; а также НРК, с. 220–221.

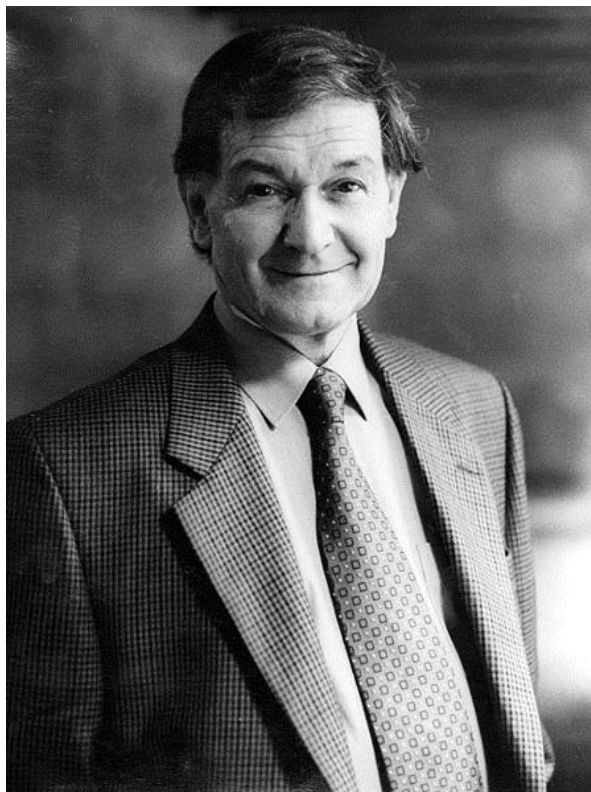
Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, время жизни (или период полураспада) частицы или ядра атома обратно незначительной неопределенности в массе-энергии исходной частицы. (Например, массу нестабильного ядра полония-210, испускающего в процессе распада α -частицу и превращающегося в свинец, точно определить невозможно, при этом неопределенность имеет порядок величины, обратной периоду полураспада – в данном случае, около 138 суток, что дает для полония неопределенность массы всего лишь около 10^{-34} общей массы ядра! Для отдельных нестабильных частиц, впрочем, неопределенность составляет существенно бóльшую долю массы.) Таким образом, «распад», сопровождающий процесс редукции, также должен предполагать существенную неопределенность энергии исходного состояния. Эта неопределенность, согласно настоящему предположению, обусловлена, по большей части, неопределенностью собственной гравитационной энергии суперпозиции состояний. Собственная же гравитационная энергия включает в себя ту самую эфемерную нелокальную энергию поля, которая уже послужила причиной стольких неприятностей в общей теории относительности и которую нельзя получить простым сложением локальных вкладов плотности энергии. Кроме того, имеется тут и существенная неопределенность в сопоставлении друг другу точек различных пространственно-временных геометрий в суперпозиции, что мы отмечали в §6.10. Если допустить, что существенная «неопределенность» энергии состояний в суперпозиции представлена именно этим гравитационным вкладом, то результат такого допущения вполне согласуется с предсказанным выше временем жизни этого состояния. Таким образом, предлагаемая мною схема позволяет, по всей видимости, убедиться в наличии четкой связи между двумя энергетическими проблемами и по крайней мере обещает возможность построения на основе этих идей вполне непротиворечивой теории.

Наконец, остаются еще два важных вопроса, представляющие для нас в рамках настоящего исследования особый интерес. Первый: каким образом подобные соображения могут помочь нам понять принципы функционирования мозга? И второй: есть ли основания (физические) ожидать, что такому гравитационно индуцированному процессу редукции окажется свойственна невычислимость (некоего соответствующего вида)? В следующей главе мы увидим, что тут открываются кое-какие весьма захватывающие возможности.

(Продолжение в файле {PENRS4})

Файл PENRS4

<http://vekordija.narod.ru/R-PENRS4.PDF>



Роджер Пенроуз

Роджер Пенроуз. «Тени разума»

(Продолжение; предыдущее в файле {PENRS3})

Глава 7. Квантовая теория и мозг

§7.1. Макроскопическая квантовая процедура в работе мозга

Согласно общепринятой точке зрения, понимание (истинное или кажущееся) работы мозга следует искать в рамках классической физики. Считается, что передаваемые по нервам сигналы суть феномены типа «есть или нет», точно так же, как токи в электронных цепях компьютера – они либо есть, либо их нет, здесь не бывает тех таинственных суперпозиций альтернативных вариантов, что характерны для квантовой физики. Хотя на фундаментальном уровне квантовые эффекты, вероятно, играют определенную роль, биологи в большинстве своем придерживаются мнения, что при рассмотрении макроскопических следствий примитивных квантовых закономерностей необходимости выходить за классические рамки нет. Химические силы, управляющие межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, и впрямь имеют квантовомеханическое происхождение, и именно химические взаимодействия определяют по большей части поведение нейромедиаторов, передающих сигналы от одного нейрона к другому через узкие промежутки между ними (так называемые синаптические щели). Аналогичным образом, потенциалы действия, физически контролирующие передачу нервных импульсов, имеют предположительно квантовомеханическую природу. И всё же мы, как правило, допускаем, что и поведение отдельных нейронов, и их взаимодействие вполне адекватно моделируются классическими средствами. Соответственно, широко распространено мнение, что модель физической деятельности мозга как целого следует строить по классическим «правилам», не обращая особого внимания на тонкие и загадочные эффекты квантовой физики.

Отсюда непосредственно следует, что с точки зрения наблюдателя любой существенный процесс в мозге либо «происходит», либо «не происходит». Странные суперпозиции квантовой теории, допускающие ситуации, когда процесс одновременно «происходит» и «не происходит», – и снабженные соответствующими комплексными весовыми коэффициентами – естественно, в расчет не принимаются. Мы еще можем согласиться с тем, что на некоем субмикроскопическом уровне подобные квантовые суперпозиции «действительно» имеют место, однако на уровне макроскопическом, по нашему глубокому убеждению, характерные для таких квантовых феноменов эффекты интерференции сколько-нибудь существенной роли играть просто не могут. Следовательно, любые такие суперпозиции уместно рассматривать как статистические эффекты, а классическое моделирование функционирования мозга оказывается с практической точки зрения (и снова FAPP!) целиком и полностью удовлетворительным.⁶²

Однако такого мнения придерживаются далеко не все. В частности, известный нейрофизиолог Джон Экклз указывал на важную роль квантовых эффектов в синаптической передаче (см., например, [18] и [105]). По предположению Экклза, квантовая активность сосредоточена в так называемой пресинаптической везикулярной сетке – паракристаллической гексагональной структуре в пирамидальных клетках мозга. Другие ученые (включая и меня, см. НРК, с. 400–401

⁶² В.Э.: Квантомеханические «суперпозиции» и подобные эффекты происходят также и в современных компьютерах, однако они никак не влияют на работу созданных нами программ и при их разработке не учитываются. Эти компьютеры производят обработку информации, и мы знаем, что мозг тоже производит обработку информации. Поэтому наиболее естественная позиция – это считать, что в мозге тоже квантомеханические эффекты не участвуют в обработке информации. Противоположное можно начинать предполагать лишь в том случае, если какие-то проявления «разума» невозможно объяснить той информатикой, по которой работают промышленные компьютеры. Пенроуз думает, что это действительно невозможно, потому ему и приходится искать выход в квантовой механике. А мы видим, что можно объяснить (и знаем как), и поэтому нам незачем «лезть» в квантовую механику.

и [291]), экстраполируя тот факт, что светочувствительные клетки сетчатки (которая формально является частью мозга) способны реагировать на чрезвычайно слабый свет (буквально несколько фотонов, [194]) – при определенных обстоятельствах такая клетка может зарегистрировать даже один-единственный фотон [17], – предположили, что и в самом мозге могут содержаться нейроны, также являющиеся, по сути своей, квантовыми «детекторами»⁶³.

Поскольку квантовые эффекты действительно могут инициировать в мозге процессы гораздо более крупного, нежели сами, «масштаба», отдельные исследователи выразили надежду, что способность разума воздействовать на физический мозг может быть обусловлена квантовой неопределенностью. Здесь следует, скорее всего, принять – явно или нет – дуалистическую точку зрения. Вполне возможно, что на квантовые вероятности, реально возникающие в результате таких недетерминированных процессов, оказывает влияние «свободная воля» «внешнего разума». В этом случае, «материя разума» нашего дуалиста воздействует на поведение его физического мозга не иначе, как через посредство квантовой R-процедуры.

Я не знаю, как относиться к подобным предположениям, особенно в свете того, что в стандартной квантовой теории никакой неопределенности на квантовом уровне нет – здесь действует вполне детерминированная U-эволюция. Предполагается, что неопределенность, связанная с процедурой R, возникает лишь в процессе перехода с квантового уровня на классический. Согласно стандартному FAPP-объяснению, неопределенность эта «происходит» лишь тогда, когда квантовое событие оказывается сцепленным с достаточным объемом окружения. Более того, как мы могли убедиться в §6.6, само понятие «происходить» трактуется в стандартном подходе крайне туманно. Вряд ли в рамках традиционной квантовой физики можно утверждать, что теория допускает-таки существование неопределенности на уровне единичной квантовой частицы – такой, например, как фотон, атом или небольшая молекула. Например, встреча волновой функции фотона с фоточувствительной ячейкой инициирует целую последовательность событий, которые остаются детерминированными (эволюция U), пока система пребывает «на квантовом уровне». Затем возмущение охватывает достаточный объем окружения, и мы говорим, что произошла (FAPP) редукция R. Придется смириться с тем, что «материя разума» способна так или иначе воздействовать на систему лишь на этой стадии неопределенности.

Согласно моему собственному представлению о редукции состояний (см. §6.12), в поисках уровня, на котором действительно происходит R-процесс, следует обратить внимание на масштабы вполне макроскопические, что имеет смысл, когда в квантовом состоянии оказываются сцепленными довольно большие объемы вещества (от нескольких микрон до нескольких миллиметров в диаметре – или даже гораздо большие, если процесс не предполагает значительного перемещения масс). (В дальнейшем я буду называть эту вполне конкретную, но, тем не менее, гипотетическую «действующую» редукцию объективной и обозначать через OR⁶⁴.) В любом случае, если мы собираемся придерживаться описанной выше дуалистической точки зрения, где нам нужно еще отыскать «место», откуда внешний «разум» сможет воздействовать на физическое поведение мозга, – для успешного поиска придется, по-видимому, заменить чистую случайность квантовой теории чем-то более утонченным, – то мы непременно должны выяснить, каким образом воздействие «разума» может проявляться в масштабах, существенно более крупных, нежели размер отдельной квантовой частицы. Искать ответ следует там, где квантовый и классический уровни соприкасаются. Трудность заключается в том, что мы, как уже отмечалось в предыдущей главе, никак не можем договориться о том, существует ли такая точка соприкосновения вообще, а если существует, то что она собой представляет и где находится.

⁶³ В.Э.: Это всё может быть, но это не меняет природы обработки информации. (И, соответственно, тех средств, какими она должна изучаться и описываться).

⁶⁴ В НРК я использовал для обозначения такого процесса термин «корректная квантовая гравитация» (ККГ; англ. CQG, *correct quantum gravity*. – Прим. перев.). Здесь же акцент несколько иной. Сейчас я не хочу указывать на связь рассматриваемой процедуры с фундаментальной задачей построения непротиворечивой теории квантовой гравитации. Я хочу, скорее, подчеркнуть, что в основе этой процедуры лежат те же предположения, что я сделал в §6.12, плюс некий фундаментальный неизвестный и невычислимый компонент. Использование сокращения OR (англ. *or* переводится как «или»). – Прим. перев.) имеет еще и дополнительный смысл: физическим результатом объективной редукции и в самом деле является одно состояние – или то, или другое, – в отличие от комплексной суперпозиции, с которой мы имели дело прежде.

Думаю, что с научной точки зрения довольно бессмысленно полагать, что дуалистический «разум», внешний (что логично) по отношению к телу, каким-то загадочным образом воздействует на выбор того или иного альтернативного варианта, происходящий, судя по всему, под действием процедуры R. Если бы «воля» могла каким-то образом изменять выбор, который осуществляет в момент R Природа, то почему же экспериментатор не может с помощью своей «силы воли» воздействовать на результат квантового эксперимента? Если бы такое было возможно, то нарушения квантовой вероятности происходили бы сплошь и рядом! Лично я, как ни пытаюсь, не могу поверить в то, что подобная картина может быть хоть сколько-нибудь близка к реальности. Представление о внешней «материи разума», не подвластной физическим законам, выводит нас за рамки того, что можно обоснованно назвать научным объяснением, отсылая прямиком к точке зрения \mathcal{D} (см. §1.3 {= [МОИ № 17](#)}).

Впрочем, однозначно опровергнуть такую точку зрения очень сложно, так как по самой своей природе она лишена четких правил, которые позволили бы нам подойти к ней с позиций строгого научного рассуждения.⁶⁵ Тех читателей, которые по каким-либо причинам твердо убеждены, что наука никогда не дорастет до того, чтобы хотя бы подступиться к проблемам разума (точка зрения \mathcal{D}), я смиренно прошу потерпеть меня еще немного и просто посмотреть, какие «пустоты» могут в самое ближайшее время обнаружиться в монолите современной науки и, несомненно, послужить ее распространению далеко за пределы тех тесных границ, которые она на сегодняшний день для себя установила. Если «разум» представляет собой нечто внешнее по отношению к физическому телу, то почему же тогда столь многие его качества так тесно связаны со свойствами физического мозга? Моя собственная точка зрения заключается в том, что для отыскания ответа на этот и другие подобные вопросы необходимо более тщательно исследовать известные физические «материальные» структуры, составляющие мозг, – и разобраться, наконец, что же в действительности представляют собой «материальные» структуры на квантовом уровне. Полагаю, иного выхода у нас, в конечном счете, нет – чтобы добраться до истины, нам придется углубиться в самые основы мироздания.

Как бы то ни было, ясно по крайней мере одно. Мы должны рассматривать не просто квантовые свойства отдельных частиц, атомов или даже малых молекул, но эффекты квантовых систем, сохраняющие свою явно квантовую природу на макроскопическом уровне. Если в системе отсутствует макроскопическая квантовая когерентность, то неоткуда взяться и тонким эффектам на квантовом уровне – таким, скажем, как нелокальность и квантовый параллелизм (несколько одновременных действий в суперпозиции), – или эффектам контрфактуальности, приобретающим значимость лишь на классическом уровне функционирования мозга. Без должного «экранирования» квантового состояния от окружения такие эффекты мгновенно затеряются в присущей этому окружению хаотичности, – выражающейся, в нашем случае, в беспорядочном движении молекул биологических веществ и жидкостей, составляющих основную массу мозга.

Что же такое квантовая когерентность? Этот феномен возникает при условиях, позволяющих большому количеству частиц образовывать совместно единое квантовое состояние, практически несцепленное с окружением. (Термином «когерентность» в общем случае обозначается согласованность отдельных колебаний по фазе. Говоря о квантовой когерентности, мы имеем в виду колебательную природу волновой функции; когерентность в данном случае подразумевает наличие единого квантового состояния.) Такие состояния в наиболее наглядном виде встречаются в феноменах сверхпроводимости (когда электрическое сопротивление проводника равно нулю) и сверхтекучести (когда равно нулю жидкостное трение, или вязкость). Характерной особенностью таких феноменов является наличие запрещенной энергетической зоны – для того, чтобы изменить существующее квантовое состояние, окружение должно эту зону как-то преодолеть. Когда температура окружения достаточно высока, т.е. частицы, это окружение составляющие, обладают энергией, достаточной для того, чтобы «перепрыгнуть» запрещенную зону и «сцепиться» с квантовым состоянием, квантовая когерентность разрушается. Поэтому явления, подобные сверхпроводимости и сверхтекучести, возникают обычно лишь при очень низких температурах, порядка нескольких градусов выше абсолютного нуля. В этом, собственно, и заключалась (до недавних пор) одна из причин общего скептического отношения к возможности существования эффектов квантовой когерентности внутри такого «горячего» объекта, как человеческий мозг – или любая другая биологическая система.

⁶⁵ В.Э.: Для этого есть «лезвие Оккама»! Оно и отсекает всё, без чего можно обойтись.

Однако за последние годы было проведено несколько замечательных экспериментов, показавших, что в некоторых веществах сверхпроводимость может возникать при гораздо более высоких температурах, вплоть до 115 К (см. [343]). С биологической точки зрения, это всё еще слишком холодно: $-158\text{ }^{\circ}\text{C}$ (или $-212\text{ }^{\circ}\text{F}$) – лишь немногим выше температуры жидкого азота. Гораздо более интересны в этом смысле наблюдения Лаге и его коллег [233], указывающие на существование сверхпроводимости при температурах всего лишь «сибирских», $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (или $-10\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Будучи всё еще несколько, по биологическим меркам, «холодной», такая высокотемпературная сверхпроводимость является серьезным свидетельством в пользу предположения о возможности существования квантовокогерентных эффектов в биологических системах.

Более того, еще задолго до обнаружения феномена высокотемпературной сверхпроводимости выдающийся физик Герберт Фрелих (совершивший в 1930-е годы один из фундаментальных «прорывов» в понимании «обычной» низкотемпературной сверхпроводимости) предположил, что коллективные квантовые эффекты могут играть определенную роль в биологических системах. Заинтересовавшись необычным феноменом, наблюдавшимся еще в 1938 году на биологических мембранах (и применив концепцию, предложенную Ларсом Онсагером и моим братом, Оливером Пенроузом [289], – о чем я, занявшись изучением вопроса, узнал с некоторым удивлением), Фрелих в 1968 году [129] пришел к выводу, что биологическая квантовая когерентность должна вызывать в живых клетках колебательные эффекты, резонирующие с микроволновым электромагнитным излучением на частоте 10^{11} Гц. Эти эффекты не требуют низких температур и возникают благодаря большой энергии метаболических процессов. Сегодня мы располагаем достоверными экспериментальными свидетельствами, подтверждающими наличие во многих биологических системах в точности таких эффектов, какие предсказывал в 1968 году Фрелих. Чуть позже (в §7.5) мы попробуем разобраться, какое отношение эти феномены могут иметь к работе мозга.

§7.2. Нейроны, синапсы и компьютеры

Получить явное подтверждение тому, что квантовая когерентность действительно может играть в биологических системах ключевую роль, конечно же, отчасти, однако суть этой самой роли применительно к процессам, имеющим непосредственное отношение к функционированию мозга, пока совершенно не ясна. Наше понимание работы мозга, всё еще очень смутное, сводится, по большей части, к классическому представлению (совпадающему, в основном, с тем, что предложили еще в 1943 году Маккаллох и Питтс), согласно которому нейроны и соединяющие их синапсы выполняют в мозге практически те же функции, что и транзисторы вместе с соединяющими их дорожками в печатных схемах современных компьютеров. Более детальная биологическая картина выглядит так: классические нервные сигналы распространяются из центрального тела нейрона (сомы) вдоль очень длинного волокна, называемого аксоном, причем от аксона в различных местах ответвляются отдельные отростки (см. рис. 7.1). Каждый отросток непременно заканчивается синапсом – соединением, посредством которого сигнал через синаптическую щель передается к следующему нейрону (как правило). Именно на этой стадии в процесс вступают химические вещества, называемые нейромедиаторами, – перемещаясь от одной клетки (нейрона) к другой, они переносят сообщение о возбуждении предыдущего нейрона. Такое синаптическое соединение приходится либо на древовидный отросток (дендрит) следующего нейрона (в большинстве случаев), либо на его сому. Одни синапсы являются по своей природе возбуждающими, их нейромедиаторы усиливают возбуждение следующего нейрона; другие же, напротив, – тормозящие, и их нейромедиаторы (отличные от первых) возбуждение следующего нейрона ослабляют. Воздействие различных синапсов на нейрон суммируется (возбуждение учитываем со знаком «плюс», а торможение – со знаком «минус»), и по достижении определенного порогового значения нейрон возбуждается.⁶⁶ Правильнее,

⁶⁶ По крайней мере, таково традиционное представление. Сегодня у нас есть некоторые основания полагать, что эта простая «аддитивная» модель слишком упрощена и определенная «обработка информации» может осуществляться уже в дендритах отдельных нейронов. На возможность такой обработки указывал, среди прочих, Карл Прибрам (см. [319]). Сходные в общих чертах предположения были сделаны ранее Алвином Скоттом [338, 339] (а о возможности наличия «интеллекта» в отдельно взятой клетке можно прочесть, например, у Альбрехта Бюлера [8]). Возможность сложной «дендритной» обработки информации внутри отдельных нейронов мы подробнее обсудим в §7.4.

впрочем, будет сказать, что существует высокая вероятность такого возбуждения. Определенный случайный фактор присутствует во всех процессах такого рода.

Таким образом – во всяком случае, пока, – не возникает сомнений в том, что изложенная картина может быть эффективно смоделирована численными методами, если допустить, что синаптические связи и их индивидуальная интенсивность со временем не изменяются. (Наличие случайных составляющих, разумеется, никаких проблем в смысле вычислимости не представляет, см. §1.9 {= [МОИ № 17](#)}). В самом деле, несложно заметить, что вышеописанная нейронно-синапсовая схема (с постоянными синапсами и их интенсивностями) существенно эквивалентна схеме компьютера (см. НРК. с. 392–396). Однако благодаря феномену так называемой пластичности мозга, интенсивность по крайней мере некоторых синаптических связей может время от времени изменяться – порой быстрее, чем за секунду, а кроме того, изменяться могут и сами связи. Что ставит нас перед немаловажным вопросом: что же этими синаптическими изменениями управляет?



Рис. 7.1. Нейрон и его соединение с другими нейронами посредством синапсов.

В коннекционистских моделях (применяемых при разработке искусственных нейронных сетей) синаптические изменения описываются определенным вычислительным правилом. Это правило устанавливается таким образом, чтобы система могла в процессе работы повышать свою эффективность, сравнивая поступающую на ее вход извне информацию с некоторыми заранее заданными критериями. Простое правило такого типа предложил Дональд Хебб еще в 1949 году [193]. Современные коннекционистские модели⁶⁷ используют различные модификации (порой весьма значительные) всё той же процедуры Хебба. Любая модель такого рода непременно должна иметь в своей основе хоть какое-нибудь четкое вычислительное правило, поскольку выполняются эти модели на самых обычных компьютерах; см. §1.5 {= [МОИ № 17](#)}. Однако, в силу изложенной в первой части аргументации, никакая вычислительная процедура не может адекватно объяснить все операционные проявления человеческого сознательного понимания.⁶⁸ Следовательно, нужно искать какой-то другой управляющий «механизм» – по крайней мере, для объяснения синаптических изменений, возможно, имеющих некоторое отношение к настоящей сознательной деятельности мозга.

Были выдвинуты и другие идеи; например, Джеральд Эдельман в своей книге «Прозрачный воздух, сверкающий огонь» [112] (и в более ранней трилогии [109, 110, 111]) предположил, что в мозге действуют не правила типа правила Хебба, а, скорее, некий вариант «дарвинского» эволюционного принципа, позволяющий мозгу непрерывно повышать свою эффективность, управляя синаптическими связями посредством своеобразного естественного отбора, – при этом Эдельман указывает на весьма многозначительные параллели между своей моделью и процессом развития иммунной системой способности «распознавать» вещества. Особое значение в этой модели придается сложной роли нейромедиаторов и других химических соединений, задействованных в коммуникации между нейронами. Однако на сегодняшний день

⁶⁷ См., напр., [242].

⁶⁸ В.Э.: Как мы убедились в комментариях к изложенной там аргументации, она совершенно несостоятельна, и все «операционные проявления человеческого сознательного понимания» легко объясняются в понятиях «вычислительных процедур». Следовательно, никакого «другого механизма» искать не надо.

соответствующие процессы по-прежнему рассматриваются как классические и вычислимые. Вместе со своими коллегами Эдельман даже построил ряд устройств с компьютерным управлением (получивших названия DARWIN I, II, III, IV и т.д.), предназначенных для моделирования (с увеличением степени сложности) как раз той самой процедуры, которая, по его предположению, лежит в основе умственной деятельности. Однако тот факт, что управляющие функции в устройствах Эдельмана возложены на самый обычный универсальный компьютер, вполне недвусмысленно показывает, что и эта схема является исключительно вычислительной – просто здесь используется некая «восходящая» система правил. При этом совершенно не важно, какими именно деталями данная схема отличается от других вычислительных процедур. Она всё равно принадлежит к той категории, что мы обсуждали в первой части, – см. §1.5, а также §3.9 и краткое изложение аргументации главы 3 в воображаемом диалоге в §3.23 {[все = МОИ № 17](#)}. Одного лишь этого диалога достаточно для того, чтобы убедиться в полном неправдоподобии любого утверждения о том, что модель, основанная только на подобного рода принципах, может иметь какое-то отношение к действительному функционированию сознательного разума.⁶⁹

Для того, чтобы избавиться от этих «пут» вычислительности, необходимо найти какой-нибудь другой механизм управления синаптическими связями – причем каким бы этот механизм ни был, он, по всей видимости, должен задействовать некий физический процесс, важную роль в котором играет та или иная форма квантовой когерентности. Если этот процесс окажется в каком-либо существенном отношении похожим на действие иммунной системы, то, значит, и иммунная система работает на квантовых эффектах. Возможно, какие-то процессы в работе иммунного механизма распознавания и впрямь носят существенно квантовый характер – как, в частности, утверждает Майкл Конрад [57, 58, 59]. Меня бы это не удивило, однако в эдельмановской модели мозга возможному участию квантовых процессов в работе иммунной системы места не нашлось.

Впрочем, даже если когерентные квантомеханические эффекты каким-то образом замешаны в управлении синаптическими связями, всё же трудно предположить, что и распространение нервных импульсов может быть связано с чем-то существенно квантомеханическим. Иначе говоря, совершенно неясно, какую пользу можно извлечь из рассмотрения квантовой суперпозиции, в которой нейрон одновременно и возбужден, и заторможен. Нервные сигналы представляются нам явлениями вполне макроскопическими – во всяком случае, достаточно макроскопическими для того, чтобы такая картина выглядела крайне неправдоподобно, даже несмотря на тот факт, что собственно передача весьма хорошо изолирована от окружения благодаря плотному слою миелина, покрывающему нервные окончания. Согласно критерию, предложенному в §6.12 (OR), следует ожидать, что при возбуждении нейрона объективная редукция состояния происходит очень быстро – не потому, что имеет место значительное перемещение масс (его там даже по минимально требуемым стандартам далеко недостаточно), а потому, что распространяющееся вдоль нерва электрическое поле (порождаемое нервным сигналом), скорее всего, не остается «незамеченным» окружающими нервными тканями мозга. Это поле возмущает случайным образом весьма значительный объем вещества окружения – вполне достаточный, как мне представляется, для того, чтобы удовлетворить критерию срабатывания процедуры OR (из §6.12) почти сразу же после возникновения сигнала. Таким образом, сохранение в течение длительного времени квантовых суперпозиций возбуждения и торможения нейрона вряд ли возможно.

⁶⁹ В.Э.: На этом уровне можно пререкаться «до бесконечности», всё время повторяя, что §2.5 {=[МОИ № 17](#)} что-то доказывает (Пенроуз) или что он ничего не доказывает (я). Решающее значение здесь, однако, имеют разборы отдельных конкретных вопросов (каковые и предлагает Веданская теория). Например, берем вопрос «Что есть сновидение?» {PENRO5 = [МОИ № 16](#), с.90, [сноска 108](#)} – и разбираем его в компьютерной модели мозга, «в понятиях вычислительных процедур». Или берем вопрос «Что есть число?» – и разбираем. Или вопрос «Как в мозге-компьютере происходит доказательство бесконечности количества простых чисел?». Или вопрос «Что (в понятиях вычислительных процедур) означают юнговские экстраверсия и интроверсия?» Не может быть и речи о том, чтобы Пенроуз (при защищаемой им концепции) мог дать развернутые ответы на эти вопросы. Наоборот, вся суть его аргументации сводится к тому, что такие ответы при нынешнем состоянии науки невозможно получить – и только, вот, когда-то, в неопределенном будущем, после привлечения квантовой механики, возможно, появится какой-то проблеск – но в данный момент абсолютно еще неясный, на сегодняшний день совершенно еще недетализированный... А тем временем Веданская теория немедленно, здесь и сейчас, дает исчерпывающие ответы на все эти – и многие другие – вопросы.

§7.3. Квантовые вычисления

Свойство возбужденного нейрона возмущать окружение всегда представлялось мне донельзя неудобным – оно никак не вписывалось в то предварительное предположение, которое я пытался обосновать в НРК и в рамках которого квантовая суперпозиция одновременного возбуждения и торможения семейств нейронов была, как мне казалось, действительно необходимой. Согласно нашему новому критерию редукции состояний (OR), для редукции требуется еще меньшее возмущение окружения, чем в прежнем описании, и в возможность сохранения таких суперпозиций в течение сколько-нибудь заметного времени поверить еще сложнее. А собственно идея тогда заключалась в следующем: если бы возможно было выполнять несколько отдельных «вычислений» в суперпозиции в нескольких одновременно возбуждающихся нейронных структурах, то резонно было бы предположить, что в мозге вместо «обычных» тьюринговых вычислений выполняется нечто вроде вычислений квантовых. Несмотря на кажущуюся невозможность выполнения квантовых вычислений на этом уровне функционирования мозга, будет полезно познакомиться с некоторыми их аспектами подробнее.

Квантовое вычисление – теоретическая концепция, основы которой разработали Дэвид Дойч [83] и Ричард Фейнман [120, 121] (см. также [25] и [6]) и которая в настоящее время активно исследуется многими учеными. Основная идея заключается в распространении классического понятия машины Тьюринга на соответствующее квантовое устройство. Как следствие, все выполняемые такой расширенной «машиной» операции должны подчиняться квантовым законам т.е. законам, по которым живут системы квантового уровня (с возможностью суперпозиций). Так, эволюция устройства происходит преимущественно под действием процедуры U, причем существенным свойством этого самого действия является как раз сохранение наличествующих суперпозиций. Процедура R получает «право голоса», как правило, лишь в конце операции, когда система «измеряется» с целью узнать результат вычисления. Вообще говоря (хотя не все это осознают), в процессе вычисления процедуру R необходимо время от времени вызывать дополнительно для того, чтобы проверить, не завершилось ли оно.

Выяснилось, что, хотя квантовый компьютер и не имеет сверхспособностей, в принципе недоступных для традиционного вычисления по Тьюрингу, в некоторых классах задач квантовое вычисление превосходит тьюрингово вычисление в смысле теории сложности ([83]). То есть при решении таких задач квантовый компьютер оказывается в принципе намного быстрее, нежели компьютер обычный, – но и только. Ряд интересных (хотя и несколько искусственных) задач такого типа, при решении которых квантовый компьютер оказывается победителем,⁷⁰ приводят, в частности, Дойч и Йожа [88]. Более того, как недавно показал Питер Шор, с помощью квантового вычисления можно решить (за полиномиальное время) актуальную задачу факторизации больших целых чисел.

«Стандартное» квантовое вычисление использует обычные правила квантовой теории, согласно которым в течение практически всей операции система эволюционирует под действием процедуры U, а R вмешивается в процесс на строго определенных этапах. В такой процедуре нет ничего «невычислимого» в смысле обычной «вычислимости», так как U – вычислимая операция, а R – чисто вероятностная процедура. Всё, что в принципе можно получить с помощью квантового компьютера, можно в принципе получить и с помощью соответствующей машины Тьюринга, снабженной генератором случайных чисел. Таким образом, согласно представленным в первой части книги аргументам, даже квантовый компьютер не способен выполнять операции, требуемые для человеческого сознательного понимания. Остается надеяться лишь на то, что подлинная невычислимость скрывается где-то за тонкими особенностями процесса, в действительности происходящего в момент «кажущейся» редукции вектора состояния, потому что во временно заменяющей этот реальный процесс случайной процедуре R никакой невычислимости нет. Таким образом, полная теория гипотетической процедуры OR будет по необходимости носить существенно невычислимый характер.

⁷⁰ В.Э.: «..оказался бы победителем..». Пенроуз это пишет в 1994 году. Тогда еще и мобильные телефоны не вошли в нашу жизнь. История с мобильными телефонами показывает, как это бывает, когда идея действительно плодотворна и устройство реально. А квантовый компьютер... С 2007 года, 13 лет спустя после текста Пенроуза и 19 лет после смерти Фейнмана стали иногда появляться сообщения, что квантовый компьютер якобы наконец сделан. Но эти сообщения были такие... Сообщения были, а компьютера не было... Лично я не очень верю, что его когда-нибудь построят. По-моему, всё это только спекуляции...

Предложенная в НРК идея основывалась на предположении, что в мозге возможны достаточно длительные тьюринговы вычисления в суперпозиции, прерываемые время от времени неким невычислимым действием, которое можно объяснить лишь в терминах того нового физического процесса (например, OR), какой придет на смену редукции R. Теперь, когда на такие суперпозиции нейронных вычислений мы больше рассчитывать не можем по причине слишком сильного возмущения окружения проходящими по нейрону импульсами, становится непонятно, каким образом можно здесь хотя бы воспользоваться самой идеей стандартного квантового вычисления, не говоря уже о какой-либо модификации этой процедуры посредством замены R на некий гипотетический невычислимый процесс (например, OR). Однако, как мы очень скоро убедимся, существует еще одна, весьма многообещающая возможность. Для того, чтобы понять, что она собой представляет, нам необходимо более подробно рассмотреть биологическое устройство клеток мозга.

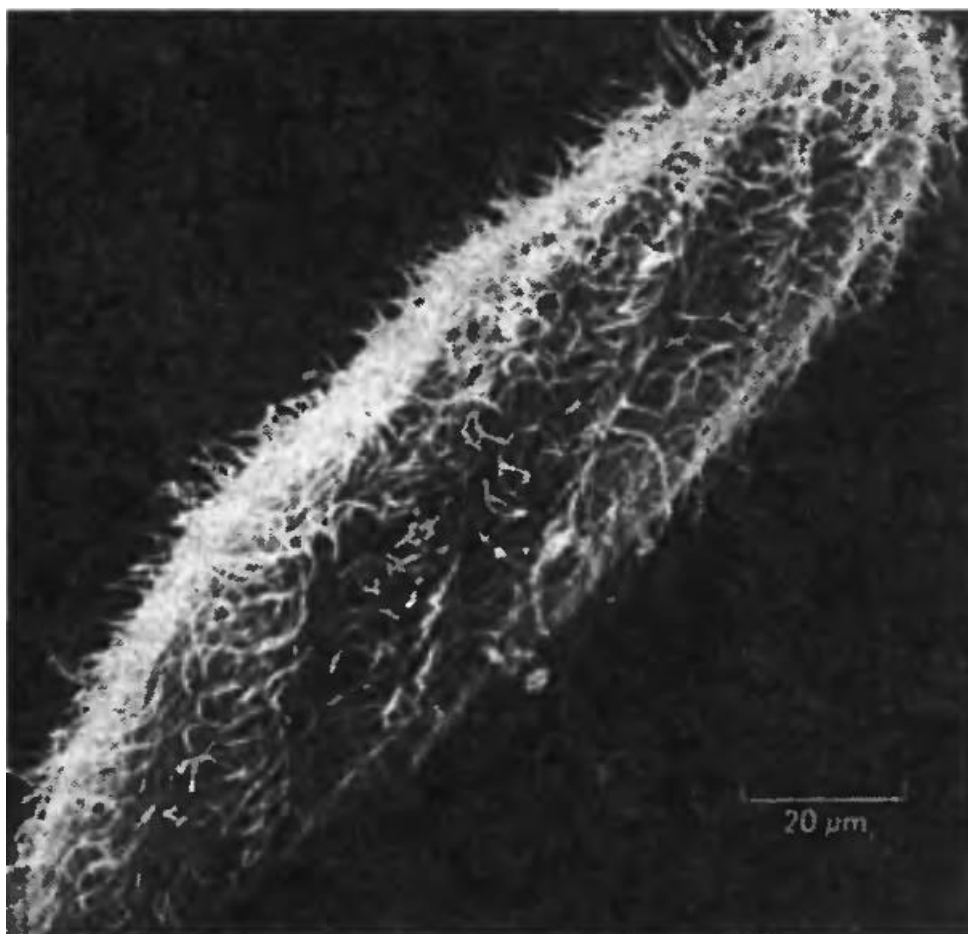


Рис. 7.2. Парамеция. Обратите внимание на волосообразные реснички, используемые для перемещения в воде. Они представляют собой наружные окончания цитоскелета парамеции.

§7.4. Цитоскелет и микротрубочки

Если мы вдруг вообразим, что сложное поведение животных управляется только лишь нейронами, то скромная парамеция поставит нас перед фундаментальной проблемой. Эта инфузория перемещается по своему пруду с помощью многочисленных крохотных волосообразных конечностей – ресничек, преследуя бактерий, которыми она питается и которых обнаруживает посредством различных внутренних механизмов, или отступая от возможной опасности, готовая мгновенно устремиться прочь. Она также может преодолевать препятствия, огибая их. Более того, парамеция, по всей видимости, способна обучаться на собственном опыте⁷¹ – хотя эта наиболее замечательная ее способность некоторыми учеными оспаривается.⁷² Как же всё это

⁷¹ См. [128], [139], [11] и [134].

⁷² Напр., [101].

может проделывать существо, не имеющее ни единого нейрона и синапса? В самом деле, поскольку вся парамеция – это всего лишь одна, пусть и большая, клетка, и притом не нейрон, ей просто негде все перечисленные способности разместить (см. рис. 7.2).

Несомненно, поведение парамеции – да собственно и прочих одноклеточных организмов, например, амёб – регулируется какой-то сложной системой управления; просто эта система построена не из нервных клеток. Ответственная за поведение парамеции структура, очевидно, является частью ее так называемого цитоскелета. Как можно предположить из названия, цитоскелет служит для поддержания формы клетки, однако у него имеются и многочисленные иные функции. Упомянутые выше реснички представляют собой окончания волокон цитоскелета, но помимо них цитоскелет, похоже, содержит еще и собственно систему управления движением клетки, а также систему «конвейеров», осуществляющих транспортировку молекул внутри клетки. Словом, в единичной клетке цитоскелет выступает в роли такой комбинации скелета, мускулатуры, конечностей, системы кровообращения и нервной системы.

Нас с вами в настоящий момент больше всего интересует, каким образом цитоскелет выполняет функции клеточной «нервной системы». Нейроны в нашем мозге сами являются отдельными клетками, причем у каждого нейрона есть свой собственный цитоскелет! Означает ли это, что в некотором смысле каждый отдельный нейрон располагает чем-то вроде «личной нервной системы»? Предположение весьма интригующее, и многие ученые склоняются к мнению, что нечто подобное действительно может иметь место. (См. первопроходческий труд Стюарта Хамероффа «Первичное вычисление: биомолекулярное сознание и нанотехнология» [183]; также рекомендую обратить внимание на статью [184] и многочисленные статьи в новом журнале «Нанобиология»⁷³.)

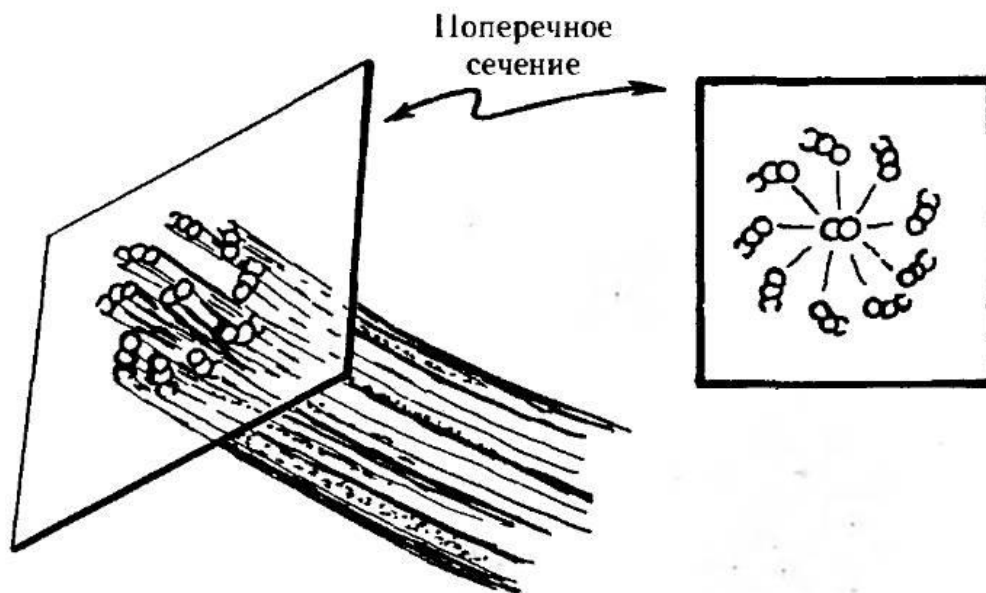


Рис. 7.3. Важной частью цитоскелета являются пучки крохотных трубочек (микротрубочек), организованных в структуры, напоминающие в поперечном сечении лопасти вентилятора. Такое строение имеют, например, реснички парамеции.

Прежде, чем переходить к этим вопросам, необходимо рассмотреть вкратце общее устройство цитоскелета. Он состоит из протеиноподобных молекул, организованных в различного типа структуры: актин, микротрубочки и промежуточные волокна. Нас сейчас интересуют, главным образом, микротрубочки. Они представляют собой полые цилиндрические трубки с внешним диаметром около 25 нм и внутренним – около 14 нм (где «нм» обозначает «нанометр», т.е. 10^{-9} м), иногда организованные в более крупные трубкообразные волокна, состоящие из девяти дублетов, триплетов или частичных триплетов микротрубочек; в поперечном сечении такое волокно напоминает лопасти вентилятора, как показано на рис. 7.3, причем иногда по его центру также проходит пара микротрубочек. Как раз такое строение имеют реснички парамеции. Каждая микротрубочка представляет собой белковый полимер, состоящий из субъединиц,

⁷³ Nanobiology.

называемых тубулинами. Каждая субъединица тубулина, в свою очередь, представляет собой «димер», т.е. состоит из двух соединенных тонкой перемычкой частей, называемых α -тубулин и β -тубулин (приблизительно по 450 аминокислот в каждой). Эти пары глобулярных белков, напоминающие по форме орех арахиса, уложены в слегка скошенную гексагональную решетку вдоль всей трубки, как показано на рис. 7.4. Обычно на каждую микротрубочку приходится по 13 рядов димеров тубулина. Размеры димера составляют приблизительно $8 \text{ нм} \times 4 \text{ нм} \times 4 \text{ нм}$, а его атомное число – около 11×10^4 (т.е. в одном димере содержится такое количество нуклонов, что его масса в абсолютных единицах равна приблизительно 10^{-14}).

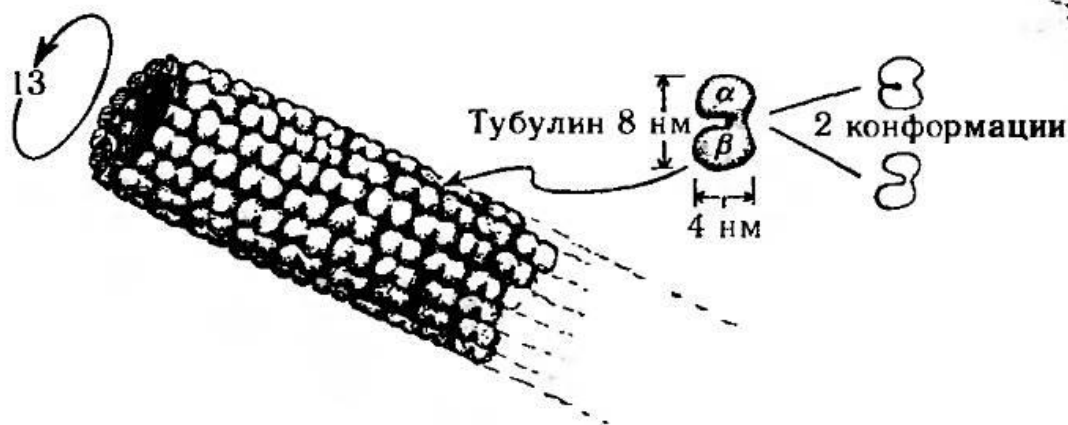


Рис. 7.4. Микротрубочка. Полая трубка, обычно состоящая из 13 рядов димеров тубулина. Каждая из молекул тубулина может существовать в двух (по крайней мере) конформациях.

Димер тубулина может существовать в двух (по крайней мере) различных геометрических конфигурациях, называемых конформациями. В одной из таких конформаций молекулы тубулина располагаются под углом около 30° к оси микротрубочки. Есть основания полагать, что эти две конформации соответствуют двум различным состояниям электрической поляризации димера, возникающим вследствие того, что электрон в центре перемычки α -тубулин / β -тубулин занимает в различных конформациях различные положения.

«Центром управления» в цитоскелете является, по всей видимости, структура, называемая центром организации микротрубочек, или центросомой. Внутри центросомы имеется особая структура, называемая центриолью, которая состоит из двух цилиндрических волокон, по девять триплетов микротрубочек в каждом, образующих в пространстве структуру, похожую на «разделенную» букву «Т» (см. рис. 7.5). (Цилиндрические волокна в общем аналогичны по структуре ресничкам, показанным на рис. 7.3.) Согласно Альбрехту-Бюлеру [7, 9], центриоль действует как глаз (!) клетки – идея чрезвычайно захватывающая, хотя и далеко еще не общепринятая. Какой бы ни была роль центросомы в нормальной, «повседневной», жизни клетки, она выполняет по крайней мере одну фундаментально важную задачу. На некоем критическом этапе она разделяется на две части, каждая из которых, по всей видимости, утягивает за собой пучок микротрубочек – хотя, пожалуй, точнее будет сказать, что каждая часть становится своего рода фокусом, вокруг которого и собираются микротрубочки. Эти микротрубочковые волокна каким-то образом связывают центросому с отдельными цепочками ДНК в ядре (в центральных точках, называемых центромерами), и цепочки ДНК расходятся –

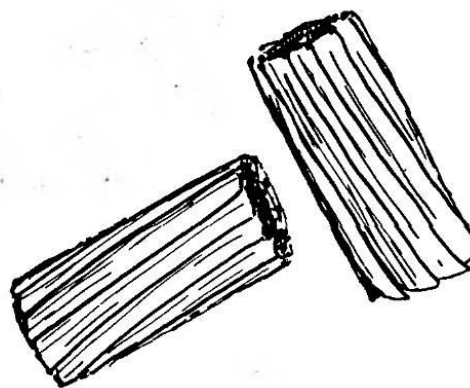


Рис. 7.5. Центриоль (по некоторым предположениям, глаз клетки) состоит из двух пучков микротрубочек (очень похожих на те, что изображены на рис. 7.3), образующих «разделенную» букву «Т».

начиная тем самым удивительный процесс, известный специалистам под названием МИТОЗ, что означает всего-навсего деление клетки (см. рис. 7.6).

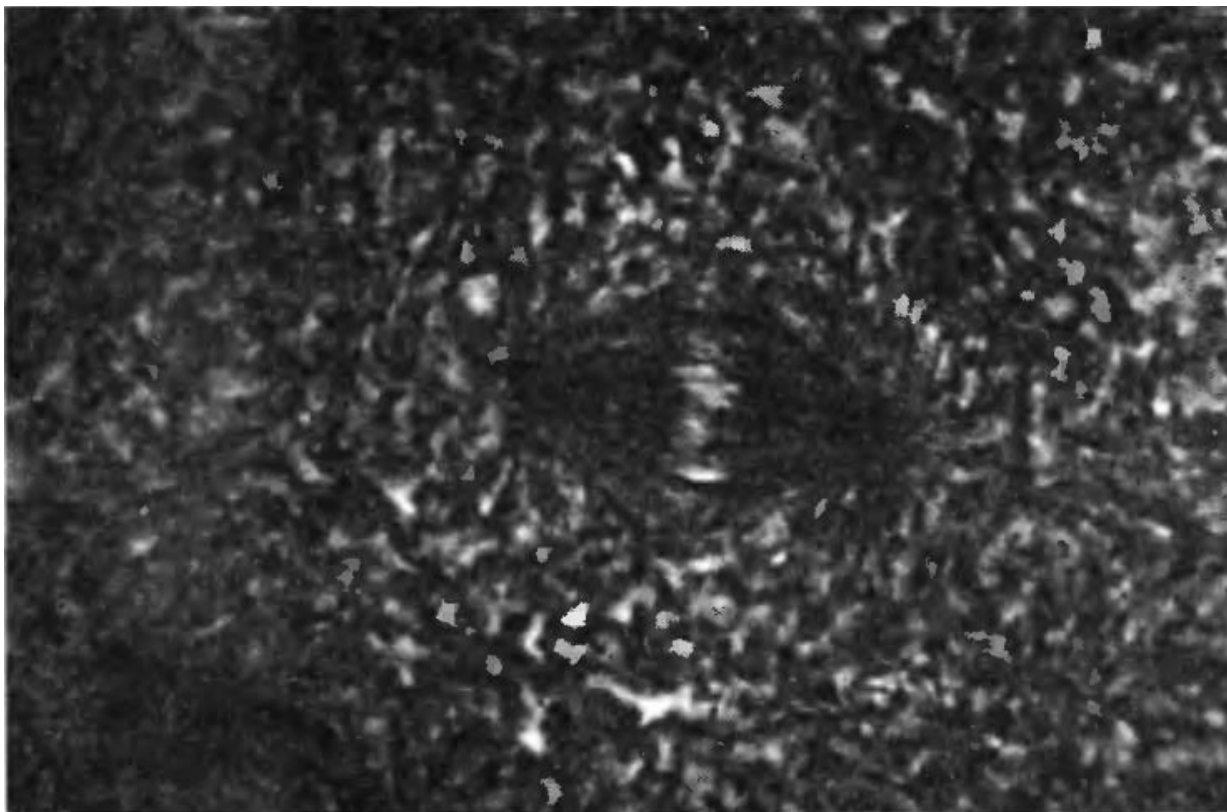


Рис. 7.6. При митозе (делении клетки) хромосомы разделяются, растаскиваемые пучками микротрубочек.

Может показаться странным, что внутри одной клетки действуют две столь разные «штаб-квартиры». Одна из них – ядро, где хранится основной генетический материал клетки, определяющий ее наследственность и уникальность, а также управляющий производством белкового материала, из которого, собственно, «строится» клетка. Другой управляющий центр – центросома с центриолью в качестве основного компонента, являющаяся, по всей видимости, главным узлом цитоскелета – структуры, которая, опять же по всей видимости, контролирует движение клетки и ее пространственную организацию. Предполагается, что присутствие этих двух различных «центров» в эукариотических⁷⁴ клетках (клетках всех животных и почти всех растений на нашей планете, за исключением бактерий, сине-зеленых водорослей и вирусов) является результатом древней «инфекции», распространившейся по миру несколько миллиардов лет назад. Клетки, населявшие Землю прежде, были прокариотическими; они существуют и поныне в виде бактерий и сине-зеленых водорослей, и у них нет цитоскелета. Согласно одному из предположений [332], часть древнейших прокариот оказались каким-то образом связаны (возможно, «инфицированы») с неким видом спирохет (бактерий, перемещающихся с помощью нитеобразного хвоста, состоящего из цитоскелетных белков). Эти чуждые друг другу организмы постепенно «научились» жить вместе в симбиотической связи как единые эукариотические клетки. Так «спирохеты» превратились, в конечном счете, в цитоскелеты клеток – со всеми вытекающими последствиями для будущей эволюции, среди которых мы с вами!

⁷⁴ В.Э.: Прокариотами называются организмы с одной хромосомой (одной нитью ДНК) в клетке, а эукариотами – с несколькими хромосомами (и тем самым несколькими молекулами ДНК).

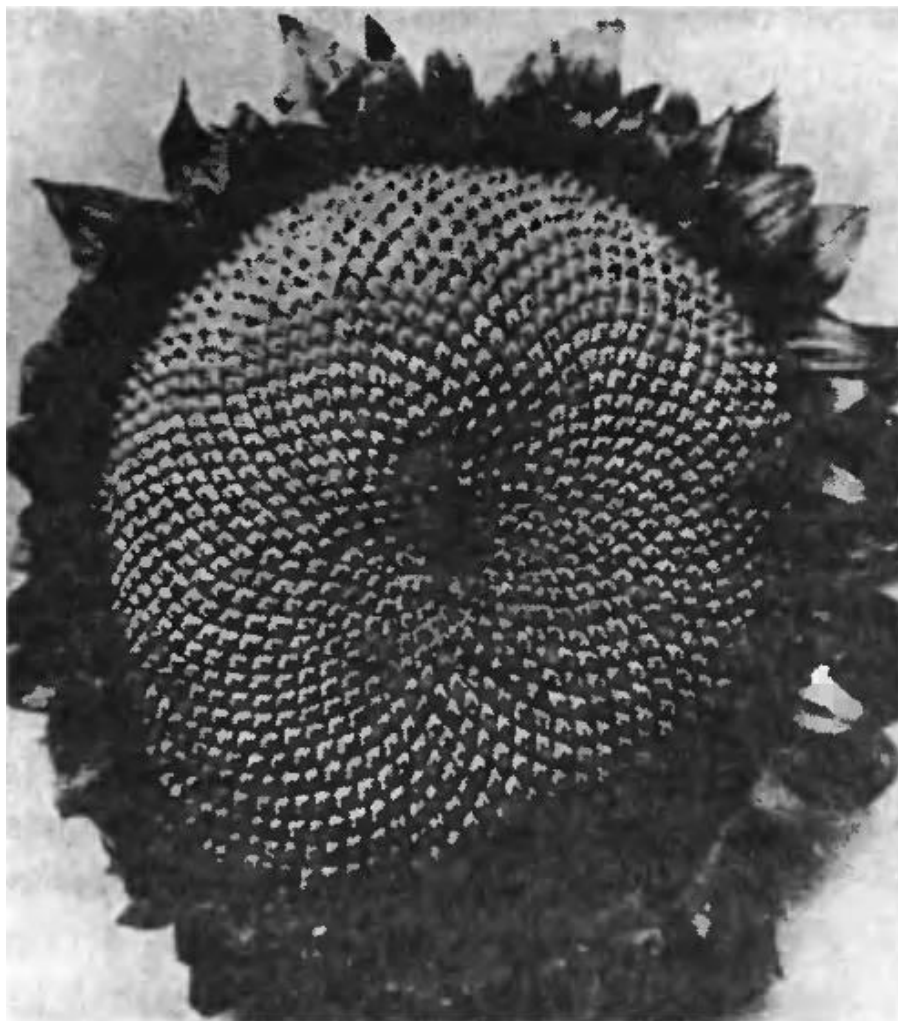


Рис. 7.7. Цветок подсолнечника. Как и во многих других растениях, отчетливо наблюдаются числа Фибоначчи. Во внешней области круга имеем 89 спиралей, закрученных по часовой стрелке, и 55 спиралей, закрученных против часовой стрелки. Ближе к центру появляются другие числа Фибоначчи.

Организация микротрубочек млекопитающих представляет интерес с математической точки зрения. На первый взгляд, число 13 не имеет какого-либо особого математического значения, однако это не совсем так. Оно принадлежит к знаменитой последовательности чисел Фибоначчи:

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, ...

где каждое последующее число получается сложением двух предыдущих. Это может показаться случайным совпадением, однако хорошо известно, что числа Фибоначчи в биологических системах не редкость (и в гораздо более крупном масштабе). Например, в еловых шишках, цветках подсолнечника и пальмовых стволах наблюдаются спиральные или винтовые структуры с взаимопроникновением левых и правых закручиваний, причем количество рядов, закрученных в одном направлении, и количество рядов, закрученных в другом направлении, суть два соседних числа Фибоначчи (см. рис. 7.7). (Если внимательно рассмотреть такую структуру от одного конца до другого, можно обнаружить «место перехода», где числа рядов сменяются на следующую пару соседних чисел Фибоначчи.) Любопытно, что гексагональный узор микротрубочек демонстрирует очень похожую особенность – в общем случае даже еще более точно, – причем состоит этот узор (по крайней мере, обычно) из 5 правых и 8 левых винтовых структур, как показано на рис. 7.8. На рис. 7.9 я попытался изобразить, как такие структуры могли бы «выглядеть» изнутри микротрубочки. Число 13 выступает здесь как общее количество витков в спирали: $5 + 8$. Любопытно также, что в двойных микротрубочках, встречающихся достаточно часто, внешний слой составной трубки обычно содержит 21 ряд димеров тубулина – следующее число Фибоначчи! (Не стоит, впрочем, чересчур увлекаться подобными построениями; например, в

пучках микротрубочек в ресничках и центриолях бывает и по 9 рядов димеров – число, определенно не принадлежащее последовательности Фибоначчи.)

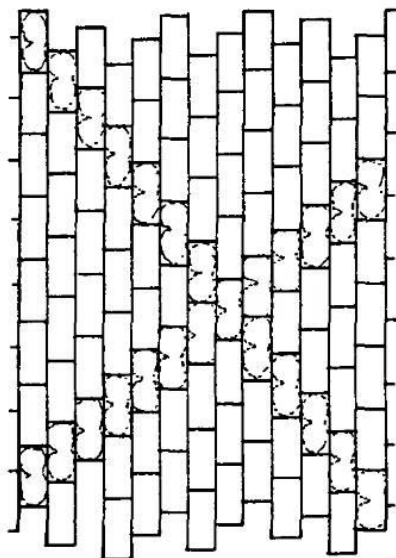


Рис. 7.8. Представим, что микротрубочка разрезана вдоль и затем развернута в полосу. Можно видеть, что молекулы тубулина располагаются вдоль наклонных линий, причем каждый новый виток смещен относительно предыдущего на 5 или 8 молекул (в зависимости от того, куда наклонена линия, вправо или влево).

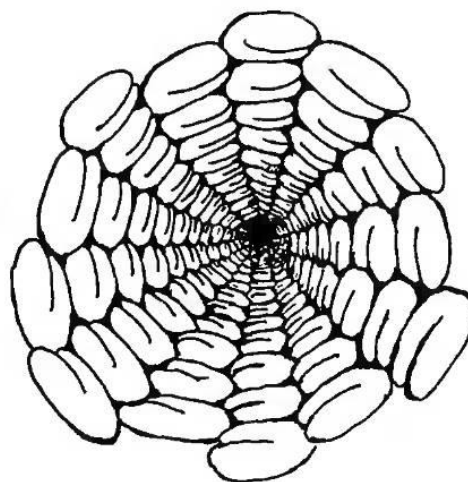


Рис. 7.9. Заглянем внутрь микротрубочки! Можно наблюдать спиральную структуру молекул тубулина 5 + 8.

Откуда в структуре микротрубочек берутся числа Фибоначчи? Относительно еловых шишек, цветков подсолнечника и т.д. существует несколько вполне убедительных теорий – кстати, среди тех, кто серьезно занимался этим вопросом, был Алан Тьюринг (см. [1981, с. 437]). Однако к случаю микротрубочек эти теории, вполне возможно, неприменимы, и для такого уровня следует искать какие-то другие объяснения. Коруга [228] высказал предположение, что числа Фибоначчи в структуре микротрубочки повышают эффективность ее как «информационного процессора». В самом деле, согласно Хамероффу с коллегами (которые пытаются нам это втолковать вот уже более десяти лет)⁷⁵, микротрубочки могут действовать как клеточные автоматы, передавая и обрабатывая сложные сигналы в виде волн различных состояний электрической поляризации молекул тубулина. Вспомним, что димеры тубулина могут существовать в двух (по крайней мере) различных конформационных состояниях и способных переходить из одного состояния в другое; последнее, очевидно, обуславливается сменой электрической поляризации молекулы на альтернативную. На состояние каждого димера воздействуют состояния поляризации каждого из шести его соседей (вследствие ван-дер-ваальсовых взаимодействий между ними), т.е. существуют вполне конкретные правила, определяющие конформацию каждого димера через конформации его соседей. Благодаря этому обстоятельству, каждая микротрубочка способна осуществлять передачу и обработку любого рода сообщений. С распространением сигналов, похоже, как-то связана транспортировка различных молекул вдоль микротрубочек, а также всевозможные соединения между соседними микротрубочками в виде своеобразных белковых «мостиков» – так называемые MAP (от *microtubule associated proteins*;⁷⁶ см. рис. 7.10. Коруга доказывает, что в случае структуры с числами Фибоначчи, подобной той, что реально наблюдается в микротрубочках, информация обрабатывается особенно эффективно.

⁷⁵ См. [184], [183] и [186]. В недавней работе [371] указывается, что такая обработка информации может осуществляться только в микротрубочках, организованных в виде так называемых «А-решеток» (именно эта структура и показана на рис. 7.4, 7.8 и 7.9), тогда как более распространенная организация в виде «В-решетки» (с характерным «швом», проходящим вдоль трубки, см. [254]), для обработки информации не годится.

⁷⁶ Белки, ассоциированные с микротрубочками (англ.) – Прим. перев.

Должно быть, для такой организации микротрубочек и в самом деле имеется серьезная причина, поскольку, несмотря на некоторый разброс в числах, наблюдаемый в эукариотических клетках вообще, микротрубочки почти всех млекопитающих составлены именно из 13 рядов димеров.

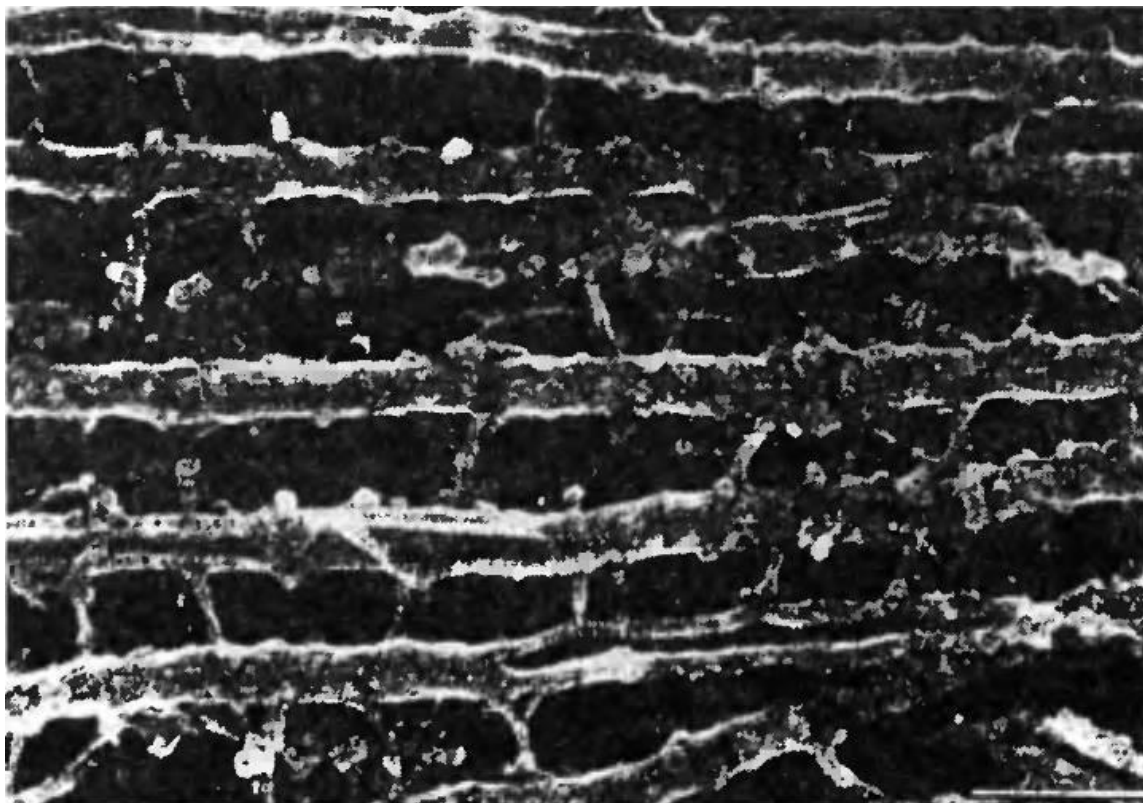


Рис. 7.10. Микротрубочки обычно соединяются друг с другом посредством «мостиков» из так называемых белков, ассоциированных с микротрубочками (МАР).

Для чего микротрубочки нейронам? Каждый отдельный нейрон имеет свой цитоскелет. Какова его роль? Я уверен, что будущим исследователям предстоит сделать в этой области еще немало открытий, однако кое-что мы знаем уже сейчас. В частности, микротрубочки нейронов могут быть очень и очень длинными (по сравнению с диаметром нейрона, который составляет лишь 25–30 нм) – до нескольких миллиметров или даже длиннее. Более того, в зависимости от обстоятельств они способны расти или сокращаться, а также транспортировать молекулы нейромедиаторов. Внутри аксонов и дендритов также имеются микротрубочки. Хотя, как правило, на всю длину аксона каждая отдельная микротрубочка не тянется, они образуют сообщающиеся сети, охватывающие всю клетку, соединяясь между собой посредством упомянутых выше МАР-мостиков. Микротрубочки, по-видимому, ответственны за поддержание интенсивности синапсов и, несомненно, за изменение этой интенсивности в случае необходимости. Более того, они, похоже, управляют ростом новых нервных окончаний, направляя их к точкам соединений с другими нервными клетками.

Поскольку после окончательного формирования мозга деление нейронов прекращается, необходимости в этой функции centrosомы здесь нет. В centrosомах нейронов, расположенных вблизи ядра, часто вовсе нет центриолей. Микротрубочки тянутся от centrosом к окрестности пресинаптических окончаний аксона, а также в другую сторону, к дендритам и, через сокращающиеся актиновые нити, к дендритным шипикам, часто образующим постсинаптические окончания синаптической щели 7.12. Эти шипики способны расти и вырождаться, что, по-видимому, является существенным элементом общей пластичности мозга, благодаря которой система взаимных соединений в мозге подвергается непрерывным тонким изменениям. Насколько мне известно, существуют убедительные экспериментальные свидетельства важной роли микротрубочек в управлении пластичностью мозга.



Рис. 7.11. Молекула клатрина (похожая общей структурой на фуллерен, но составленная не из атомов углерода, а из более сложных субструктур – белковых тримеров, называемых трискелионами). Изображенный на рисунке клатрин напоминает внешне обыкновенный футбольный мяч.

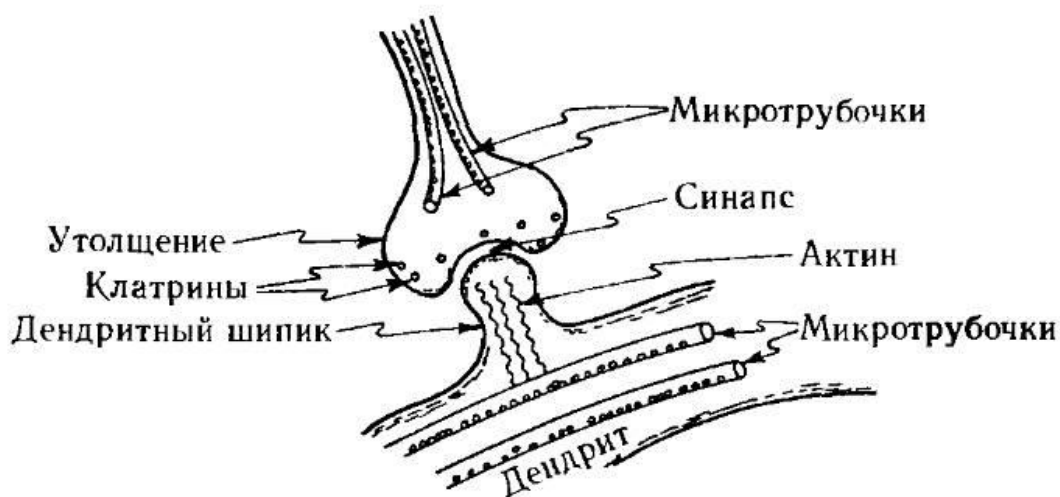


Рис. 7.12. Клатрины, подобные тому, что изображен на рис. 7.11, располагаются (вместе с окончаниями микротрубочек) в пресинаптическом утолщении аксона и, по всей видимости, участвуют в управлении интенсивностью синапса; также на интенсивность синапса влияют сокращающиеся актиновые нити в дендритных шипиках, управляемых микротрубочками.

Упомянем еще об одном любопытном факте. В пресинаптических окончаниях аксонов содержатся некие ассоциированные с микротрубочками вещества, «работа» которых связана с высвобождением нейромедиаторов, а молекулы весьма примечательны с геометрической точки зрения. Эти вещества – клатрины – строятся из белковых тримеров (так называемых клатриновых трискелионов), этих полипептидных трехлучевых звезд. Объединяясь в молекулу клатрина, трискелионы образуют геометрически правильные структуры, идентичные по общему строению многоатомным молекулам углерода, называемым «фуллеренами» (а также «бакиболами», или «мячами Баки»⁷⁷) из-за их внешнего сходства со знаменитыми геодезическими куполами, которые проектировал и возводил американский архитектор Бакминстер Фуллер.⁷⁸ Клатрины, впрочем, гораздо больше фуллереновых молекул, поскольку одному атому углерода в фуллерене соответствует в клатрине целый трискелион, состоящий из нескольких аминокислот. Те клатрины, что заняты в высвобождении нейромедиаторов в синапсах, имеют форму усеченного

⁷⁷ Англ. *Bucky balls*. – Прим. перев.

⁷⁸ См. [229] (доступно о клатринах) и [66] (популярное описание фуллеренов).

икосаэдра – всем нам знакомого многогранника, по образу и подобию которого делают современные футбольные мячи (см. рис. 7.11 и 7.12).

В одном из предыдущих параграфов был поставлен важный вопрос: что управляет изменением интенсивности синапсов и определяет места размещения функционирующих синаптических связей? Учитывая имеющиеся свидетельства, можно уверенно предположить, что центральную роль в этих процессах играет цитоскелет.⁷⁹ Как же это предположение может нам помочь в поиске невычислимой сущности разума? Пока что оно, похоже, говорит нам лишь о том, что потенциальная вычислительная мощность мозга оказывается гораздо большей, чем можно было бы ожидать, используйте мозг в качестве простейших вычислительных блоков «цельные» нейроны.

В самом деле, если простейшими вычислительными блоками мы теперь будем считать димеры тубулина, то придется предположить, что потенциальная вычислительная мощность мозга просто невероятно превосходит всё то, что предполагали самые смелые теоретики от ИИ. Основываясь на «цельнонейронной» модели, Ханс Моравек в своей книге «Дети разума» [267] предположил, что человеческий мозг может в принципе достичь производительности порядка 10^{14} операций в секунду, но не более того; это при том, что в мозге имеется около 10^{11} функционирующих нейронов, каждый из которых способен посылать примерно по 10^3 сигналов в секунду (см. §1.2 {= МОИ № 17}). Если же в качестве элементарного вычислительного блока взять димер тубулина, то следует учесть, что на каждый нейрон приходится около 10^7 димеров; соответственно, элементарные операции теперь выполняются где-то в 10^6 раз быстрее, в результате чего получаем 10^{27} операций в секунду. Возможно, производительность современных компьютеров и вправду уже начинает приближаться к первой цифре, 10^{14} операций в секунду (как весьма убежденно доказывают Моравек и его единомышленники), однако, несмотря на все эти успехи, достичь в обозримом будущем производительности 10^{27} операций в секунду не представляется возможным.

Разумеется, можно смело утверждать, что мозг работает далеко не со стопроцентной «микротрубочковой» эффективностью, какую приведенные выше цифры предполагают. Тем не менее, ясно, что возможность «микротрубочкового вычисления» (см. [183]) позволяет совсем по-иному взглянуть на некоторые из аргументов в пользу неминуемого наступления эпохи искусственного интеллекта человеческого уровня. Можем ли мы теперь поверить хотя бы в то, что уже сегодня возможно⁸⁰ численно воспроизвести умственную деятельность червя нематоды, только потому, что мы вроде бы «закартографировали» и численно смоделировали его нервную систему? Как было отмечено в §1.15 {= МОИ № 17}, умственные способности обычного муравья намного превосходят всё то, что на настоящий момент реализовано посредством стандартных ИИ-процедур. Впору поинтересоваться, сколько же муравей выигрывает в производительности благодаря гигантскому массиву своих «микротрубочковых информационных нанопроцессоров», если сравнивать с тем, чего он смог бы добиться, располагая он лишь «переключателями цельнонейронного типа». Что до парамедии, то тут, как вы понимаете, оснований для предъявления иска нет.

Однако аргументы, представленные в первой части, предполагают гораздо более сильное заявление. Я утверждаю, что способность человека к пониманию выходит за рамки какой угодно вычислительной схемы. Если мозгом человека управляют микротрубочки, то в микротру-

⁷⁹ В.Э.: Все эти сведения и рассуждения, приводимые Пенроузом, очень интересны; я всегда любил опускаться как можно глубже к первоисточкам явлений (это стиль «механистического материализма»). Но в то же время нужно отдавать себе отчет и в том, что это принципиально не может привести к пониманию сущности интеллекта и «сознания». Для понимания интеллекта безразличны все эти нейроны, аксоны, синапсы, микротрубочки и тубулины. Это всё равно как если бы человек, желающий понять устройство и работу операционной системы WINDOWS открыл бы крышку компьютера и стал бы изучать: вот, тут идет медный проводок, а тут разъем на девять дырочек, а здесь припаяно оловом... Для освоения операционной системы нужны совсем другие понятия: программы, файлы, окна, интерфейсы и т.д. Точно так же для понимания, что такое разум, нужны в первую очередь такие понятия как: мозговая программа, структуры данных, с которыми она оперирует, ее потенциальные продукты, взаимодействие таких программ, самопрограммирование и т.д. А реализовано ли всё это на нейронах, микротрубочках или на чем-нибудь еще – это не имеет никакого значения. Я думаю, что «мировая наука» в вопросе интеллекта уже полстолетия топчется на месте именно потому, что не отдает себе отчета в названном выше вопросе и продолжает упорно изучать клетки мозга, вместо того, чтобы построить концептуальную, «программистскую» модель интеллекта.

⁸⁰ См. [363].

бочковых процессах должно быть что-то принципиально отличное от простого вычисления. Я утверждал, что такая невычислимая активность должна быть следствием достаточно макроскопической квантовой когерентности, объединенной неким тонким образом с макроскопическим поведением – с тем, чтобы обеспечить возможность протекания в системе тех новых физических процессов, что придут на смену бытующей в современной физике паллиативной R-процедуре. В качестве первого шага мы должны выяснить, какова же подлинная роль квантовой когерентности в цитоскелетной активности.

§7.5. Квантовая когерентность внутри микротрубочек

Есть ли у нас основания предполагать, что внутри микротрубочек существует квантовая когерентность? Вернемся ненадолго к обсуждавшимся в §7.1 идеям Фрелиха [131] о возможности феноменов квантовой когерентности в биологических системах. Он утверждал, что если энергия метаболической активности достаточно велика, а диэлектрические свойства задействованных в процессе материалов достаточно экстремальны, то существует возможность возникновения макроскопической квантовой когерентности, аналогичной той, что возникает в феноменах сверхпроводимости и сверхтекучести – иногда объединяемых общим термином конденсация Бозе–Эйнштейна – даже при относительно высоких температурах, какие, собственно, и характерны для биологических систем. Как выяснилось, не только метаболическая энергия достаточно велика, а диэлектрические свойства просто необыкновенно экстремальны (именно этот полученный в 1930-е годы поразительный экспериментальный результат и навел Фрелиха на соответствующие размышления), но и имеется с некоторых пор даже прямое подтверждение предсказанных Фрелихом внутриклеточных колебаний с частотой 10^{11} гц [177].

В конденсате Бозе–Эйнштейна (который возникает еще и при работе лазера) большое количество частиц совместно образуют одно квантовое состояние. Это состояние описывается волновой функцией того же вида, что и в случае единичной частицы, – только здесь эта функция относится сразу ко всей совокупности образующих состояние частиц. Вспомним о непостижимой с классической точки зрения природе квантового состояния одной-единственной квантовой частицы (§5.6, §5.11). В конденсате Бозе–Эйнштейна вся состоящая из множества частиц система ведет себя как одно целое, и ее квантовое состояние ничем не отличается от квантового состояния единичной частицы, меняется только масштаб. В этом увеличенном масштабе и возникает когерентность, при которой многие удивительные свойства квантовых волновых функций проявляются на макроскопическом уровне.

Первоначально Фрелих полагал, что такие макроскопические квантовые состояния должны, скорее всего, возникать в клеточных мембранах,⁸¹ однако теперь перед нами открывается другая (и, судя по всему, более правдоподобная) возможность: микротрубочки. Причем эта возможность, похоже, подтверждается экспериментально.⁸² Еще в 1974 году Хамерофф предположил [182], что микротрубочки могут действовать как «диэлектрические волноводы». Хочется верить, что Природа снабдила цитоскелетные структуры пустыми трубками отнюдь не просто так. Возможно, сами трубки обеспечивают эффективную изоляцию, позволяющую квантовому состоянию внутри трубки избегать сцепления с окружением в течение достаточно продолжительного времени. В этой связи интересно отметить, что Эмилио дель Джудиче и его коллеги из Миланского университета утверждали [79], что в результате квантового эффекта самофокусировки электромагнитных волн в цитоплазме клетки сигналы сосредотачиваются внутри области, диаметр которой не превышает внутреннего диаметра микротрубочки. Это может послужить еще одним подтверждением волноводной теории, однако возможно также, что этот эффект участвует в собственно образовании микротрубочек.

Тут имеется еще один интересный момент, и связан он с природой воды. Сами трубки, похоже, всегда остаются пустыми – факт сам по себе интересный и, возможно, значимый, особенно если учесть, что мы предполагаем найти внутри этих трубок управляемые условия,

⁸¹ Убежденным сторонником идеи, согласно которой конденсация Бозе–Эйнштейна способна привести к формированию того «отдельного самоощущения», которое можно считать характерной особенностью сознания, является Иэн Маршалл [258], см. также [397], [398] и [243]. Ранее идею глобальных (существенно квантовых) макроскопических когерентных «голографических» процессов в мозге активно поддерживал Карл Прибрам [317, 318, 319].

⁸² Например, полученное Хамероффом время переключения димеров тубулина, по-видимому, согласуется с частотой, предсказанной Фрелихом ($\sim 5 \times 10^{10}$ Гц).

благоприятные для некоторого рода коллективных квантовых колебаний. «Пустые» в данном случае означает, что трубки по большей части заполнены просто водой (даже без растворенных в ней ионов). Можно было бы отметить, что «вода» (с характерным для жидкости беспорядочным движением молекул) вряд ли является образцом организованной структуры – во всяком случае достаточно организованной для возникновения в ней квантовокогерентных колебаний. Однако вода, содержащаяся в клетках, совсем не похожа на ту воду, которой заполнены океаны – неупорядоченное скопище несвязных, случайным образом движущихся молекул. Некоторая часть воды в клетках – такая именно часть, вопрос спорный – находится в упорядоченном состоянии (такую воду иногда называют «визинальной», см. [183], с. 172). Такое упорядоченное состояние воды наблюдается на расстоянии до 3 нм от внешних поверхностей цитоскелета, иногда дальше. Представляется вполне разумным предположить, что вода остается упорядоченной и внутри микротрубочек, а это весьма благоприятствует возможности возникновения в этих трубках квантовокогерентных колебаний. (См., в частности, [213]).

Каким бы ни оказался окончательный статус этих захватывающих идей, одно мне совершенно ясно: вероятность того, что полностью классическое описание цитоскелета способно адекватно объяснить его поведение, ничтожно мала. С нейронами дело обстоит иначе, там описания в исключительно классическом духе и в самом деле представляются, по большому счету, вполне допустимыми. В самом деле, при ознакомлении с современными исследованиями цитоскелетных процессов бросается в глаза тот факт, что авторы то и дело прибегают к «помощи» квантовомеханических концепций, и я почти не сомневаюсь, что в будущем эта тенденция только усилится.

Впрочем, ясно также и другое: многие пока еще далеко не убеждены в том, что какие бы то ни было квантовые эффекты могут иметь столь непосредственное отношение к функционированию цитоскелета или мозга вообще. Даже если допустить, что работа микротрубочек и сознательная деятельность мозга суть прямой результат неких существенных эффектов квантовой природы, продемонстрировать эти самые эффекты посредством какого-нибудь убедительного эксперимента отнюдь не просто. Возможно, нам повезет, и удастся приспособить к микротрубочкам некоторые из стандартных процедур, которые применяются сегодня для демонстрации присутствия конденсатов Бозе–Эйнштейна в физических системах – например, при высокотемпературной сверхпроводимости. С другой стороны, может и не повезти – и тогда придется искать какие-то принципиально новые подходы. Возможно, нам удастся показать, что возбуждение микротрубочек предполагает ту же нелокальность, какую мы наблюдаем в ЭПР-феноменах (неравенства Белла и т.д., см. §5.3, §5.4, §5.17), поскольку классического (локального) объяснения подобных эффектов не существует. Можно, например, выполнить измерения в двух точках одной микротрубочки (или же разных микротрубочек) и получить результат, необъяснимый с точки зрения классической независимости событий в этих двух точках.

Каким бы ни было наше отношение к подобным предположениям, очевидно, что исследования микротрубочек еще даже не вышли из пеленок. И я нисколько не сомневаюсь, что они преподнесут нам в недалеком будущем множество потрясающих сюрпризов.

§7.6. Микротрубочки и сознание

Есть ли прямые свидетельства того, что феномен сознания в той или иной мере обусловлен деятельностью цитоскелета и, в частности, его микротрубочек? Как ни странно, есть. Причем получено оно путем обращения к проблеме сознания с неожиданной стороны – с попытки выяснить, что может послужить причиной его отсутствия.

В поисках ответов на вопросы, касающиеся физических основ сознания, важную роль играет исследование причин и способов, весьма избирательно это самое сознание «отключающих». На такое способны, например, препараты для общего наркоза, причем это отключение абсолютно обратимо, главное – не превысить допустимую концентрацию. Замечательно то, что к общему наркозу приводит применение множества самых разных веществ, никак, казалось бы, не связанных друг с другом химически. К таким веществам относятся закись азота (N_2O), эфир ($CH_3CH_2OCH_2CH_3$), хлороформ ($CHCl_3$), галотан ($CF_3CHClBr$), изофлуран ($CHF_2OCHClCF_3$) и даже химически инертный (!) газ ксенон.

Если за общий наркоз «ответственна» не «химия», то что же тогда? Помимо химических взаимодействий, на молекулы действуют и другие силы, гораздо более слабые – например, так называемые ван-дер-ваальсовы силы. Силы Ван-дер-Ваальса – это слабое притяжение между

молекулами, обладающими электрическим дипольным моментом («электрическим» эквивалентом магнитного дипольного момента, определяющего силу обычного магнита). Вспомним, что димеры тубулина могут находиться в двух различных конформациях. Конформации эти, по всей видимости, обусловлены тем, что в центре димера (в его «безводной» области) имеется электрон, который может занимать одно из двух возможных положений. От положения электрона зависит как общая форма диполя, так и его электрический момент. На способность молекул димера «переключаться» из одной конформации в другую влияют ван-дер-ваальсовы силы притяжения соседних молекул. Было высказано предположение [185], что действие анестезирующих веществ основано на ван-дер-ваальсовых взаимодействиях (в «гидрофобных» – водоотталкивающих – областях, см. [123]), которые препятствуют нормальным переключениям тубулина. Таким образом, как только анестезирующий газ просачивается в нервную клетку, его электрические дипольные свойства (которые вовсе не обязательно должны находиться в прямой зависимости от его химических свойств) останавливают работу микротрубочек. В общем и целом получается весьма правдоподобная картина действия общего наркоза. Ввиду очевидного отсутствия детального общепринятого описания действия анестетиков, достаточно логичной представляется точка зрения, согласно которой причиной потери сознания является ван-дер-ваальсово воздействие анестезирующих веществ на конформационную динамику белков мозга. Высока вероятность того, что такими белками являются именно димеры тубулина в микротрубочках нейронов – и что к потере сознания приводит именно обусловленное упомянутым воздействием прекращение функционирования микротрубочек.⁸³

В поддержку предположения, что общие анестетики воздействуют непосредственно на цитоскелет, отметим, что эти вещества «отключают» не только «высших животных», таких как млекопитающие и птицы. Точно так же (и примерно в тех же концентрациях) действует наркоз на парамеций, амёб и даже на зеленых слизевиков (что наблюдал Клод Бернар еще в 1875 году [27]). Подвергаются ли воздействию реснички парамеции или ее центриоль, в любом случае «поражается» какая-либо часть цитоскелета. Если мы допускаем, что поведением такого одноклеточного животного действительно управляет цитоскелет, то, во избежание противоречий, следует допустить и то, что анестезирующие вещества действуют именно на цитоскелет.

Я, разумеется, не утверждаю, что таких одноклеточных животных следует рассматривать как обладающих сознанием. Сознание – это совершенно иное дело. Вполне возможно, что для возникновения сознания, помимо должным образом функционирующих цитоскелетов, необходима еще куча самых разных вещей. Я сейчас говорю лишь о том, что, согласно вышеприведенным рассуждениям, без работающего цитоскелета ни о каком сознании речь не может идти вообще. При прекращении функционирования системы цитоскелетов сознание мгновенно выключается – столь же мгновенно возвращаясь, как только функции цитоскелета восстанавливаются, при условии, что за прошедшее время не возникло каких-либо повреждений иного рода. Разумеется, нам по-прежнему не дает покоя вопрос, может ли в самом деле обладать некоей зачаточной формой сознания парамеция – или, коли уж на то пошло, отдельно взятая клетка человеческой печени – однако представленных соображений для ответа явно не достаточно. В любом случае, форма сознания должна самым фундаментальным образом определяться тонкой нейронной организацией мозга. Более того, если бы от этой организации ничего не зависело, то в нашей печени обитало бы ничуть не худшее сознание, чем в нашем мозге. Тем не менее, как недвусмысленно показывают представленные аргументы, важна не только нейронная организация мозга. Для наличия сознания жизненно необходима и цитоскелетная «начинка» этих самых нейронов.

Можно предположить, что для возникновения сознания в общем случае важен не сам цитоскелет как таковой, но некая существенная физическая активность,⁸⁴ которую хитроумные биологи умудрились разглядеть в микротрубочковых процессах. Что же это за существенная физическая активность? Вся аргументация первой части книги подводила нас, в сущности, к простому выводу: если мы намерены подвести под процесс сознания физический фундамент, то

⁸³ В.Э.: Всё это хорошо, но всё это аргументация примерно такого рода, как если бы человек, пытающийся изучить операционную систему WINDOWS, выдернул бы проводок в компьютере и воскликнул: «Ага! Экран WINDOWS-а погас! Значит, работа операционной системы основывается на этом проводке!».

⁸⁴ В.Э.: Вот именно – активность! И эту активность можно изучать саму по себе – в абстрактном виде, концептуально, в категориях информатики.

нам понадобится нечто большее, чем численное моделирование.⁸⁵ В предыдущих главах второй части мы успели договориться до того, что искать это большее следует на границе между квантовым и классическим уровнями, как раз там, где современная физика предлагает (за неимением лучшего) воспользоваться процедурой R, а я настаиваю на разработке новой физической теории – теории процедуры OR. В настоящей главе мы попытались отыскать в мозге такое место, где квантовые процессы могли бы определять классическое поведение, и, похоже, пришли к выводу, что этот квантово-классический интерфейс осуществляет фундаментальное воздействие на поведение мозга посредством цитоскелетного управления интенсивностью синаптических связей. Попробуем рассмотреть эту картину более основательно.

§7.7. Модель разума

Как уже отмечалось в §7.1, мы вполне можем согласиться с тем, что сами по себе нервные сигналы можно рассматривать как исключительно классические феномены, – особенно если предположить, что такие сигналы настолько возмущают окружение, что квантовая когерентность на этом этапе не может сохраняться сколько-нибудь долго. Допустим далее, что синаптические связи и их интенсивность всегда остаются неизменными; в этом случае воздействие любого возбужденного нейрона на следующий нейрон также поддается классическому описанию – за исключением, впрочем, случайной составляющей, которая появляется на этом этапе. Активность мозга в таких условиях целиком и полностью вычислима, т.е. в принципе возможно построить его численную модель. Это не значит, что такая модель будет в точности имитировать деятельность того конкретного мозга, схема синаптических связей которого совпадает со схемой модели (вследствие наличия упомянутых случайных составляющих), однако модель сможет воспроизвести типичную активность такого мозга и, как следствие, предсказать типичное поведение того или иного индивидуума, этим мозгом управляемого⁸⁶ (см. §1.7 {= МОИ № 17}). Более того, утверждение это носит по большей части чисто принципиальный характер. Ничто не указывает на то, что при современном уровне развития технологий такую численную модель действительно можно построить. Я также предполагаю, что случайные составляющие подлинно случайны. Возможность привлечения дуалистического внешнего «разума» с целью воздействия на упомянутые случайности здесь не рассматривается вовсе (см. §1.7).

Таким образом, получаем (по крайней мере, предварительно), что при условии постоянства синаптических связей мозг действительно работает как своего рода компьютер – пусть и со встроенными случайными составляющими. Как мы показали в первой части, в высшей степени невероятно, чтобы такая схема могла когда-либо послужить основой для построения модели человеческого сознательного понимания. С другой стороны, если специфические синаптические связи, определяющие данный конкретный нейронный компьютер, постоянно меняются, а управление этими изменениями возложено на некий невывислимый процесс, то вполне возможно, что такая расширенная модель действительно окажется способна воспроизвести поведение осознающего себя мозга.⁸⁷

⁸⁵ В.Э.: «Численное моделирование»... Такие словосочетания, употребляемые Пенроузом, выдают, что у него все-таки нет четкого и ясного понимания о программах и их работе. Ну разве работу операционной системы WINDOWS можно назвать «численным моделированием»? Если человек так думает – ну, значит, не понимает он, что такое операционная система!

⁸⁶ В.Э.: А разве у нас задача предсказать (!) поведение индивида (будь то типичное или нетипичное)? (Вот как Пенроуз, оказывается, видит постановку задачи – отсюда и его «моделирование»!). Но для ИИ стоят две совсем иные задачи: **1)** понять, как работает естественный интеллект; **2)** выполнить эту же (т.е. аналогичную) работу на искусственном устройстве. И тогда «случайные составляющие» роли не играют. Для естественного интеллекта (какого-нибудь конкретного человека) они – просто составная часть этой личности. А искусственная личность всё равно будет совсем другой, самостоятельной личностью, которая даже и не пытается копировать какого-то человека. Если же мы захотели бы поставить перед собой еще и третью задачу ИИ: **3)** изготовить копию одного конкретного человека, – то эта задача, конечно, сложнее первых двух. Тогда «случайные составляющие» уже начали бы играть роль – и определяли бы некоторое различие между оригиналом и копией. Масштаб этих различий, разумеется, определялся бы технологией: чем выше технология копирования, тем незаметнее различия. Но тут открываются такие просторы для рассуждений, что пускаться в них сейчас не время.

⁸⁷ В.Э.: Этот «невывислимый процесс» нужен Пенроузу только из-за несчастной теоремы Гёделя... На самом деле «управление изменениями» мозгового компьютера – такой же «вывислимый» процесс, как и все остальные (и именно он и есть то, что в Веданской теории называется самопрограммированием).

Что же это может быть за невычислимый процесс? Здесь следует вспомнить о глобальной природе сознания. Если, скажем, взять 10^{11} независимых цитоскелетов, каждый из которых внесет в общее дело свою невычислимую долю, то пользы от этого нам будет немного. Согласно аргументам первой части, невычислимое поведение и в самом деле неразрывно связано с процессом сознания – по крайней мере, настолько, чтобы можно было определенно утверждать, что некоторые проявления сознания, прежде всего способность понимать, невычислимы в принципе. Однако это не имеет никакого отношения ни к отдельным цитоскелетам, ни к отдельным микротрубочкам внутри цитоскелета. Никто в здравом уме не станет предполагать, что вот этот цитоскелет или вот та микротрубочка в состоянии хоть что-нибудь «понять» в рассуждениях Гёделя! Понимание работает в гораздо более глобальном масштабе, и если в процессе каким-то образом участвуют цитоскелеты, то этот феномен должен носить коллективный характер, задействуя огромное количество цитоскелетов одновременно.

Согласно Фрелиху, биологические макроскопические коллективные квантовые феномены может быть, той же природы, что и конденсат Бозе–Эйнштейна, определенно возможны, даже внутри «горячего» мозга (см. также [258]). Здесь же мы предполагаем, что в относительно «крупных» квантово-когерентных состояниях должны участвовать не только молекулы внутри отдельных микротрубочек – такое состояние должно распространяться от одной микротрубочки к другой. Квантовая когерентность должна не просто «охватить» одну-единственную микротрубочку (пусть и, как мы помним, весьма протяженную), но перейти дальше, в результате чего большое количество различных микротрубочек в цитоскелете нейрона – если не все – должны образовать единое квантовокогерентное состояние. Мало того, квантовая когерентность должна преодолеть «синаптический барьер» между «своим» нейроном и следующим. Не много проку в глобальности, которая разбросана по изолированным друг от друга клеткам! Самостоятельная единица сознания может возникнуть, в нашем описании, лишь тогда, когда квантовая когерентность в том или ином виде получает возможность распространяться на некую существенную (по меньшей мере) часть всего мозга.

И вот такое вот поразительное – я бы даже сказал, почти невероятное – устройство Природе пришлось создавать с помощью одних лишь биологических средств. Я, впрочем, убежден (и не без оснований), что у нее таки всё получилось, и главным свидетельством тому может служить факт наличия у нас разума. Нам еще многое предстоит понять в биологических системах и в том, как они творят свои чудеса – многое в биологии далеко превосходит возможности современных физических технологий. (Взять, к примеру, крохотного, в миллиметр величиной, паучка, искусно плетущего замысловатую паутину.) Вспомним и об экспериментах Аспекта (см. §5.4), в которых наблюдались (с помощью вполне физических устройств) кое-какие квантовокогерентные эффекты (ЭПР-сцепленность пар фотонов), действующие на расстоянии нескольких метров. Несмотря на технические трудности, связанные с проведением экспериментов, позволяющих обнаружить такие «дальнодействующие» квантовые эффекты, не следует исключать возможность, что Природа смогла отыскать биологические способы как для этого, так и для чего-нибудь еще. Присущую жизни «изобретательность» нельзя недооценивать.

Как бы то ни было, представляемые мною аргументы предполагают не только макроскопическую квантовую когерентность. Они предполагают, что биологическая система, называемая человеческим мозгом, каким-то образом ухитрилась воспользоваться в своих интересах физическими феноменами, человеческой же физике неизвестными! Эти феномены когда-нибудь опишет несуществующая пока теория OR, которая свяжет вместе классический и квантовый уровни и, я убежден, заменит временную R-процедуру иной, чрезвычайно тонкой и невычислимой (но всё же, несомненно, математической) физической схемой.

То, что физики-люди, по большей части, пока еще ничего не знают о вышеупомянутой несуществующей теории, разумеется, не может заставить Природу отказаться от ее применения в своих биологических построениях. Она пользовалась принципами ньютоновской динамики задолго до Ньютона, электромагнитными феноменами задолго до Максвелла и квантовой механикой задолго до Планка, Эйнштейна, Бора, Гейзенберга, Шрёдингера и Дирака – в течение нескольких миллиардов лет! Лишь по причине, свойственной нашему веку нелепой самонадеян-

Всякое программирование компьютера вообще всегда есть «внесение изменений» в него – и не важно, что именно это за изменения, какова их физическая природа. (Важно, что эти изменения становятся программой для его дальнейшей работы). В случае САМОпрограммирования эти изменения осуществляет сам компьютер (одна его часть вносит изменения в другую его часть – или, что то же самое, одна программа создает другую программу).

ности, столь многие сегодня пребывают в уверенности, что нам известны все фундаментальные принципы, лежащие в основе каких угодно тонких биологических процессов.⁸⁸ Когда какой-нибудь живой организм по счастливой случайности натывается на такой тонкий процесс, он начинает его активно применять и, возможно, получает в результате некие преимущества перед своими менее удачливыми соседями. Тогда Природа благословляет этот организм вместе со всеми его потомками и позволяет новому тонкому физическому процессу сохраниться в последующих поколениях – посредством, например, такого мощного инструмента, как естественный отбор.

Когда появились первые эукариотические клетки-животные, они, должно быть, обнаружили, что наличие у них примитивных микротрубочек дает им огромные преимущества. В результате возникло (посредством тех самых процессов, о которых мы здесь говорим) некое организующее воздействие, которое, возможно, привело к развитию зачатков способности к своего рода целенаправленному поведению, что помогло им выжить и вытеснить лишенных микротрубочек конкурентов. Называть такое воздействие «разумом», конечно же, еще рано; и всё же оно возникло, как я полагаю, благодаря некоему тонкому пограничному взаимодействию между квантовыми и классическими процессами. Тонкостью же своей это взаимодействие обязано хитроумному физическому процессу OR – по-прежнему в подробностях нам неизвестному, – который в условиях не столь тонкой организации принимает вид того грубого квантово-механического R-процесса, которым мы пока за неимением лучшего пользуемся. Далекие потомки тех клеток-животных – нынешние парамеции и амёбы, а также муравьи, лягушки, цветы, деревья и люди – сохранили преимущества, которыми этот хитроумный процесс одарил древних эукариотов, и добавили новые, отвечающие новым многочисленным и самым разнообразным целям. Только будучи наложен на высокоразвитую нервную систему, этот процесс оказался, наконец, в состоянии реализовать свой гигантский потенциал – дав начало тому, что мы, теперь уже с полным правом, называем «разумом».

Итак, мы допускаем, что в глобальной квантовой когерентности может участвовать вся совокупность микротрубочек в цитоскелетах большого семейства нейронов мозга – или, по крайней мере, что между состояниями различных микротрубочек в мозге наличествует достаточная квантовая сцепленность,⁸⁹ – т.е. полностью классическое описание коллективного поведения этих микротрубочек невозможно. Можно представить, что в микротрубочках возникают сложные «квантовые колебания» там, где изоляции, обеспечиваемой самими трубками, достаточно для того, чтобы квантовая когерентность сохранялась хотя бы частично. Велик соблазн предположить, что «клеточноавтоматные» вычисления, которые, по мнению Хамероффа и его коллег, должны выполняться на поверхности трубок, могут оказаться связанными с предполагаемыми квантовыми колебаниями внутри трубок (например, теми, что описаны в [79] или в [213]).

Заметим в этой связи, что частота, предсказанная Фрëлихом для коллективных квантовых колебаний (и подтвержденная наблюдениями Грундлера и Кайльмана [177]) – порядка 5×10^{10} гц (т.е. 5×10^{10} колебаний в секунду), – практически совпадает с частотой, с которой, по Хамероффу, димеры тубулина в микротрубочковых клеточных автоматах «переключаются» из одного состояния в другое. Таким образом, если внутри микротрубочек и в самом деле работает фрëлихов механизм, то следует признать, что какая-то связь между этими двумя типами активности действительно имеется.⁹⁰

⁸⁸ В.Э.: Если я знаю, как осуществить программными средствами любой феномен разума и «сознания», то зачем мне искать какие-то «новые фундаментальные принципы», использованные в биологических системах? А вопрос о том, известны ли сейчас науке все такие принципы или нет, – это вопрос побоку, он меня не касается.

⁸⁹ В.Э.: Ну хорошо – предположим, что так. А дальше что? КАК из всего этого возникает, например, понятие числа? Или любое другое конкретное проявление интеллекта? – А дальше ничего. Пустота. Никаких конкретных объяснений конкретных явлений из всего этого не следует. А тем временем Веданская теория такие объяснения даёт – и без всякой «квантовой когерентности».

⁹⁰ Гораздо менее понятно, впрочем, существует ли сколько-нибудь прямая связь между упомянутыми сравнительно высокочастотными процессами и более привычной «волновой» активностью мозга (например, альфа-ритмом с частотой 8–12 гц). Предполагается лишь, что такие низкие частоты могут возникать как «частоты биений», однако никакой связи пока не установлено. Особо примечательными в этой связи представляются не так давно обнаруженные колебания с частотой 35–75 гц, ассоциирующиеся,

Впрочем, если бы такая связь была слишком сильной, то квантовый характер внутренних колебаний неизбежно означал бы, что и вычисления на поверхности самих трубок необходимо рассматривать квантовомеханически. Иначе говоря, на поверхности нанотрубочек происходили бы самые настоящие квантовые вычисления (см. §7.3)! Следует ли воспринимать такую возможность всерьез?

Трудность заключается в том, что для таких вычислений, по-видимому, необходимо, чтобы изменения конформаций димеров не возмущали сколько-нибудь заметным образом молекулы окружения. Здесь уместно вспомнить о том, что окружающая нанотрубочку область заполнена водой в упорядоченном состоянии; прочие же вещества в эту область не допускаются (см. [183], с. 172), что в совокупности может обеспечить некоторое квантовое экранирование. С другой стороны, нанотрубочки соединены друг с другом «мостиками» MAP (см. §7.4) – причем по некоторым из них производится транспорт разных «посторонних» молекул, – и передача сигналов вдоль трубок (см. [183], с. 122) не может на эти мостики не воздействовать. Из этого последнего факта вполне недвусмысленно следует, что «вычисления», которыми занята трубка, могут и в самом деле возмутить окружение до такой степени, что их поневоле придется рассматривать классически. Интенсивность возмущения невелика ввиду малости перемещаемых масс (по OR-критерию, предложенному в §6.12), однако для того, чтобы вся система продолжала оставаться на квантовом уровне, необходимо, чтобы эти возмущения не проникали внутрь клетки и не распространялись далее, за ее пределы. На мой взгляд, неопределенности здесь (как в отношении реальной физической ситуации, так и в отношении применимости к ней критерия OR из §6.12) остается вполне достаточно для того, чтобы помешать нам решить, уместен на данном этапе чисто классический подход или нет.

Как бы то ни было, предположим, в рамках настоящего рассуждения, что нанотрубочковые вычисления следует рассматривать как существенно классические – в том смысле, что мы не ожидаем, что квантовые суперпозиции различных вычислений играют здесь сколько-нибудь значимую роль. С другой стороны, допустим, что внутри трубок имеют место подлинно квантовые колебания некоего рода, причем между внутренними квантовыми и внешними классическими свойствами каждой трубки существует некая тонкая связь. Согласно такой картине, именно в этом тонком взаимодействии существенно проявляются неизвестные пока правила искомой новой теории OR. Внутренние квантовые «колебания» должны определенным образом воздействовать на внешние вычисления на трубках, однако в этом нет ничего нелогичного – учитывая те механизмы, которые, как мы предполагаем, ответственны за клеточноавтоматное поведение нанотрубочек (слабые взаимодействия ван-дер-ваальсова типа между соседними димерами тубулина).

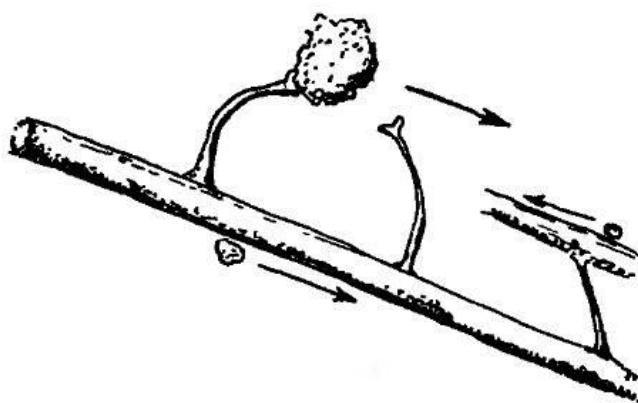


Рис. 7.13. Мостики MAP, помимо прочего, транспортируют крупные молекулы, тогда как меньшие молекулы перемещаются непосредственно вдоль нанотрубочек.

В результате мы получаем картину некоего глобального квантового состояния, которое когерентно объединяет процессы внутри трубок и в котором участвует вся совокупность

по-видимому, с областями мозга, ответственными за сознательное внимание. Колебания эти, похоже, обладают какими-то загадочными нелокальными свойствами. (См. [107], [167], [64], [65] и [63]).

микротрубочек в той или иной обширной области мозга. Это состояние (которое вовсе не обязательно является просто «квантовым состоянием» в том традиционном смысле, который вкладывает в это понятие стандартный квантовый формализм) также некоторым образом воздействует на вычисления, выполняемые на микротрубочках, – для точного описания такого воздействия понадобится гипотетическая невычислимая OR-физика, которой у нас пока нет, но которая, я убежден, нам крайне необходима. «Вычислительная» активность конформационных изменений молекул тубулина управляет транспортом молекул вдоль наружной поверхности микротрубочек (см. рис. 7.13) и в конечном итоге воздействует на интенсивность синапса в его пре- и постсинаптических окончаниях. Таким образом, через посредство внешних вычислений, когерентная квантовая организация внутри микротрубочек способна влиять на изменения в синаптических связях нейронного компьютера в текущий момент.

Такая картина открывает простор для самых различных умозрительных построений. Например, можно отвести в ней некую роль нелокальности ЭПР-эффектов квантовой сцепленности. Определенную роль может играть и квантовая контрфактуальность. Представим, что нейронный компьютер готов выполнить некое вычисление, которое он в действительности не выполняет, но (как в случае задачи об испытании бомб) сам факт того, что он может это вычисление выполнить, вызывает эффект, отличный от того, который имел бы место, не будь у компьютера такой возможности. Таким образом, классическая «схема соединений» нейронного компьютера в любой момент времени может воздействовать на внутреннее цитоскелетное состояние, даже если возбуждение нейронов, активирующее данную конкретную «схему», в действительности не происходит. Можно еще поразмышлять над возможными аналогами такого рода феноменов в каких-либо более привычных умственных занятиях, каким мы то и дело предаемся, но мне почему-то кажется, что углубляться в обсуждение этих занятий здесь не стоит.

Согласно предлагаемой мною предварительной точке зрения, сознание есть проявление такого квантосцепленного внутреннего состояния цитоскелета вкупе с участием этого состояния во взаимодействии (OR) между процессами квантового и классического уровней. Компьютерообразная система нейронов, классическим образом соединенных друг с другом, непрерывно подвергается воздействию упомянутых цитоскелетных процессов, выступающих в роли проявлений «свободы воли» (что бы мы под этими словами ни понимали). Нейроны в этой системе выполняют функции, скорее, увеличительных стекол, посредством которых микроскопические цитоскелетные процессы «поднимаются» на уровень, на котором возможно воздействие на другие органы тела – например, на мышцы. Соответственно, нейронный уровень описания, к которому сводится модное нынче представление о мозге и разуме, является не более чем тенью цитоскелетных процессов более глубокого уровня – именно там, в глубине, находится физический фундамент разума,⁹¹ который мы столь упорно разыскиваем!

Эта картина, надо признать, не лишена некоторой умозрительности, однако она ни в чем не противоречит современным научным представлениям. В предыдущей главе мы убедились, что есть весьма веские причины (основанные на соображениях, не выходящих за рамки сегодняшней физики) полагать, что эта самая физика нуждается в серьезном пересмотре⁹² – для того, чтобы объяснять и описывать новые эффекты на том же уровне, на котором, по-видимому, происходят процессы в микротрубочках и, возможно, на границе цитоскелет/нейрон. Согласно представленным в первой части аргументам, для отыскания физического «обиталища» сознания необходимо «расчистить» в физике место для невычислимых физических процессов, единственная же приемлемая возможность такой расчистки заключается, как я показываю уже во второй части, в последовательном замещении редукции квантового состояния, обозначенной здесь буквой R, новой, объективной редукцией OR. Теперь мы должны ответить на вопрос, есть ли какие-нибудь чисто физические основания ожидать, что процедура OR действительно окажется в принципе невычислимой. Как вскоре выяснится, некоторые основания такого рода, учитывая сделанные в §6.12 предположения, действительно имеются.

⁹¹ В.Э.: Да, может быть, он находится там, и, может быть, в этом какую-то роль играют квантовые эффекты. Но только всё это всё равно не дает нам никакого конкретного представления о том, как работает интеллект, и не разъясняет конкретные вопросы (часть из которых я упоминал в предыдущих сносках). Такие конкретные представления и конкретные разъяснения дает Веданская теория (которая абстрагируется от физической природы лежащих в основе работы компьютера явлений, переходя к концептуальному уровню в терминах программирования и информатики).

⁹² В.Э.: Да, физика очевидно нуждается в пересмотре – тут мы можем поддержать Пенроуза –, но не надо этот пересмотр связывать с вопросами объяснения интеллекта.

§7.8. Невычислимость в квантовой гравитации (1)

Ключевым требованием предшествующих рассуждений было то, что какой бы новый физический процесс ни пришел на смену вероятностной R-процедуре, применяемой в стандартной квантовой теории, его неотъемлемым свойством должна быть того или иного рода невычислимость. В §6.10 я показал, что этот новый физический процесс, OR, должен сочетать в себе принципы квантовой теории с принципами общей теории относительности Эйнштейна – т.е. представлять собой квантово-гравитационный феномен. Есть ли какие-нибудь свидетельства в пользу того, что невычислимость может оказаться существенным свойством той теории (какой бы она ни была), которая в конечном счете корректно объединит (надлежащим образом модифицировав) квантовую теорию и общую теорию относительности?

Исследуя квантовую гравитацию, Роберт Герох и Джеймс Хартл столкнулись однажды с численно неразрешимой проблемой – проблемой топологической эквивалентности четырехмерных многообразий [144]. В основном их занимал вопрос о том, как определить, что два данных четырехмерных пространства «одинаковы» с топологической точки зрения (т.е. одно из этих пространств посредством непрерывной деформации можно довести до полного совпадения с другим пространством, причем деформация эта не допускает каких бы то ни было разрывов или слияний пространств). На рис. 7.14 топологическая эквивалентность проиллюстрирована на примере двухмерного случая, где мы видим, что поверхность чашки топологически одинакова с поверхностью кольца, но отлична от поверхности шара. В двухмерном случае проблема топологической эквивалентности разрешима вычислительным путем, в случае же четырёх измерений, как показал в 1958 году А.А. Марков [256], алгоритма для решения такой задачи не существует.⁹³ Более того, доказательство Маркова эффективно демонстрирует, что если бы такой алгоритм существовал, то его можно было бы преобразовать в алгоритм, позволяющий решить проблему останковки, т.е. найти способ определять, завершится в той или иной ситуации работа машины Тьюринга или нет. Поскольку, как мы выяснили в §2.5 {= [МОИ № 17](#)}, такого алгоритма не существует, значит, не может быть и алгоритма для решения проблемы эквивалентности четырехмерных многообразий.

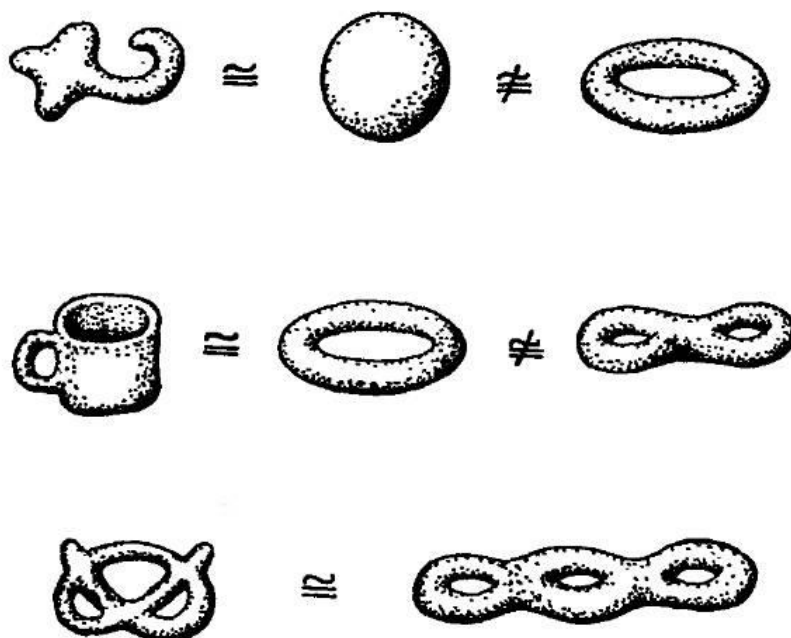


Рис. 7.14. Двухмерные замкнутые поверхности, которые можно классифицировать численно (грубо говоря, путем подсчета количества «ручек»). Четырёхмерные же замкнутые «поверхности» численно классифицировать невозможно.

Существует множество других классов математических задач, которые неразрешимы численно. Две из них – десятую проблему Гильберта и задачу о замощении – мы обсуждали в

⁹³ В.Э.: Не на диагональном методе ли он основывал свое доказательство?

§1.9 {= МОИ № 17}. Еще один пример – задачу со словами (для полугрупп) – можно найти в НРК, с. 130–132 {= МОИ № 14, с.145}.

Следует пояснить, что термин «численно неразрешимый» не означает, что в данном классе имеются отдельные задачи, которые невозможно решить в принципе. Он означает лишь то, что не существует систематического (алгоритмического) способа решить все задачи этого класса. В том или ином отдельном случае порой оказывается возможным получить решение благодаря человеческой находчивости и проницательности, подкрепленной, может быть, некоторыми вычислениями. Может, напротив, случиться и так, что решение каких-то задач из класса окажется человеку не по силам (даже если он возьмет в помощники машину). Похоже, никто об этом феномене ничего определенного не знает, поэтому каждый волен составлять обо всем этом свое собственное мнение. Впрочем, как вполне недвусмысленно показывает «гёделевско-тьюринговское» рассуждение из §2.5 {= МОИ № 17} (вкуче с аргументацией главы 3), задачи таких классов, доступные человеческому пониманию и проницательности (подкрепленным вычислениями, если хотите), всё равно образуют класс, который численно неразрешим. (Для проблемы остановки, например, в §2.5 показано, что класс вычислений, незавершаемость которых в состоянии установить человек, невозможно охватить каким-либо познаваемо обоснованным алгоритмом A – а от этого уже отталкиваются аргументы главы 3.)

Что касается Героха, Хартла и квантовой гравитации, то проблема эквивалентности четырехмерных многообразий проникла в их анализ постольку, поскольку, согласно стандартным правилам квантовой теории, квантово-гравитационное состояние предполагает суперпозиции (с комплексными весовыми коэффициентами) всех возможных геометрий пространственно-временных, в данном случае, геометрий, т.е. четырехмерных объектов. Для того, чтобы понять, как определять такие суперпозиции каким-либо уникальным образом (во избежание путаницы при подсчете), необходимо знать, какие пространства-времена считать различными, а какие – одинаковыми. Проблема топологической эквивалентности представляет собой, таким образом, лишь часть более обширной задачи.

Читатель спросит: если вдруг подход Героха–Хартла к квантовой гравитации окажется физически корректным, будет ли это означать, что эволюция физических систем включает в себя нечто существенно невычислимое? Вряд ли на этот вопрос можно дать ясный и однозначный ответ. Мне не ясно даже, так ли непременно из численной неразрешимости проблемы топологической эквивалентности следует неразрешимость более полной проблемы геометрической эквивалентности. Мне не ясно также, какое отношение этот подход может иметь (если вообще может) к искомой объективной редукции, которая предполагает изменения в самой структуре собственно квантовой теории, связанные с необходимостью учета гравитационных эффектов. Тем не менее, работа Героха–Хартла и в самом деле вполне определенно указывает на то, что невычислимость может-таки сыграть свою роль в окончательной, физически корректной теории квантовой гравитации.

§7.9. Машины с оракулом и физические законы

Можно, впрочем, задать и иной вопрос. Предположим, что новая теория квантовой гравитации действительно окажется невычислимой теорией – в том, в частности, смысле, что она позволит нам сконструировать физическое устройство, способное решить проблему остановки. Будет ли этого достаточно для разрешения всех проблем, порожденных нашими размышлениями о доказательстве Гёделя–Тьюринга в первой части книги? Как ни удивительно, ответ – нет!

Попробуем разобраться, почему способность решить проблему остановки ничем нам не поможет. В 1939 году Тьюринг предложил одну важную концепцию, имеющую к этому вопросу самое непосредственное отношение, – концепцию оракула. Идея такова: оракул есть нечто (предположительно, воображаемый объект, существующий лишь в голове самого Тьюринга и вовсе не обязательно реализуемый физически), что действительно может решить проблему остановки. Так, если дать оракулу пару натуральных чисел q и n , то он через некоторое конечное время выдаст нам ответ ДА или НЕТ, в зависимости от того, завершится в конце концов вычисление $C_q(n)$ или нет (см. §2.5). В §2.5 мы доказываем вывод Тьюринга о том, что такой оракул, действующий исключительно вычислительными методами, создать невозможно, однако там ничего не говорится о том, что оракул невозможно построить физически. Чтобы прийти к такому выводу, мы должны твердо знать, что физические законы являются по своей природе вычислительными – а мы этого не знаем, о чем, собственно, и идет, главным образом, речь во

второй части. Следует также отметить, что физическая возможность создания оракула не является, насколько я могу судить, следствием из той точки зрения, которую я здесь отстаиваю. Как уже упоминалось, никто не требует, чтобы все проблемы остановки были доступны человеческому пониманию и проницательности, поэтому нет никаких оснований и полагать, что некое физически реализуемое устройство непременно справится со всеми этими проблемами своей физической реализуемостью.

В дальнейшем обсуждении Тьюринг рассмотрел модификацию понятия вычислимости, когда оракула можно вызвать на любом желаемом этапе вычисления. Таким образом, машина с оракулом (выполняющим оракул-алгоритм) представляет собой самую обыкновенную машину Тьюринга, только к ее стандартным вычислительным операциям добавлена еще одна: «Вызвать оракул и спросить у него, завершается ли вычисление $C_q(n)$; по получении ответа продолжать вычисление, учитывая полученный ответ». Оракул можно вызывать снова и снова, если появляется такая необходимость. Отметим, что машина с оракулом является точно таким же детерминированным объектом, как и обычная машина Тьюринга (это для иллюстрации того факта, что вычислимость и детерминизм суть совершенно разные вещи). В принципе, вселенная, которая функционирует детерминированно как машина с оракулом, точно так же возможна, как и вселенная, которая функционирует детерминированно как машина Тьюринга.⁹⁴ («Игрушечные вселенные», описанные в §1.9 {= [МОИ № 17](#)} и в НРК, на с. 170, представляют собой, по сути, вселенные-машины-с-оракулом.)

Может ли оказаться так, что и наша собственная Вселенная функционирует как машина с оракулом? Любопытно, что с помощью приведенных в первой части книги аргументов оракул-машинная модель математического понимания «развенчивается» столь же успешно, как и аналогичная модель на основе машины Тьюринга, причем изменений почти не требуется. Нужно всего лишь взять доказательство из §2.5 и условиться, что запись « $C_q(n)$ » обозначает теперь «выполнение q -й машиной с оракулом действия над натуральным числом n ». Впрочем, лучше ввести другое обозначение, скажем, $C'_q(n)$. Как и в случае обычных машин Тьюринга, мы можем составить (вычислимым образом) пронумерованный список машин с оракулом. Что касается их спецификаций, единственной дополнительной особенностью является то, что мы должны, помимо прочего, учитывать, на каких этапах вычисления вызывается оракул; никакой новой проблемы такой учет не составит. Далее мы заменяем алгоритм $A(q, n)$ из §2.5 оракул-алгоритмом $A'(q, n)$, который, в соответствии с исходным допущением, олицетворяет собой всю совокупность доступных человеческому пониманию и человеческой проницательности средств, необходимых для однозначного установления факта незавершаемости операции $C'_q(n)$ оракула. В точности повторяя доказательство, приходим к следующему выводу:

\mathcal{G}'' Для установления математической истины математики не применяют заведомо обоснованные оракул-алгоритмы.

Отсюда следует неутешительное заключение: физический процесс, функционирующий как машина с оракулом, наших проблем также не решит.

Вообще говоря, весь процесс можно повторить, применив его к «машинам с оракулом второго порядка», которым позволяет вызывать при необходимости оракул второго порядка – который способен установить, завершится работа обычной машины с оракулом или нет. Как и в предыдущем случае, приходим к выводу:

\mathcal{G}''' Для установления математической истины математики не применяют заведомо обоснованные оракул-алгоритмы второго порядка.

Очевидно, что этот процесс можно повторять снова и снова – подобно многократной гёделизации, описанной нами в связи с возражением Q19 {= [МОИ № 17](#)}. Для каждого рекурсивного (вычислимого) ординала α вводится концепция машины с оракулом α -го порядка, и мы снова получаем всё тот же вывод:

\mathcal{G}^{α} Для установления математической истины математики не применяют заведомо обоснованные оракул-алгоритмы α -го порядка, где α – любой вычислимый ординал.

⁹⁴ В.Э.: Ну, это утверждение неверно. Оно является следствием недостаточно четкой постановки вопроса и недостаточного разграничения физического и «платонического» миров (которое вообще характерно для Пенроуза – см. {PENRO3 = [МОИ № 15](#), с.18, сноска 32}). Причиной (чего-то) в физическом мире может быть только явление физического же – а не платонического! – мира. Всякое «вычисление» в физическом мире есть определенный физический процесс. И вот этот процесс, чтобы стать причиной чего-то, должен определить, могут ли (принципиально) заканчиваться другие (даже не физические, а абстрактные, воображаемые!) процессы из бесконечного их множества!

Окончательное следствие из всего этого несколько даже пугает. Получается, что нам предстоит отыскать невычислимую физическую теорию, способную заглянуть дальше, чем описание машин с оракулом любого вычислимого уровня (или, возможно, еще дальше).

Нисколько не сомневаюсь, что найдутся читатели, которые скажут, что вот уж тут-то мои рассуждения окончательно растеряли последние крохи правдоподобия,⁹⁵ которые в них еще оставались! И, разумеется, такие чувства вполне понятны. Непонятно лишь нежелание⁹⁶ хотя бы ознакомиться со всеми доказательствами, которые я уже в подробностях приводил ранее. Нужно просто вновь пройти по всем доказательствам в главах 2 и 3, заменяя в них машины Тьюринга на машины с оракулом α -го порядка. Не думаю, что такая замена как-то существенно повлияет на суть этих доказательств, но меня, если честно, приводит в содрогание перспектива только ради нее повторять их здесь заново.⁹⁷ Следует, впрочем, указать на еще одно обстоятельство: нет никакой необходимости в том, чтобы человеческое понимание приобрело ту же мощь, что и какая угодно машина с оракулом. Как было отмечено выше, вывод ζ вовсе не обязательно предполагает, что человеческого понимания, в принципе, достаточно для того, чтобы решить любой конкретный случай проблемы остановки. Таким образом, всё это не означает, что искомые физические законы в принципе должны непременно оказаться более общими, нежели те, которыми описываются машины с оракулом любого вычислимого уровня (или хотя бы первого). Нам нужно лишь отыскать нечто, не являющееся эквивалентом любой конкретной машины с оракулом (включая сюда и машины с оракулом нулевого уровня, т.е. собственно машины Тьюринга). Возможно, эти физические законы опишут нечто просто-напросто иное.

§7.10. Невычислимость в квантовой гравитации (2)

Вернемся к квантовой гравитации. Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время общепринятой теории квантовой гравитации не существует – нет даже сколько-нибудь приемлемых кандидатов. Есть зато множество самых разных и порой совершенно восхитительных гипотез.⁹⁸ Та, которую я хочу сейчас представить, требует, как и подход Героха–Хартгла, учета квантовых суперпозиций различных пространств-времен. (Многие гипотезы говорят лишь о суперпозициях трехмерных пространственных геометрий, что несколько отличается.) Предположение (за авторством Дэвида Дойча)⁹⁹ заключается в том, что в суперпозициях должны участвовать не только «правильные» пространственно-временные геометрии, в которых время ведет себя достаточно благоразумно, но и «неправильные» пространства-времена, в которых имеются замкнутые времениподобные линии. Такое пространство-время представлено на рис. 7.15. Времениподобная линия описывает возможную историю частицы (классической), а «времениподобной» она называется потому, что во всех точках локального светового конуса линия всегда направлена внутрь конуса, т.е. локальная абсолютная скорость не превышает в соответствии с требованием теории относительности (см. §4.4 {= [МОИ № 17](#)}). Смысл замкнутости времениподобной линии в том, что мы можем представить себе «наблюдателя»¹⁰⁰, для которого такая линия является мировой линией, т.е. линией, описывающей в данном пространстве-времени историю его собственного тела. Такой наблюдатель по прошествии некоторого конечного времени (согласно его восприятию) окажется в своем прошлом (перемещение во времени!). У него появляется возможность сделать что-нибудь такое (при

⁹⁵ В.Э.: Уж по крайней мере один такой читатель точно нашелся ☺.

⁹⁶ В.Э.: Какое такое нежелание?! Ознакомились очень подробно.

⁹⁷ В.Э.: «Квалифицированный специалист – это человек, который удачно избегает маленьких ошибок, неуклонно двигаясь к какому-нибудь глобальному заблуждению». Следствие Вейнберга. (Из «Законов Мерфи»). Пенроуз уж точно полностью подтверждает этот закон.

⁹⁸ См., напр., [211, 212] и [348, 349].

⁹⁹ Эта идея описана в одном из черновых вариантов статьи Дэвида Дойча «Квантовая механика вблизи замкнутых времениподобных линий» [85], однако в опубликованную статью она не попала. Дэвид уверил меня в том, что он убрал этот кусок из окончательного варианта статьи не потому, что счел идею «ошибочной», а потому лишь, что она не имела непосредственного отношения к теме статьи. Как бы то ни было, в рамках моей собственной «темы» ценность идеи заключается не в том, чтобы она была «корректной» по меркам той или иной системы взглядов на квантовую гравитацию – поскольку такой системы взглядов (непротиворечивой) в настоящий момент всё равно нет, – но в том, чтобы она содержала в себе потенциал для дальнейших исследований, а этого в идее Дойча с избытком!

¹⁰⁰ См. обращение к читателю в начале книги, с. 18.

условии, что он обладает какой-никакой «свободой воли»), чего он раньше никогда не делал, что неизбежно ведет к противоречию. (Обычно в таких умопостроениях наблюдатель убивает собственного дедушку «прежде», чем на свет появится его же отец – или совершает что-нибудь еще столь же волнительное.)

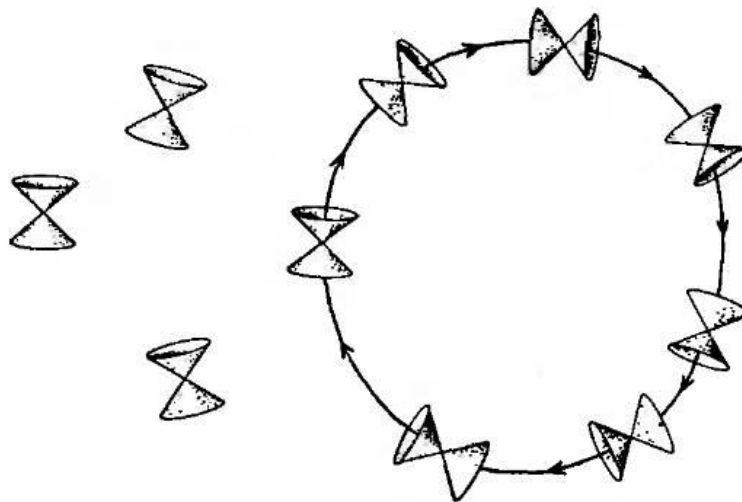


Рис. 7.15. Достаточно сильный наклон световых конусов в пространстве-времени может привести к возникновению замкнутых времениподобных линий.

Рассуждения такого рода сами по себе являются достаточной причиной для того, чтобы не воспринимать пространства-времени с замкнутыми времениподобными линиями всерьез – в качестве возможных моделей реально существующей классической Вселенной. (Любопытно, что первым модель пространства-времени с замкнутыми времениподобными линиями предложил в 1949 году не кто иной, как Курт Гёдель. Гёдель не считал парадоксальные аспекты таких пространств-времен достаточным основанием для того, чтобы исключить их из списка возможных космологических моделей. По разным причинам мы сегодня, как правило, придерживаемся на этот счет более строгих взглядов, однако не всегда – см. [364]. Очень интересно было бы увидеть реакцию Гёделя на ту роль, какую мы отведем таким пространствам-временам чуть ниже!) Хотя представляется вполне разумным исключить пространственно-временные геометрии с замкнутыми времениподобными линиями из числа возможных описаний классической Вселенной, можно привести некоторые доводы в пользу того, чтобы оставить их в качестве потенциальных кандидатов на участие в квантовых суперпозициях. На это, собственно, и указывал Дойч. Несмотря на то, что вклады таких геометрий в общий вектор состояния могут оказаться крайне малыми, их потенциальное присутствие производит (согласно Дойчу) поразительный эффект. Если мы обратим внимание на особенности выполнения квантовых вычислений в такой ситуации, то придем, по всей видимости, к выводу, что здесь можно выполнять и невычислимые операции! Это обусловлено тем, что в пространственно-временных геометриях с замкнутыми времениподобными линиями на вход машины Тьюринга вполне можно подать полученный ею же результат, продлив таким образом ее действие до бесконечности, буде возникнет такая необходимость, – т.е. здесь ответ на вопрос «Завершается ли данное вычисление?» действительно влияет на окончательный результат квантового вычисления. Дойч пришел к выводу, что в его схеме квантовой гравитации возможны квантовые машины с оракулом. Насколько я смог разобраться, его аргументы с тем же успехом применимы и к машинам с оракулом более высокого порядка.

Разумеется, многие читатели сочтут, что всё это следует воспринимать с надлежащей долей здравого скептицизма. В самом деле, нет никаких реальных оснований полагать, что из такой схемы может вырасти непротиворечивая (или хотя бы правдоподобная) теория квантовой гравитации. Тем не менее, в рамках собственной системы представлений идеи логичны, а с точки зрения порождения новых идей – еще и чрезвычайно интересны; я нисколько не удивлюсь, если в ту правильную схему квантовой гравитации, которую мы когда-нибудь всё равно найдем, попадут-таки какие-нибудь существенные фрагменты гипотезы Дойча. В моем представлении,

как было особо подчеркнуто в §6.10 и §6.12, для корректного объединения квантовой теории и общей теории относительности необходимо изменить сами законы квантовой теории (в соответствии с процедурой OR). Однако тот факт, что в подходе Дойча невычислимость – даже такая, какой, по-видимому, требует вывод \mathcal{G}^a , – является свойством квантовой гравитации, я рассматриваю как ценное подтверждение возможности отыскания в конечном счете места для невычислительной активности.

В завершение отметим, что те невычислимые эффекты, на которые указывает Дойч, мы получили исключительно благодаря потенциальному наклону световых конусов, предусмотряемому общей теорией относительности Эйнштейна. Если световые конусы способны наклоняться вообще – пусть и на те крохотные углы, что предписывает теория Эйнштейна в обычных обстоятельствах, – то значит, они потенциально могут наклоняться и дальше, вплоть до возникновения замкнутых времениподобных линий. Эта потенциальная возможность играет здесь вполне контрфактуальную роль (в полном согласии с квантовой теорией) – возможность совершения действия производит эффект не менее реальный, нежели само действие!

§7.11. Время и сознательное восприятие

Вернемся к проблеме сознания. В конце концов, именно та роль, которую играет в восприятии математической истины сознание, и увлекла нас по странной дороге в не менее странное место, где мы сейчас стоим, озираясь по сторонам. Очевидно, впрочем, что сознание отнюдь не ограничивается одним лишь восприятием математических истин. По той дороге мы пошли только потому, что нам показалось, что она нас куда-то приведет. И я почему-то подозреваю, что многим читателям не особо нравится то «где-то», куда мы, наконец, так или иначе прибыли. Однако если теперь, с высоты новых знаний, оглянуться назад, то мы, возможно, обнаружим, что некоторые из наших старых проблем представляются нам теперь в новом свете.

Среди наиболее поразительных и непосредственных свойств сознательного восприятия особо выделяется восприятие течения времени. Время кажется нам настолько привычным, что мы бываем немало потрясены, обнаружив, что все наши замечательно подробные теории поведения физического мира не в состоянии (пока что) практически ничего о нем рассказать. Хуже того, то, что наиболее здравые из них так рассказывают, находится в почти полном противоречии с тем, что говорит нам о времени наше восприятие.



Рис. 7.16. В двухмерном пространстве-времени временная и пространственная оси полностью взаимозаменяемы – однако никому не приходит в голову говорить о «течении» пространства!

Согласно общей теории относительности, «время» – это всего лишь одна из координат в описании положения пространственно-временного события. В пространственно-временных описаниях, предлагаемых нам физиками, нет ничего, что выделяло бы «время» как нечто, что «течет». В самом деле, физики довольно часто используют модели пространства-времени, в которых наряду с временным измерением имеется лишь одно пространственное измерение – в таких двухмерных пространствах-времених отличить временную ось от пространственной принципиально невозможно (см. рис. 7.16). И всё же никто в здравом уме не станет говорить о

«течений»¹⁰¹ пространства! Действительно, в физических задачах, где требуется вычислить будущее состояние системы на основании настоящего ее состояния (см. §4.2 {= МОИ № 17}), часто рассматривают так называемые временные эволюции. Однако эта процедура вовсе не является обязательной, и вычисления, как правило, выполняются именно так только потому, что мы в данном случае строим модель (математическую) опыта восприятия нами мира через призму «текущего» времени (которое мы, похоже, только так и воспринимаем), – а еще потому, что нам хочется научиться предсказывать будущее.¹⁰² Исключительно благодаря особенностям нашего восприятия, в наших вычислительных моделях мира появляются неизбежные отклонения в виде временных эволюций (часто, но, надо признать, не всегда), тогда как сами физические законы таких встроенных отклонений не содержат.¹⁰³

Более того, время для нас «течет» только потому, что мы обладаем сознанием. С точки зрения теории относительности, существует лишь «статическое» четырехмерное пространство-время без какого бы то ни было «течения». Пространство-время просто есть, и время в нем способно «течь» не больше, чем пространство. Течение времени, похоже, необходимо почему-то одному лишь сознанию,¹⁰⁴ и я не удивлюсь, если отношения между сознанием и временем вдруг окажутся странными и во всем остальном.

В самом деле, было бы не совсем благоразумно чересчур тесно отождествлять феномен сознательного восприятия с его кажущимся «течением» времени и использование физиками вещественного параметра t в качестве обозначения для так называемой «временной координаты». Во-первых, если верить теории относительности, то применительно к пространству-времени как к целому выбор параметра t уникальностью не отличается. Возможны самые различные взаимно несовместимые альтернативы, причем нет никаких оснований отдать предпочтение какой-то одной из них. Во-вторых, очевидно, что точная концепция «вещественного числа» имеет весьма малое отношение к сознательному восприятию нами течения времени, хотя бы по одной той причине, что мы не можем воспринимать очень малые временные промежутки – скажем, порядка сотой доли секунды, не говоря уже о меньших, – тогда как физики способны работать и с временными масштабами порядка 10^{-25} с (что с успехом демонстрирует точность квантовой электродинамики, т.е. квантовой теории взаимодействия электромагнитных полей с электронами и другими заряженными частицами) или, возможно, еще меньшими, вплоть до планковского времени 10^{-43} с. Более того, согласно математической концепции времени, выраженного в виде вещественного числа, предела малости, после достижения которого концепция должна потерять всякий смысл, нет вообще – вне зависимости от того, имеет эта концепция физический смысл во всех масштабах величин или нет.

Возможно ли сказать что-либо более конкретное о взаимоотношениях между сознательно воспринимаемым временем и параметром t , который физики называют «временем» и используют

¹⁰¹ В.Э.: О течении пространства не говорят, но имеется понятие о перемещении «чего-то» в пространстве; точно так же «что-то» перемещается во времени (точнее, в пространстве-времени). Это перемещение воспринимается (кодируется) человеческой операционной системой как «течение времени» – т.е. как отдельная координата, не связанная с тремя координатами «пространства». До сих пор всё ясно и проблем нет. Но ЧТО представляет из себя то «что-то», которое перемещается по пространству-времени? – вот в чем вопрос. (Я это «что-то» сравнивал с лазерным лучом, скользящим по компакт-дису {PENRO4 = МОИ № 16, с.5, сноска 4}).

¹⁰² Во всяком случае, в рамках наших обычных физических представлений о времени «течение» времени в будущее ничем не отличается от «течения» времени в прошлое. (Однако, благодаря второму закону термодинамики, осуществить эффективное «послесказание» прошлого с помощью временной эволюции уравнений динамики невозможно.)

¹⁰³ В.Э.: О каких «законах» речь? О теориях и их уравнениях? Так они же вторичные построения, существующие лишь в головах людей и претендующие (в лучшем случае) лишь на частичный (но не абсолютный) изоморфизм с явлениями природы. Так что то, что говорит какая-то там «теория Эйнштейна», «не указка» для нас и, тем более, для Природы. Если направление времени безразлично для уравнений Эйнштейна, то это еще не значит, что оно безразлично и для Вселенной.

¹⁰⁴ В.Э.: Всё же есть и в реальном мире некий «лазерный луч», скользящий по пространству-времени и отображающийся в наших мозгах как течение времени – времени, ортогонального пространству. (Причем, я думаю, что этот «луч» скользит «со скоростью света», а точнее, эта «универсальная физическая константа» c – скорость света – потому и является такой константой, что она на самом деле – скорость «расширения пространства» в результате Большого взрыва. Иными словами: «физическое пространство настоящего – это «волновой фронт» Большого взрыва; в двумерном аналоге это было бы – сфера вспышки, распространяющаяся во все стороны со «скоростью света»).

в таком качестве в своих физических описаниях? Можно ли каким-либо образом экспериментально установить, «когда» именно, по отношению к этому физическому параметру, «на самом деле» происходит субъективное восприятие? Имеет ли какой-нибудь объективный смысл высказывание о том, что то или иное осознаваемое событие происходит в тот или иной момент времени? По правде говоря, кое-какие эксперименты, имеющие определенное отношение к данной проблеме, действительно проводились, однако результаты их оказались весьма неоднозначными, а следствия из этих результатов – почти парадоксальными. Описание отдельных экспериментов я приводил в НРК, с. 439–444 {= [МОИ № 16](#), с.113}, однако, думаю, будет уместно рассмотреть их здесь снова.

В середине 1970-х годов Г.Г. Корнхубер с коллегами (см. [78]), используя метод электроэнцефалограммы (ЭЭГ), записали электрические сигналы в различных точках на головах нескольких добровольцев с целью установить возможные временные соответствия между электрической активностью мозга и актами проявления свободы воли (активного аспекта сознания). Испытуемых просили сгибать указательный палец через различные промежутки времени, причем момент сгибания пальца полностью определял сам доброволец; тем самым экспериментаторы надеялись проследить связь между активностью мозга, направленной на осуществление «волевого акта» сгибания пальца, с собственно движением. Для получения сколько-нибудь достоверной информации с датчиков ЭЭГ каждый опыт повторяли по несколько раз, а затем полученные данные усредняли. Результат оказался весьма удивительным: прежде чем испытуемый сгибал палец, записанный электрический потенциал постепенно нарастал в течение некоторого времени (от секунды до полутора секунд)¹⁰⁵. Означает ли это, что между сознательным волевым актом и обусловленным им действием должна пройти целая секунда или даже больше? Насколько осознавали сами испытуемые, между решением согнуть палец и его действительным сгибанием проходило лишь краткое мгновение – никак не секунда, и уж конечно же, не больше. (Заметим, что «запрограммированное» время реакции на внешний стимул гораздо меньше и составляет приблизительно пятую долю секунды.¹⁰⁶)

Отсюда можно, по-видимому, заключить, что либо (i) сознательный акт «свободной воли» есть чистая иллюзия, поскольку он, в некотором смысле, заранее запрограммирован предшествующей бессознательной активностью мозга,¹⁰⁷ либо (ii) воле, возможно, отведена роль «на последнюю минуту», т.е. она может иногда (но не всегда) отменить действие, которое бессознательно готовилось в течение последней секунды,¹⁰⁸ либо (iii) субъект на самом деле пожелал согнуть палец на секунду (или больше) раньше, чем палец согнулся, однако ошибочно воспринимает (непротиворечивым образом) это так, будто сознательный акт произошел в значительно более поздний момент времени, непосредственно перед тем, как палец действительно был согнут.

Позднее Бенджамин Либет (с группой сотрудников) повторил эксперимент Корнхубера, но с некоторыми модификациями, направленными на уточнение момента времени, в который происходит волевой акт, направленный на сгибание пальца: испытуемому было предложено отмечать положение стрелки часов в момент принятия решения (см. [238, 239]). Новый

¹⁰⁵ В.Э.: Ясное дело – перед сгибанием пальца проходила интенсивная работа по самопрограммированию: надо было создать программу (А) для сгибания пальца, а также программу (В) для выбора момента запуска программы (А) сгибания пальца. Вот, мозг и поработал. А как это «отразилось в сознании», т.е. – что из этого было зафиксировано в памяти? Ну, вообще-то немного – главным образом сам факт, что палец был согнут (по «свободной воле», разумеется).

¹⁰⁶ В.Э.: Конечно – если программа уже готова, то ее не надо делать. Потому и быстрее. (См. также {[PENROS](#) = [МОИ № 16](#), м.113, сноска 162}).

¹⁰⁷ В.Э.: Ну почему же иллюзия? Это самый настоящий акт «свободной воли»: никто ведь не заставлял человека согнуть палец именно в этот момент. Он сам выбрал этот момент. Но просто это «сам» означает, что выбирала программа (В). Нет никакого другого объекта «сам человек», кроме всех этих программ (А, В, ... Z) в его голове. А слово «бессознательный» – это пустое обозначение, в общем-то ничего не говорящее и ничего не проясняющее. Просто из всего, что на самом деле в эксперименте Корнхубера произошло в мозге испытуемого, кое-что было его мозгом записано в свою память (т.е. «осознано»), но было записано не всё полностью и не совершенно точно (адекватно).

¹⁰⁸ В.Э.: Чтобы отменить уже запущенную программу (В) выбора времени, нужно запустить еще одну программу (С), которая *cancel*-ирует программу В. Такое тоже возможно: мозг – это большой котел самопрограммирования, который варится непрерывно и в котором программы всё время возникают, исчезают и по-всякому взаимодействуют.

эксперимент в целом подтвердил полученные ранее выводы,¹⁰⁹ за исключением вывода (iii); сам Либет, похоже, склонялся к (ii).

В других экспериментах Либет и Файнштейн [240] исследовали временные соответствия сенсорных (или пассивных) аспектов сознания. Испытуемыми являлись добровольцы, давшие согласие на помещение электродов в область мозга, связанную с приемом сенсорных сигналов от определенных участков кожи. Наряду с прямой стимуляцией электродами, время от времени стимулировался и соответствующий участок кожи. Общий результат эксперимента таков: прежде чем испытуемые осознавали, что они что-то ощущают, проходило приблизительно полсекунды нейронной активности (с некоторыми вариациями в зависимости от обстоятельств), хотя у них создалось впечатление, что при прямой стимуляции они узнают о возникновении ощущения раньше, чем при реальной стимуляции кожи.

Каждый из этих экспериментов сам по себе парадоксальным не является, разве что внушает некоторое беспокойство. Возможно, кажущиеся сознательными решения и в самом деле принимаются на бессознательном уровне, причем раньше (по меньшей мере, на секунду). Возможно, и в самом деле необходимо полсекунды активности мозга, прежде чем мы действительно осознаём то, что ощущаем. Однако если свести эти два вывода вместе, то получается, что в любом действии, где внешний стимул вызывает сознательно обусловленную реакцию, эта самая реакция возникает с запаздыванием, составляющим от секунды до полутора. Пока не пройдет полсекунды, не произойдет осознания; а если мы решим это осознание применить к делу, то нам придется запустить неторопливую машину свободной воли, что, возможно, задержит реакцию еще на секунду.

Неужели наши сознательные реакции действительно настолько медлительны? В обычном разговоре, например, такая задержка почему-то не наблюдается. Если принять вывод (ii), то получается, что большая часть актов реакции полностью бессознательна, хотя время от времени человек оказывается способен отменить эту реакцию, заменив ее (где-то через секунду) сознательным волевым актом.¹¹⁰ Однако если реакция обычно бессознательна, то у сознания (если, конечно, оно не сравнится с ней по скорости) нет ни одного шанса успеть ее отменить – когда начинает действовать сознательный волевой акт, бессознательная реакция уже давно запущена, и предпринимать что-либо слишком поздно! Таким образом, либо сознательные акты могут иногда действовать быстро, либо бессознательная реакция и сама на секунду запаздывает. В этой связи вспомним, что «запрограммированная» бессознательная реакция может произойти гораздо быстрее – через пятую долю секунды или около того.

Разумеется, быстрая (скажем, за пятую долю секунды) бессознательная реакция всё еще возможна, если мы принимаем вывод (i), согласно которому система бессознательных реакций полностью игнорирует любые возможные попытки позднейшей сознательной (сенсорной) активности. В этом случае (а ситуация с выводом (iii), поверьте, еще хуже) сознание в достаточно быстром разговоре способно выступать единственно в роли зрителя, сознательно воспринимающего нечто вроде «записи» давно прошедшего спектакля.

Здесь в действительности нет никакого противоречия. Вполне возможно, что эволюция произвела на свет сознание как раз для неторопливых размышлений, и очевидно, что в ситуации, требующей сколько-нибудь быстрых действий, сознание оказывается не более чем пассажиром. Вся первая часть книги, если помните, посвящена именно такому сознательному созерцанию

¹⁰⁹ В.Э.: Что это значит? По логике актом «свободной воли» следует считать момент, когда программа В (в обозначениях предыдущих сносок) запускает программу А для сгибания пальца. Конечно, этот момент стоит очень близко (Пенроуз говорит, что 1/5 доля секунды) к моменту действительной отработки мышц пальца. Но этому предшествовало в мозге создание самих программ А и В в течение 1 – 1,5 секунд. Так что, по-моему, тут всё абсолютно ясно. (Для Веданской теории объяснение этого эксперимента – как всегда – элементарно и не представляет никаких трудностей).

¹¹⁰ В.Э.: Эти понятия «сознательный», «бессознательный» вообще должны быть выкинуты на помойку. Здесь мы видим типичный пример того, что я говорил Михаилу Грачёву {РОТИ-1 = МОИ № 41, с.61, сноска 100} о подходе «от слова к объекту» и «от объекта к слову». У Пенроуза опять подход «от слова к объекту»: для него сначала есть слова (далее: понятия) «сознательный» и «бессознательный»; он их воспринимает как данность и любой ценой пытается остаться в этой системе понятий. А у меня противоположный подход: «от объекта к слову». Сначала есть работа мозга, есть мозговые программы, а какие термины ввести для описания их работы – там посмотрим: какие понадобятся, такие и введем. И в результате понятия «сознательный» и «бессознательный» мне не нужны. Я ввожу более точные (и более удобные термины).

(математическому пониманию), которое и впрямь славится своей медлительностью. Может быть, способность к сознательному восприятию развилась у нас исключительно ради вот такой вот неспешной созерцательной мыслительной деятельности, тогда как более быстрые по времени реакции полностью бессознательны по своему происхождению – хотя и сопровождаются запаздывающим сознательным восприятием, не играющим, впрочем, никакой активной роли.

Всё это, конечно же, правильно – сознание действительно «берет свое», когда располагает достаточным временем для работы. Однако должен признать, что я не верю, что сознание может не играть абсолютно никакой роли в умеренно быстрой деятельности, такой как обычный разговор – или настольный теннис, футбол и гонки на мотоциклах, если уж на то пошло. Мне представляется, что в логике предыдущих рассуждений имеется одна фундаментальная дыра, и в роли этой дыры выступает допущение об осмысленности точного хронометража сознательных событий. Можно ли вообще говорить о каком-то реальном «моменте времени», в котором происходит акт сознательного восприятия, предполагая к тому же, что этот самый «момент восприятия» должен непременно предшествовать моменту проявления того или иного эффекта «реакции свободной воли» на упомянутый акт восприятия. Учитывая те аномальные взаимоотношения между сознанием и собственно физической природой времени, что описаны в начале этого параграфа, я полагаю (по меньшей мере) возможным, что никакого выраженного «момента времени», в котором происходит акт сознательного восприятия, в природе не существует.¹¹¹

Самой умеренной из всех возможностей в свете вышесказанного представляется нелокальный разброс во времени, придающий связи сознательного восприятия с физическим временем некоторую неустранимую размытость. Однако я подозреваю, что тут работает нечто гораздо более тонкое и непонятное. Если сознание является феноменом, который невозможно понять на физическом уровне без существенного привлечения квантовой теории, то вполне может оказаться так, что Z-загадки этой самой теории входят в противоречие с нашими – такими на вид безупречными! – умозаключениями относительно причинности, нелокальности и контрфактуальности, которые, возможно, и впрямь свойственны отношениям между сознанием и свободной волей.¹¹² Например, какую-то роль, возможно, играет та контрфактуальность, которую мы наблюдали в задаче об испытании бомб (см. §5.2 и §5.9): на поведение может повлиять один лишь факт возможности некоего действия или мысли, даже если в действительности никто ничего не сделал и не подумал. (Это может лишить всякой силы некоторые кажущиеся вполне логичными заключения – скажем, то, с помощью которого мы исключаем возможность правильности вывода (ii).)

В общем и целом, ко всем логичным на первый взгляд выводам касательно упорядочивания событий во времени в присутствии квантовых эффектов следует подходить очень осторожно (что будет особо подчеркнуто в следующем параграфе, где мы рассмотрим проблему с точки зрения ЭПР-феноменов). И напротив, если, в том или ином проявлении сознания, классические рассуждения о расположении событий во времени приводят нас к явно противоречивому заключению, то это совершенно недвусмысленно указывает на присутствие квантовых процессов!

§7.12. ЭПР-феномены и время: необходимость в новом мировоззрении

Есть основания относиться к нашему физическому представлению о времени с некоторой подозрительностью – причем не только в отношении сознания, но и в отношении собственно физики, когда в дело вступают квантовые нелокальность и контрфактуальность. Если придерживаться строго «реалистичного» взгляда на вектор состояния $|\psi\rangle$ в ситуациях ЭПР-типа (см. §6.3 и §6.5, где живописуются трудности, подстерегающие тех, кто этого не делает), то перед нами в полный рост встает фундаментально головоломная проблема. Проблемы такого рода вырастают в труднопреодолимые препятствия при разработке, например, детальной ГВР-теории (см. §6.9) или

¹¹¹ См. также [81]. У людей, видевших фильм «Краткая история времени», в котором рассказывается о Стивене Хокинге и его работе, могло создаться весьма занятное представление о моих взглядах на связь сознания с течением времени. Пользуясь представившейся возможностью, заявляю, что всё это – чистое недоразумение, вызванное ошибками при монтаже фильма.

¹¹² В.Э.: «...отношения между сознанием и свободной волей...» Черт возьми! Ну это вообще уже какой-то средневековый схоластический разговор! ☺

любой другой подобной теории, затрагивая потенциально и любую схему OR-типа, вроде той, что я предлагаю в §6.12.

Вспомним магические додекаэдры из §5.3 и объяснение их поведения, представленное в §5.18, и спросим себя, какая из двух следующих возможностей отражает «реальное» положение дел. Может быть, именно нажатие на кнопку на додекаэдре моего коллеги вызывает мгновенную редукцию (и расщепление) исходного сцепленного совокупного состояния – т.е. по нажатии его кнопки атом в моем додекаэдре мгновенно переходит в новое, расщепленное состояние, и именно это редуцированное состояние и отменяет все остальные варианты развития событий, которые могли бы реализоваться после моего более позднего нажатия на кнопку? Или, может быть, это я нажимаю на кнопку первым, воздействуя на исходное сцепленное состояние, результатом чего становится мгновенная редукция состояния атома в додекаэдре моего коллеги, и теперь уже он не может ничего поделать, на какие бы кнопки он ни нажимал? Для получаемого результата совершенно неважно, какой вариант рассмотрения проблемы мы выберем (о чем мы уже говорили в §6.5). И хорошо, что неважно, потому что если бы было важно, то мы получили бы нарушение принципов эйнштейновской теории относительности, согласно которой «одновременность» в случае удаленных (пространственноподобно разделенных) событий не может иметь никаких наблюдаемых эффектов. Однако если мы полагаем, что вектор $|\psi\rangle$ есть отражение реальности, то реальность эта в двух представленных картинах получается различной. Кто-то, возможно, сочтет это расхождение достаточной причиной для того, чтобы отказаться от такого «реалистичного» взгляда на $|\psi\rangle$. Другие же, напротив, отыщут иные строгие доводы в пользу реальности $|\psi\rangle$ (см. §6.3) – и приготовятся вышвырнуть эйнштейновскую картину мира за борт.

Я склоняюсь к тому, чтобы попытаться примирить обе эти точки зрения – квантовый реализм и дух релятивистского пространства-времени. Однако для этого потребуются фундаментальный пересмотр наших современных представлений о физической реальности. Вместо того, чтобы настаивать на том, что способ описания квантового состояния (или даже пространства-времени) непременно должен следовать из привычных описаний, мы должны отыскать нечто совершенно иное, хотя и эквивалентное математически (по крайней мере, на первых порах) этим самым описаниям.

Более того, имеется и хороший прецедент. Прежде чем Эйнштейн пришел к общей теории относительности, нас полностью устраивала уютная и замечательно точная ньютоновская теория гравитации, согласно которой движущиеся в плоском пространстве частицы притягивали друг друга в соответствии с обратно-квадратичным законом всемирного тяготения. Внесение каких-то фундаментальных изменений в такую гармоничную картину непременно разрушило бы великолепную точность ньютоновской схемы. И тем не менее, именно такое фундаментальное изменение Эйнштейн и предложил. Его альтернативный взгляд на гравитационную динамику полностью переписал прежнюю картину. Пространство больше не является плоским (и вообще, это уже даже не «пространство», а «пространство-время»), а гравитационных сил в природе не существует – есть приливные эффекты искривлений пространства-времени. Что касается частиц, то они, как выясняется, и не движутся вовсе, будучи представлены «статическими» кривыми на пространстве-времени. Разрушило ли всё это замечательную точность теории Ньютона? Ни в малейшей степени; теория стала еще точнее, хотя, казалось бы, уже и некуда! (См. §4.5 {= [МОИ № 17](#)}).

Можно ли ожидать, что нечто подобное произойдет и с квантовой теорией? Думаю, что вероятность такого исхода крайне высока. Просто для этого необходимо фундаментальное изменение мировоззрения, поэтому представить себе сейчас умозраительно природу предстоящего изменения чрезвычайно трудно. Более того, оно несомненно будет выглядеть, как самый настоящий бред!

В заключение я хочу рассказать о двух таких бредовых идеях – ни одна из них, к сожалению, не достигает необходимой степени бредовости, однако у каждой имеются свои достоинства. Первую предложили Якир Ахаронов и Лев Вайдман [2] (а также Коста де Борегар [61] и Пол Вербос [381]). Суть идеи в том, что квантовая реальность описывается двумя векторами состояния, один из которых направлен во времени вперед от последней редукции R (нормальное направление), а другой – назад, от следующей редукции R в будущем. Второй вектор состояния¹¹³ ведет себя «телеологически» – он обусловлен тем, чему предстоит случиться с ним в

¹¹³ Есть некий математический смысл в том, что эволюционирующий в обратном направлении вектор состояния обозначается как «бра-вектор», $\langle\phi|$, тогда как вектор, эволюционирующий нормально,

будущем, а не тем, что с ним уже произошло в прошлом; многие, боюсь, сочтут это его свойство неприемлемым. Однако результаты эта модификация дает в точности те же, что и стандартная квантовая теория, поэтому исключить новую теорию только на этом основании не удастся. Ее преимущество перед стандартной квантовой теорией заключается в том, что она позволяет получить полностью объективное описание состояния в ЭПР-ситуациях, которые теперь можно рассматривать в терминах пространства-времени сообразно духу эйнштейновской теории относительности. Таким образом, новая теория предлагает решение (пусть и своеобразное) головоломной проблемы, о которой мы упоминали в начале этого параграфа, – однако лишь за счет введения квантового состояния, отличающегося телеологическим поведением, что не всем по душе. (Лично я нахожу эти телеологические аспекты вполне приемлемыми, коль скоро они не вступают в конфликт с действительным физическим поведением.) За подробностями отсылаю читателя к соответствующей литературе.

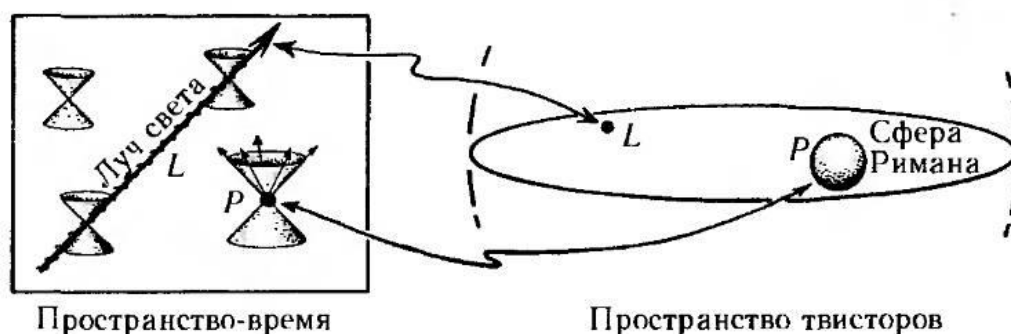


Рис. 7.17. Теория твисторов предлагает альтернативную физическую картину пространства-времени, где лучи света представлены точками, а события – целыми сферами Римана.

Другая идея, о которой я хотел упомянуть, – это теория твисторов (см. рис. 7.17). Поводом для создания этой теории послужили всё те же ЭПР-головоломки, однако решения для них она (как таковая) пока не предоставляет. Ее сила в другом – в неожиданных и изящных математических описаниях некоторых фундаментальных физических концепций (таких, например, как электромагнитные уравнения Максвелла, см. §4.4 и НРК, с. 184–187, приобретающие в теории твисторов привлекательную математическую формулировку). Имеется и нелокальное описание пространства-времени, где каждый луч света представляется в виде точки. Именно эта пространственно-временная нелокальность и связывает теорию твисторов с квантовой нелокальностью ЭПР-ситуаций. Кроме того, в основе теории лежат комплексные числа и соответствующая геометрия, чем достигается тесная взаимосвязь между комплексными коэффициентами U -квантовой теории и структурой пространства-времени. В частности, фундаментальную роль приобретает сфера Римана (см. §5.10), связанная здесь со световым конусом пространственно-временной точки (а также с «небесной сферой» находящегося в этой точке наблюдателя). (Неформальное описание идей, имеющих отношение к данной теме, приводится в книге Дэвида Пита [287]; относительно краткое, но строгое описание теории твисторов можно найти в работе Стивена Хаггета и Пола Тода [209]¹¹⁴.)

Думаю, продолжать углубляться в эти идеи дальше будет не совсем уместно. Я упомянул о них только для того, чтобы показать, что существует множество возможностей изменить нашу уже и так чрезвычайно точную картину физического мира, превратить ее в нечто, совершенно отличное от того, к чему мы успели привыкнуть за прошедшие десятилетия. Такое изменение должно удовлетворять требованию совместимости – иначе говоря, с помощью нового описания мы должны суметь воспроизвести все успешные результаты U -квантовой теории (равно как и общей теории относительности). Однако оно должно также позволить нам продвинуться за сегодняшние пределы и осуществить физически корректную модификацию квантовой теории с

получает стандартное обозначение «кет-вектора», $|\psi\rangle$. Такую пару векторов состояний можно рассматривать как произведение $|\psi\rangle\langle\phi|$. Это обозначение фигурирует также в формализме матриц плотности из §6.4.

¹¹⁴ Для получения более подробных сведений о твисторах см. также [302], [378] и [16].

целью замены процедуры R на какой-либо реальный физический процесс. В этом (по меньшей мере) я убежден твердо; мне также представляется, что такая «корректная модификация» будет включать в себя некую OR-подобную процедуру, основанную на идеях, изложенных в §6.12. Напомню, что теории, сочетающие в себе относительность с «реалистичной» редукцией состояний (такие как ГРВ-теория) сталкиваются сегодня с труднопреодолимыми проблемами (в частности, связанными с сохранением энергии). Это лишь укрепляет мою собственную уверенность: прежде чем мы сможем хоть сколько-нибудь серьезно продвинуться в понимании фундаментальных вопросов физики, мы должны фундаментально изменить наши представления о мире.

Нисколько не сомневаюсь я и в том, что истинный прогресс в физическом понимании феномена сознания попросту невозможен без всё того же фундаментального изменения в нашем физическом мировоззрении.¹¹⁵

Глава 8. Возможные последствия

§8.1. Искусственные разумные «устройства»

Какие же выводы должны мы сделать, исходя из предыдущих рассуждений, о предельном потенциале искусственного интеллекта? В первой части книги было недвусмысленно показано,¹¹⁶ что никакое развитие технологий производства электронных роботов с компьютерным управлением не приведет в конечном итоге к созданию действительно разумной искусственной машины – в том смысле, что машина будет способна понимать, что она делает, и действовать на основе этого понимания. Электронные компьютеры, несомненно, играют очень важную роль в прояснении многих вопросов, связанных с ментальными феноменами (возможно, прежде всего тем, что наглядно показывают, что подлинными ментальными феноменами не является), не говоря уже об их чрезвычайной полезности и бесценном вкладе в научный, технический и социальный прогресс. Вывод, впрочем, однозначен: компьютеры делают что-то принципиально отличное от того, что делаем мы,¹¹⁷ сосредоточивая сознательное внимание на очередной проблеме.

Однако, как можно было понять из продолжения нашего разговора во второй части, я ни в коем случае не утверждаю, что создать подлинно разумное устройство совершенно невозможно; просто такое устройство не будет являться «машиной» – в том конкретном смысле, что «машиной» управляет компьютер. В основе его работы должны будут лежать те же физические процессы, которые ответственны за возникновение нашего собственного сознания. Поскольку физической теории таких процессов в нашем распоряжении еще нет, представляется несколько преждевременным делать какие-то умозаключения относительно того, будет ли вообще построено такое устройство, и если будет, то когда. Тем не менее, в рамках поддерживаемой мною точки зрения *C* (см. §1.3 {= [МОИ № 17](#)}), согласно которой мышление может быть в конечном счете объяснено научно, хотя и с привлечением понятия невычислимости, создание этого устройства вполне допустимо.

Не думаю, что такое устройство непременно должно быть по своей природе биологическим. Более того, я не думаю, что между биологией и физикой (или между биологией, химией и физикой) проходит какая-то принципиально непреодолимая граница. Биологическим системам действительно зачастую присуща тонкость и сложность организации, далеко превосходящая даже наиболее изощренные из наших (порой очень и очень изощренных) физических построений. Однако совершенно очевидно, что мы всё еще находимся на очень раннем этапе физического понимания нашей Вселенной – в особенности, феноменов, имеющих отношение к

¹¹⁵ В.Э.: Для «истинного прогресса в понимании феномена сознания» действительно нужно изменить мировоззрение, но не мировоззрение в области физики, а мировоззрение в области математики (и в других подобных науках, работающих с «идеальным»). Надо перестать считать человека чем-то особым в этом мире (отказаться окончательно от человеческого эгоцентризма) и начать считать его тем, чем (или кем) он и есть на самом деле: просто материальной системой, управляемой (по всем законам информатики) самопрограммирующимся компьютером.

¹¹⁶ В.Э.: Не было показано.

¹¹⁷ В.Э.: Компьютеры делают то, что им предписывают программы. До сих пор никто не создавал программ подлинного интеллекта – в первую очередь, видимо, потому, что просто никто не знал, КАК их надо делать.

мышлению. Таким образом, можно ожидать, что в будущем сложность наших физических построений существенно возрастет. Можно предположить, что в этом будущем усложнении немалую роль сыграют физические эффекты, о которых мы сегодня имеем весьма смутное представление.

Не вижу причин сомневаться в том, что в не столь отдаленном будущем некоторые из приводящих нас сейчас в недоумение эффектов (*Z*-загадок) квантовой теории найдут удивительные применения в самых разнообразных областях. Уже сегодня предлагаются идеи использования квантовых эффектов в криптографии, что позволяет достичь результатов, недоступных классическим устройствам. В частности, имеются теоретические разработки, предполагающие существенное использование квантовых эффектов (см. [26]) и направленные на отыскание способа передачи секретной информации от отправителя к получателю таким образом, чтобы перехват сообщения третьей стороной был невозможен без обнаружения факта перехвата. На основе этих идей уже были разработаны экспериментальные устройства, которые, несомненно, найдут через несколько лет самое широкое коммерческое применение. В области криптографии было предложено и множество других схем, так или иначе использующих квантовые эффекты, и можно сказать, что вчера еще не существовавшая наука квантовая криптография сегодня развивается бурными темпами. Более того, возможно, что когда-нибудь мы действительно сможем построить квантовый компьютер, однако на данный момент соответствующие теоретические разработки еще весьма далеки от практической реализации, и пока весьма сложно предсказать, когда мы увидим (и увидим ли вообще) их физическое воплощение (см. [277, 278]).

Еще сложнее предсказать возможность (и время) создания устройства, работа которого описывается физической теорией, нам еще даже не известной. Я утверждаю, что такая теория необходима для понимания физики, лежащей в основе устройства, функционирующего невычислимым образом; под «невычислимым» здесь понимается «недоступным для машины Тьюринга». Согласно приведенной выше аргументации, прежде, чем рассматривать саму возможность создания такого устройства, мы должны отыскать надлежащую физическую теорию редукции квантового состояния (OR) – а насколько мы сейчас далеки от такой теории, сказать очень сложно. Возможно также, что возникнут какие-то дополнительные неожиданные трудности, обусловленные неизвестными пока специфическими особенностями будущей OR-теории.

Как бы то ни было, если мы хотим построить такое невычислительное устройство, нам всё равно придется, я думаю, начать с отыскания теории. Впрочем, возможно, что и не придется: история помнит немало случаев, когда между открытием новых необычных физических эффектов и их теоретическим объяснением проходило много лет. Хорошим примером может послужить сверхпроводимость, обнаруженная экспериментально (Хейке Камерлинг-Оннесом в 1911 году) почти за пятьдесят лет до того, как Бардин, Купер и Шриффер получили наконец (в 1957 году) полное квантово теоретическое ей объяснение. В 1986 году была открыта высокотемпературная сверхпроводимость (см. [343]) – также при полном отсутствии предварительных чисто теоретических оснований верить в ее существование. (По состоянию на начало 1994 года адекватного теоретического объяснения этому феномену у нас всё еще нет.) С другой стороны, если речь идет о невычислимых процессах, неясно даже, каким образом вообще можно определить, что поведение данного неодушевленного объекта является невычислимым. Вся концепция вычислимости опирается в значительной степени на теорию, и непосредственное наблюдение в этом случае мало что дает. Однако в рамках той или иной невычислительной теории вполне может быть описано поведение, которое демонстрирует невычислимые аспекты этой самой теории и которое вполне можно исследовать экспериментально и регистрировать с помощью каких-то реальных приборов. Я подозреваю, что в отсутствие теории вероятность наблюдать или регистрировать невычислимое поведение в каких-либо физических объектах исключительно мала.

А теперь давайте попробуем вообразить, что требуемая физическая теория – т.е., как я показал выше, невычислительная OR-теория редукции квантового состояния – у нас уже есть; кроме того, мы располагаем и некоторыми экспериментальными подтверждениями этой теории. Что нам нужно сделать для того, чтобы создать разумное искусственное устройство? А ничего – располагая одной лишь этой теорией, мы ничего сделать не сможем. Понадобится еще один теоретический прорыв – тот, что объяснит нам, как именно соответствующая организация, задействуя надлежащим образом невычислимые OR-эффекты, порождает сознание. Я, например, не имею ни малейшего понятия, что это может оказаться за теория. Как и в упомянутых выше примерах со сверхпроводимостью, есть вероятность, что на устройство с требуемыми свойствами

кто-нибудь наткнется до некоторой степени случайно раньше, чем будет разработана корректная теория сознания. Само собой разумеется, вероятность эта крайне ничтожна – разве что воспользоваться неким дарвиновским эволюционным процессом, т.е. предположить, что разум возникнет сам собой, просто по причине непосредственных преимуществ, которые обладание разумом дает его обладателю, задолго до того, как этот самый обладатель сможет понять, каким же образом всё произошло (как, собственно говоря, и случилось когда-то с нами!). Процесс этот, безусловно, будет чрезвычайно длительным, особенно если вспомнить, сколько времени потребовалось нашему с вами разуму для проявления себя в качестве такового. Возможно, гораздо более удовлетворительным путем к созданию искусственного разумного устройства покажется читателю прямое заимствование тех на первый взгляд беспорядочных, но всё же замечательно эффективных и уместных процедур, которыми мы сами многие тысячелетия с успехом пользуемся.

Разумеется, ничто из вышесказанного отнюдь не отменяет нашего желания узнать, что же все-таки происходит там, в глубинах сознания, что делает разум разумом. Я и сам хочу это узнать. Всё, о чем я говорил в этой книге, является, в сущности, доказательством одного простого утверждения: то, что происходит в сознании, отнюдь не сводится к совокупности исключительно вычислительных процессов – как многие сегодня полагают – и не может быть в полной мере понято до тех пор, пока мы не достигнем более глубокого понимания природы материи, времени, пространства и тех законов, что ими управляют. Нам потребуются также гораздо более обширные и подробные знания в области физиологии мозга, особенно на микроскопических уровнях, избегавших до недавних пор внимания исследователей.¹¹⁸ Мы должны больше узнать об условиях, при которых сознание возникает и исчезает, о его любопытных отношениях с временем, о применениях сознания и о преимуществах обладания им – и о многих других вещах, допускающих объективное исследование. Таким образом, перед нами открывается широчайшее поле деятельности, обещающее несомненный прогресс в самых разных областях.

§8.2. Что компьютеры умеют делать хорошо... и что не очень

Даже зная о том, что существующая концепция компьютера не позволяет достичь ни подлинной разумности, ни какого бы то ни было осознания себя, ни в коем случае не следует сбрасывать со счетов огромную мощь современных компьютеров, которая в ближайшей перспективе, по-видимому, увеличится и вовсе до невообразимых пределов (см. §1.2, §1.10 {= [МОИ № 17](#)} и [267]). Пусть эти машины и не понимают того, что они делают, они делают это невероятно быстро и точно. Не смогут ли компьютеры таким образом (пусть и неразумным) достичь – к тому же с большей эффективностью – тех же результатов, для получения которых мы используем разум? Можем ли мы сказать заранее, в каких областях компьютерные системы добьются больших успехов, а в каких им никогда не удастся превзойти разум?

Уже сегодня компьютеры замечательно играют в шахматы – приближаясь к уровню лучших гроссмейстеров-людей. В шашки компьютер «Чинук» обыграл всех противников за исключением абсолютного чемпиона мира Мариона Тинсли. А вот в древней восточной игре го компьютеры, как выясняется, не сильны. Компьютер здесь получает преимущество только в том случае, когда продолжительность хода ограничена; если же дать человеку достаточно времени на ход, то компьютер, как правило, оказывается в проигрыше. Шахматные задачи глубиной в два-три хода компьютер решает практически мгновенно, вне зависимости от того, насколько сложной находит задачу человек. С другой стороны, простая по замыслу, но требующая для решения, скажем, пятьдесят или сто ходов задача может привести к полному поражению компьютера, тогда как опытный шахматист-человек, возможно, никаких трудностей и не встретит (см. также §1.15 и рис. 1.7 {= [МОИ № 17](#)}).

Эти особенности по большей части объясняются различиями в способностях, присущих компьютеру и человеку. Компьютер всего лишь выполняет вычисления, не понимая при этом, что он делает, – хотя он и пользуется опосредованно тем пониманием, которое программисты вложили в написание программы. Компьютер может хранить и использовать большой объем

¹¹⁸ В.Э.: Всё «с точностью до наоборот». Как раз всё это и не важно, а надо принять постулат о том, что разум является результатом работы системы обработки информации в мозге (в биологическом компьютере) – а потом на профессиональном уровне программирования расписать, как именно должны работать программы, чтобы получить все наблюдаемые эффекты «сознания» и вообще интеллекта.

информации; человек, впрочем, на это тоже способен. Компьютер может многократно, чрезвычайно быстро и точно выполнять предписанные ему программистами операции; его действия абсолютно бездумны, но по скорости и точности далеко превосходят возможности любого человека. Игрок-человек оценивает ситуацию и составляет осмысленные планы, располагая при этом общим пониманием игры вообще и данной конкретной позиции в частности. Эти способности компьютеру абсолютно недоступны,¹¹⁹ однако недостаток действительного понимания он зачастую с успехом заменяет вычислительной мощностью.

Предположим, что количество возможных вариантов, которые компьютеру необходимо рассмотреть за один ход, равно, в среднем, p ; тогда при глубине в m ходов компьютеру придется рассмотреть p^m альтернатив. Если расчет каждой альтернативы занимает в среднем время t , то полное время T , необходимое для расчета задачи на такую глубину, составит

$$T = t \times p^m.$$

В шашках число p не бывает очень большим – скажем, четыре, – что позволяет компьютеру за отведенное ему время просчитывать дальнейшую игру на значительную глубину, вплоть до двадцати ходов ($m = 20$), тогда как в игре го нередки ситуации, когда $p = 200$, и сравнимая по мощности компьютерная система справится в этом случае не более чем с пятью ($m = 5$) ходами или около того. Шахматы располагаются где-то посередине. Кроме того, необходимо учесть, что человеческие оценки и понимание гораздо медленнее, нежели компьютерные вычисления (для человека t велико, для компьютера – малó), однако с помощью этих оценок человек способен значительно сократить эффективное число p (для человека эффективное значение p малó, для компьютера – велико), поскольку достойной дальнейшего рассмотрения человек сочтет лишь малую часть всех доступных альтернатив.

В общем случае из этого следует, что в играх, где p велико, но может быть значительно уменьшено посредством понимания и оценки,¹²⁰ относительное преимущество получает игрок-человек. При достаточно большом T человеческая способность сократить «эффективное p » увеличивает m в формуле $T = t \times p^m$ гораздо быстрее, нежели этого можно добиться, уменьшая t (что как раз очень хорошо умеют делать компьютеры). Однако при малом полном времени T более эффективным оказывается уменьшение t (поскольку существенные для данной игры значения m будут, скорее всего, тоже небольшими). Эти выводы представляют собой простые следствия из «экспоненциальной» формы выражения $T = t \times p^m$.

Приведенное рассуждение страдает некоторой упрощенностью, однако суть его, полагаю, достаточно ясна. (Если вы не математик, но хотите получить представление о том, как ведет себя выражение $t \times p^m$, попробуйте подставить в него различные значения t , p и m .) Я не вижу особого смысла углубляться здесь в подробности, но кое-что, думаю, следует прояснить. Кто-то, возможно, полагает, что «бóльшая глубина вычисления», выражаемая числом m , – это вовсе не то, чего стремится достичь игрок-человек. Спешу разуверить: в действительности человек стремится именно к этому. Когда игрок-человек определяет ценность позиции на несколько ходов вперед, а затем решает, что дальше ее просчитывать смысла нет, такое вычисление является в действительности вычислением гораздо большей глубины, поскольку человеческая оценка охватывает и возможный эффект нескольких последующих ходов. Как бы то ни было, с помощью упрощенных соображений такого рода можно в общих чертах понять, почему научить компьютер хорошо играть в го гораздо сложнее, чем научить его хорошо играть в шашки, почему у компьютеров лучше получается решать короткие шахматные задачи и почему компьютеры получают относительное преимущество в играх с ограничением на время хода.

Подчеркнем еще раз главное отличие: человеческий мозг обладает способностью, какой компьютер принципиально лишен, – мозг способен выносить суждения, основанные на понимании.¹²¹ Именно это различие и приводит к следствиям, описанным в общем виде в вышеприведенных простых рассуждениях (а также в рассуждениях относительно шахматной

¹¹⁹ В.Э.: Когда «игрок-человек оценивает ситуацию и составляет осмысленные планы», он просто работает по другому алгоритму, чем тот компьютер, о котором здесь говорит Пенроуз. Другой алгоритм – и больше ничего. И я как программист, много десятилетий проводивший за профессиональным составлением программ, без особого труда представляю (видимо, в отличие от Пенроуза) КАКИМ именно должен быть этот ДРУГОЙ алгоритм. Так что компьютеру всё это ДОСТУПНО, – нужно просто пускать другую программу. Ну, она сложная – да, я представляю, но она реализуема.

¹²⁰ В.Э.: То есть, при помощи других алгоритмов, кроме прямого перебора вариантов.

¹²¹ В.Э.: То есть, он способен работать по некоторым другим алгоритмам, которые на современных компьютерах начисто не пускали.

задачи, представленной на рис. 1.7 в §1.15 {= МОИ № 17}). Сознательное понимание – процесс сравнительно медленный,¹²² однако он может значительно сократить число альтернатив, требующих серьезного рассмотрения, существенно увеличив таким образом эффективную глубину вычисления. (По достижении определенной точки необходимость в рассмотрении отдельных альтернативных вариантов и вовсе отпадает.) И вообще, всем, кому интересно, чего компьютеры могут достичь в будущем, я, думаю, могу дать хорошую подсказку: попытайтесь ответить на вопрос, требуется ли для выполнения той или иной задачи подлинное понимание. Многие вещи в нашей повседневной жизни не требуют для своего выполнения какого-то особого понимания, и вполне возможно, что с ними отлично справятся роботы с компьютерным управлением. Уже сейчас существуют управляемые искусственными нейронными сетями машины, успешно выполняющие такого рода задачи. Например, машины научились достаточно хорошо распознавать лица, производить геологическую разведку, находить по звуку неполадки в работе различных механизмов, разоблачать мошенничества с кредитными картами и т.д.¹²³ Там, где применение таких машин возможно, их эффективность в общем случае приближается к средней эффективности экспертов-людей (а порой и превосходит ее). Однако вследствие особенностей необходимого в данном случае «восходящего» программирования, мы не увидим здесь того уровня мощной машинной «компетентности», какой присущ нисходящим системам (скажем, шахматным компьютерам), или того, что – еще более впечатляюще – демонстрируют компьютеры при выполнении обыкновенных численных расчетов, в какой-либо области даже лучшие вычислители-люди и близко не подходят к производительности средних по сегодняшним меркам компьютеров. Что же касается задач, с которыми эффективно справляются искусственные нейронные сети (восходящего типа), то задействуемое в выполнении таких задач людьми понимание, если честно, едва ли превышает способности компьютеров, поэтому в таких областях от компьютеров можно ожидать некоторого ограниченного прогресса. Там, где компьютерные программы имеют по большей части нисходящую организацию (прямые расчеты, шахматные программы, научные вычисления), компьютеры способны достичь огромной мощности и эффективности. В этих случаях компьютер также не нуждается в подлинном понимании выполняемых им действий, только здесь всё необходимое понимание предварительно вложено в программу человеком (см. §1.21 {= МОИ № 17}).

Следует упомянуть и о том, что в системах нисходящего типа очень часты компьютерные ошибки, возникающие из-за ошибок в программах. Впрочем, такая ситуация является результатом человеческой ошибки, а это совершенно иное дело. Существуют – и порой даже приносят реальную пользу – автоматические системы исправления ошибок, однако они способны выловить далеко не все ошибки, некоторые оказываются им не по зубам.

Опасность чрезмерно доверчивого отношения к системам с полным компьютерным управлением хорошо иллюстрируется ситуациями, в которых упомянутая система в течение долгого времени работает вполне приемлемо, создавая, возможно, у человека впечатление, что она понимает, что делает. И вдруг неожиданно она выкидывает нечто совершенно безумное, что недвусмысленно показывает, что никакого подлинного понимания в ее действиях никогда не было (как в случае с неспособностью компьютера «*Deep Thought*» решить шахматную задачу, изображенную на рис. 1.7). Так что никогда не теряйте бдительности. Вооруженные знанием того, что «понимание» просто-напросто не является вычислительным качеством, мы всегда должны помнить: никакой робот с компьютерным управлением таким качеством ни в коей мере обладать не может.

Разумеется, в отношении обладания способностью к пониманию люди и сами очень друг от друга отличаются. Как и компьютер, человек тоже может создать у окружающих впечатление присутствия в его действиях понимания, когда на самом деле никакого понимания там нет. Как правило, имеет место своего рода компромисс между подлинным пониманием, с одной стороны, и памятью и способностью к счету – с другой. Компьютеры сильны в последнем, но не способны достичь первого. Как хорошо известно преподавателям на всех уровнях (но, увы, не всегда известно правительственным чиновникам), гораздо более ценной во всех отношениях является способность к пониманию. Именно понимания (а не просто попугайского зазубривания правил и

¹²² В.Э.: Это так – потому что алгоритмы, по которым «сознательное понимание» работает, конечно, не тривиальны и требуют времени.

¹²³ См., напр., [242].

фактов) стремится добиться от своих учеников учитель.¹²⁴ Одно из требований к составителю экзаменационных билетов (особенно в математике) как раз в том и заключается, чтобы по ответам абитуриента на вопросы можно было бы судить о его способности именно к пониманию, отдельно от способностей к запоминанию или счету – хотя эти последние, надо признать, также не лишены некоторой полезности.

§8.3. Эстетика и т.д.

В вышеприведенных рассуждениях я говорил, по большей части, о способности к «пониманию», полагая ее существенным компонентом, напрочь отсутствующим в любой чисто вычислительной системе.¹²⁵ Именно эта способность фигурировала в гёделевском рассуждении в §2.5 {= МОИ № 17} – и именно ее отсутствие в бездумности вычислительного процесса продемонстрировало существенную ограниченность вычислений, побудив нас тем самым к поискам лучшего. И всё же «понимание» – это лишь одна из способностей, за которые мы ценим сознательное восприятие. В более общем смысле мы, обладающие сознанием существа, получаем преимущество в любых обстоятельствах, где мы можем непосредственно «чувствовать» то, что нас окружает; и этому вычислительные системы не «научатся» никогда.¹²⁶

Меня спросят: каких же таких преимуществ оказывается лишен робот с компьютерным управлением в результате своей неспособности чувствовать? Что с того, что он не в состоянии оценить, скажем, ни красоту звездного неба, ни величественное великолепие Тадж-Махала тихим вечером, ни волшебных переплетений фуги Баха, ни даже суровой красоты теоремы Пифагора¹²⁷? Можно просто сказать, что робот много теряет, не будучи способным ощутить то, что ощущаем мы, сталкиваясь с такими проявлениями совершенства. Однако это далеко не весь ответ. Попробуем спросить иначе. Пусть робот действительно не способен ничего чувствовать, но нельзя ли запрограммировать компьютер таким хитроумным образом, чтобы он, тем не менее, смог создать великое произведение искусства?

Этот вопрос представляется мне чрезвычайно деликатным. Кратким ответом на него, думаю, будет «нет» – хотя бы по той причине, что компьютер не способен испытывать чувственные ощущения, необходимые для того, чтобы отличить хорошее от плохого или превосходное от посредственного. Но тут можно задать встречный вопрос: а почему для того, чтобы вырабатывать собственные «эстетические критерии» и формировать собственные суждения, компьютер непременно должен обладать способностью «чувствовать»? Почему такие суждения не могут просто «возникнуть» после достаточно длительного обучения (восходящего типа)? Я, впрочем, думаю, что, как и в случае со способностью к пониманию, гораздо более вероятно, что упомянутые критерии всё же придется в компьютер предварительно ввести, причем для получения этих самых критериев потребуются детальный нисходящий анализ, выполненный людьми (вполне возможно, не без помощи компьютера), в полной мере обладающими эстетическим чувством. Разработкой подобного рода схем занимались многие исследователи проблемы ИИ. Например, Кристофер Лонгет Хиггинс (университет Суссекса) разработал несколько различных компьютерных систем, сочиняющих музыку согласно заложенным в них критериям. Еще в восемнадцатом веке Моцарт с современниками показали, как можно сочинять музыку с помощью так называемой «музыкальной игры в кости» – сочетая известные эстетически приятные фрагменты со случайными элементами, можно получать вполне сносные композиции. Аналогичные устройства были созданы и в области графических искусств – например, программа «AARON», разработанная Гарольдом Коэном, способна выдавать на гора в больших количествах «оригинальные» графические работы, генерируя случайные элементы и комбинируя их с имеющимися в ее распоряжении фиксированными образами в соответствии с

¹²⁴ В.Э.: Да – в «мое время» было так. Везде кругом считалось, что именно понимания следует добиваться; я и сам так считал – и в результате дошел до Веданской теории. Но дальнейший мой жизненный опыт показывает, что критерии изменились. Теперь ставка делается на тупое зазубривание, а понимание презируется. Особенно это я испытал «на своей шкуре» в связи с Веданской теорией.

¹²⁵ В.Э.: Так называемое «понимание» представляет собой работу многочисленных других алгоритмов вокруг того алгоритма, который Пенроуз полагает «чисто вычислительной системой».

¹²⁶ В.Э.: ...не научатся никогда – пока их этому не научат.

¹²⁷ В.Э.: Примитивный робот, раз всё это не умеет.

определенными правилами.¹²⁸ (Множество примеров такого «компьютерного творчества» можно найти в книге Маргарет Боден «Творческий разум» [32]; см. также [261].)

Думаю, что выражу общее мнение, если скажу, что среди продуктов такого рода деятельности пока нет ничего такого, что могло бы выдержать сравнение с любым творением умеренно способного художника-человека. Наверное, здесь уместно сказать, что даже при весьма значительных объемах предварительно введенных данных создаваемые компьютером «шедевры» оказываются напрочь лишены «души»! Иначе говоря, картина ничего не выражает, потому что компьютер ничего не чувствует.

Разумеется, случайно сгенерированная компьютерная работа может, просто по чистой случайности, оказаться и подлинным шедевром огромной художественной ценности.¹²⁹ (Равно как и набирая буквы случайным образом, можно когда-нибудь получить «Гамлета».) В самом деле, следует признать, что и Природа способна волею случая сотворить настоящие произведения искусства, например, скалы причудливых очертаний или звезды в небе. Однако без способности чувствовать эту красоту невозможно отличить прекрасное от безобразного. Фундаментальная ограниченность полностью вычислительной системы проявится в полной мере еще в процессе отбора.

Опять же можно представить, что человек снабдит компьютер вычислительными критериями для такого различения, и это, возможно, какое-то время будет работать, коль скоро машине останется только генерировать очередные вариации на тему всё того же эталона (возможно, так и создается большая часть рядовых «произведений» популярного искусства) – до тех пор, пока плоды такой деятельности не станут вызывать зевоту и нам не захочется чего-нибудь нового. На этом этапе машине потребуется какое-либо подлинное эстетическое суждение извне, чтобы выяснить, какие «новые идеи» имеют художественную ценность, а какие – нет.

Итак, помимо способности к пониманию, существуют и другие качества, каким полностью вычислительная система никогда не «научится» – например, способность к эстетическому восприятию. Сюда же, как мне представляется, следует отнести и все прочие качества и способности, что требуют осознания, – например, способность к нравственному суждению. Как мы убедились в первой части книги, суждение об истинности или ложности утверждения невозможно свести к чистому вычислению.¹³⁰ То же применимо (возможно, даже с большей очевидностью) и к суждениям о прекрасном или о добром. Все эти способности требуют осознания и, как следствие, недоступны роботам с полностью компьютерным управлением. Для имитации роботом наличия этих способностей необходимо постоянное дополнительное управляющее воздействие со стороны какой-либо внешней, чувствующей и осознающей себя сущности – предположительно, человека.

Безотносительно к невычислительной природе упомянутых качеств, можно поинтересоваться, являются ли «красота» и «доброта» идеями абсолютными в платоновском смысле этого слова, где определение «абсолютный» применимо только к истине¹³¹ – в особенности, к математической истине. Сам Платон высказывался в поддержку такой точки зрения. Может

¹²⁸ **В.Э.:** Это правильный алгоритм. В принципе так же работает и человеческий мозг при его творчестве. Если компьютерные творения (пока) не могут состязаться с человеческими (лучшими человеческими – потому, что среди человеческих творений есть масса таких, которые хуже теперешних компьютерных), то это потому, что в компьютере не встроен весь остальной интеллект, имеющийся у художника; у компьютера (пока) нет «души», которая выражала бы в творении свою тоску, страдания, желания и т.д. Но всё это можно построить – и в общем понятно – КАК.

¹²⁹ **В.Э.:** Не существует никакого объективного критерия, что признавать шедевром, а что нет. Шедевром является то, что таковым признается определенной группой людей. Поэтому компьютер принципиально не может создать шедевр – просто потому, что художники его творение таковым никогда не признают (в значительной степени – из-за зависти и по расовым соображениям).

¹³⁰ **В.Э.:** Можно. И то же самое относится и к эстетическим и нравственным и всем прочим критериям. Всё это делает мозговой компьютер, и всё это может – в принципе – делать также и другой компьютер.

¹³¹ **В.Э.:** Да – только к истине. Все остальные критерии – относительны. Именно поэтому ценность (объективная ценность!) научного произведения определяется правильностью и новизной его идей – независимо от того, КАК оно написано: в докторской диссертации ли, в рецензируемом ли журнале, или в виде писем друзьям или в интернетовской дискуссии и т.д. А произведение художественное не имеет объективной ценности. Оно ценно лишь постольку, поскольку его таковым признают читатели (зрители, слушатели и т.д.). Именно поэтому ценность научных идей – если они истинны и новы – люди ОБЯЗАНЫ признавать, а ценность беллетристики – не обязаны.

быть, осознавая, мы каким-то образом связываемся с этими абсолютами, и именно в этом заключается уникальное предназначение сознания? Может быть, здесь и следует искать ключ к тому, чем наше сознание является в действительности и для чего оно нам дано? Не играет ли сознание роль своего рода «моста» между физическим миром и миром платоновских абсолютов? Эти вопросы мы еще раз затронем в последнем параграфе книги.

Вопрос об абсолютной природе нравственности имеет самое прямое отношение к юридическим проблемам, описанным в §1.11 {= [МОИ № 17](#)}. Некоторым образом связан с ним и вопрос о сущности «свободы воли», поставленный в конце §1.11: возможно ли, что есть нечто, что не определяется наследственностью, влиянием окружения и всевозможными случайными факторами, – некая отдельная «самость», играющая ведущую роль в управлении нашими действиями¹³²? Я думаю, что мы пока еще очень далеки от ответа на этот вопрос. С полной уверенностью я могу утверждать (и аргументированно доказывать) лишь одно: что бы ни управляло в конечном счете нашим поведением, это что-то в принципе находится за пределами возможностей тех устройств, которые мы сегодня называем «компьютеры».

§8.4. Опасности компьютерных технологий

Любые широко применяемые технологии несут с собой как блага, так и опасности. Так, помимо тех очевидных преимуществ, которые дают нам компьютеры, с быстрым развитием этой технологии связано и множество потенциальных угроз обществу. Одной из главных проблем, по-видимому, является чрезвычайная сложность всех совокупностей взаимосвязей, с которыми мы сталкиваемся благодаря компьютерам, – она приводит к тому, что ни один отдельно взятый индивидуум сегодня просто не в состоянии охватить разумом ни происходящее в целом, ни его последствия. И дело не только в самих компьютерах и их технических возможностях, но еще и в почти мгновенной глобальной связи между объединенными в сеть компьютерами по всему миру. Часть возможных проблем находит отражение в нестабильном поведении фондового рынка, где сделки теперь совершаются практически мгновенно на основании общемировых компьютерных прогнозов. Здесь, пожалуй, проблема заключается не столько в недостатке понимания каждым отдельным человеком всей взаимосвязанной системы как единого целого, сколько в нестабильности (не говоря уже о несправедливости), изначально заложенной в систему, которая идеально приспособлена для того, чтобы отдельные ее пользователи мгновенно сколачивали себе состояния путем опережения соперников в скорости счета или быстроте получения информации. Впрочем, вполне вероятно и то, что причиной различного рода нестабильностей и потенциальных опасностей станет одна лишь сложность системы как целого.

Подозреваю, что найдутся люди, которым возможный в недалеком будущем выход уровня сложности системы взаимосвязей за пределы человеческого понимания не покажется такой уж серьезной проблемой.¹³³ Такие люди, возможно, верят в то, что когда-нибудь компьютеры и сами приобретут необходимое понимание системы. Однако, как мы могли убедиться, понимание отнюдь не относится к тем качествам, на которые компьютеры когда-либо окажутся способны, так что помощи с той стороны ждать не приходится.

Из одного лишь факта чрезвычайно быстрого развития компьютерных технологий (приводящего к тому, что компьютерная система чуть ли не на следующий день после своего появления на рынке становится морально устаревшей) вытекают и многие другие дополнительные проблемы. Необходимость в непрерывной модернизации и использование систем, зачастую не прошедших под давлением конкуренции надлежащих испытаний, – это лишь малая их часть, и в будущем ситуация вряд ли изменится к лучшему.

Глубинные же проблемы, с которыми мы только начинаем сталкиваться в новом высокотехнологичном, компьютеризованном и стремительно меняющемся мире, слишком многочисленны, и было бы безрассудством с моей стороны пытаться охватить их здесь все. Среди прочего в голову приходят разглашение частной информации, промышленный шпионаж и

¹³² В.Э.: Введение такой «самости» было бы новым, самостоятельным постулатом. Но вводить такой постулат нет необходимости (по «лезвию Оккама»), потому что всё прекрасно объясняется и без него.

¹³³ В.Э.: Но ведь «все взаимосвязи» никогда не находились «в пределах человеческого понимания». Ни Чингисхан, ни Сталин, ни кто другой никогда не мог охватить всё и полностью контролировать ситуацию. Мир всегда – изначально – неся сам по себе, никем не управляемый и не контролируемый. Так он несется и сегодня. Что изменилось-то?

компьютерные диверсии. Еще одна тревожная возможность – «подделка» внешнего вида человека с целью использования, скажем, в телевизионной передаче для выражения мнений, какие «оригинал» ни в коем случае выразить не собирался.¹³⁴ Возникают и всевозможные социальные проблемы, не являющиеся непосредственно компьютерными, но с компьютерами так или иначе связанные – например, благодаря способности компьютеров замечательно точно записывать и затем воспроизводить музыку и изображение, таланты небольшой избранной группы исполнителей можно без труда распространить по всему миру, что, вероятно, поставит в весьма невыгодное положение остальных, не столь именитых артистов. С аналогичной проблемой мы сталкиваемся и в случае с так называемыми «экспертными системами», позволяющими поместить мастерство и опыт нескольких избранных специалистов – скажем, от юриспруденции или медицины – в код компьютерной программы, что может привести к нанесению ущерба остальным практикующим врачам и юристам.¹³⁵ Впрочем, думаю, что заменить специалиста-человека такие компьютерные экспертные системы вряд ли смогут (их удел – специалисту помогать), поскольку они не способны на понимание, которое может дать только личное общение.

Разумеется, есть у всех этих разработок и «светлая сторона» – если всё сделано правильно. Плоды мастерства других (неважно, художников или ремесленников) сегодня более доступны, и их может оценить гораздо большее количество людей.¹³⁶ Что касается проблемы сохранности частной информации, то уже сейчас существуют так называемые «шифры с открытым ключом» (см. [138]), которыми могут пользоваться как отдельные индивидуумы, так и небольшие компании (при этом не менее эффективно, нежели компании крупные), и которые, по-видимому, обеспечивают абсолютную защиту от «подслушивания». Использование таких шифров стало возможным лишь теперь, при наличии быстрых и мощных компьютеров – хотя эффективность этого способа шифрования до сих пор ограничена вычислительной сложностью факторизации больших чисел (возможно, здесь на смену обычным придут квантовые вычисления; некоторые идеи, указывающие на возможность создания в будущем квантовых компьютеров, изложены в §7.3, см. также [277, 278]). Как я упоминал в §8.1, возможно, что скоро для защиты от подслушивания мы будем использовать квантовую криптографию, эффективность которой также зависит от скорости выполнения значительных объемов вычислений. Очевидно, что нет однозначного способа оценить преимущества и опасности, порождаемые любой новой технологией, будь она непосредственно связана с компьютерами или нет.

В качестве заключительного комментария к таким компьютерно-социальным проблемам я хочу представить читателю небольшую вымышленную историю, которая в некотором роде выражает то беспокойство, которое я ощущаю в связи с возникновением целой новой области потенциальных проблем. Насколько мне известно, об этом новом классе «компьютерных» опасностей еще никто не говорил, однако мне они представляются весьма серьезными.

§8.5. Неправильные выборы

Приближается день долгожданных выборов. На протяжении последних недель были проведены многочисленные опросы общественного мнения. Результаты почти единодушно предсказывают отставание правящей партии по голосам на три–четыре процента. Как и ожидалось, имеются некоторые колебания и отклонения от этой цифры в ту или иную сторону – ожидалось, поскольку цифры в опросах базируются на относительно малых выборках (где-то в пределах нескольких сотен избирателей за раз), тогда как по населению в целом (несколько

¹³⁴ Эту идею мне описал Жозель де Роснэ.

¹³⁵ В.Э.: Но ведь это всегда было. Кто-то входил в фавориты к королю или к диктатору (как Лысенко к Сталину) и наносил вред остальным... Что в принципе меняется от применения компьютеров?

¹³⁶ В.Э.: Самое главное всё же – доступность информации по любому вопросу, причем – мгновенная. Так ли давно было то время, когда я за 200 рублей – целую месячную зарплату – с большими волнениями купил в антиквариате Большую советскую энциклопедию? И тайно мечтал: как бы мне приобрести Британскую... Попросить своих американских родственников – что ли? Но как привезти? И впустит ли советская таможня? Затея, конечно, осталась только в мечтах. Никого я так и не просил... А теперь передо мной все энциклопедии мира! И даже вытаскивать том и открывать листы не надо. Просто набрал в строке *Google*, скажем, «квантовый компьютер» и готово! – мне и статья Википедии, и целая куча других статей! Я до того распустился, что теперь охотнее ищу в Интернете, чем на собственной книжной полке (на полке еще фиг найдешь – эти книги так умеют прятаться!)

десятков миллионов человек) наблюдаются существенные изменения от места к месту. В самом деле, предел погрешности каждого из опросов и сам может составить те самые три–четыре процента, так что ни на один из опросов в действительности полностью положиться нельзя. И всё же в совокупности свидетельства производят куда более выгодное впечатление. Взятые вместе, результаты опросов демонстрируют гораздо меньшую погрешность, а согласие между ними нарушается как раз таким разбросом, какой предсказывает статистическая теория. Усредненным результатам теперь, наверно, вполне можно доверять, причем погрешность составляет менее двух процентов. Поговаривают, правда, что в канун дня выборов цифры в опросах заметно сместились в пользу правящей партии; а в сам день выборов кое-кого из ранее воздержавшихся (или даже из активных противников) вполне могут «уговорить» отдать-таки правящей партии свой голос. Однако даже если так, это смещение не принесет правящей партии большой пользы, разве что полученный в результате отрыв от ближайшего соперника составит не менее 8% голосов, поскольку только в этом случае правящая партия получит то минимальное большинство голосов, которое необходимо для того, чтобы предотвратить объединение своих противников в коалицию. Впрочем, опросы – это всего лишь предварительные прикидки, разве нет? Только подлинное голосование выразит действительную волю народа, а какова эта воля, мы узнаем из подсчета голосов в день выборов.

День выборов настал... и прошел. Голоса подсчитали, и результат почти для всех оказался полной неожиданностью – особенно для организаций, проводивших опросы и вложивших в них так много сил и умения (не говоря уже о репутации). Правящая партия остается у власти, получив вполне удовлетворительное большинство голосов – те самые 8% преимущества над ближайшими соперниками. Огромное количество избирателей пребывает в полном недоумении – и даже в ужасе. Другие, хотя и удивлены не меньше, но весьма довольны. Однако результаты выборов не соответствуют истине. Они были фальсифицированы с помощью хитроумных средств, и никто ничего не заметил. Заранее наполненных урн для голосования там не было, бюллетени никто не терял, не подменивал и не дублировал. Люди, занятые в подсчете голосов, сделали свое дело добросовестно и по большей части без ошибок. И всё же результаты выборов оказались чудовищно подтасованы. Как же так получилось, и кто это сделал?

Не исключено, что весь кабинет правящей партии в полном составе понятия не имеет о том, что произошло. Не факт, что кто-то из них является непосредственным виновником преступления, однако в выигрыше в результате оказываются они все. За кулисами скрываются другие, те, кто имеет основания опасаться за собственное существование, если правящей партии случится потерпеть поражение. Они входят в состав некоей организации, которая пользуется бóльшим доверием у правящей партии (и не без причины!), чем у оппозиции, – партия не только строго и бережно хранит тайну темных делишек этой организации, но и способствует расширению ее деятельности. Хотя сама организация вполне законна, многое из того, чем она занимается, законным не назовешь, не чурается она и незаконных политических игр. Возможно, члены организации искренне (заблуждаться тоже можно искренне) опасаются, что противники правящей партии разрушат страну или даже «предадут» ее во имя чуждых идеалов иностранных держав. Есть в организации и свои эксперты – непревзойденные мастера – в области создания компьютерных вирусов!

Помните, что способен натворить компьютерный вирус? Ближе всего нам знакомы те, что в некий заранее назначенный день уничтожают всю информацию на дисках компьютера, этим вирусом зараженного. Бывает так, что пользователь сидит и с ужасом наблюдает, как буквы на дисплее его компьютера ссыпаются со своих мест в нижнюю часть экрана и исчезают. Бывает, на экране появляется какое-нибудь непристойное сообщение. В любом случае данные могут оказаться потерянными безвозвратно. Более того, если вставить в такой компьютер дискету и попробовать ее прочитать, то дискета тоже подхватит заразу и передаст ее при случае на другой компьютер. Замеченный вирус можно, в принципе, уничтожить с помощью антивирусной программы, но только в том случае, если природа вируса известна заранее. Если же вирус успел нанести удар, то поделаться уже ничего нельзя.

Такие вирусы обычно создают хакеры-любители, зачастую этими хакерами становятся разочаровавшиеся в жизни программисты, желающие кому-нибудь насолить по тем или иным причинам, иногда вполне объяснимым, иногда нет. Однако члены упомянутой организации – отнюдь не любители; им немало платят, и в своей области они настоящие профессионалы. Возможно, многие из их действий продиктованы подлинной заботой об интересах родной страны, но бывает, несомненно, и так, что по указанию своих непосредственных начальников они

делают вещи, менее прощительные с точки зрения морали. Созданный программистами организации для известной цели вирус невозможно засечь стандартными антивирусными программами, и сработать он должен лишь однажды, в заранее назначенный день – вождь правящей партии, конечно же, знает, на какой день назначены выборы, знают об этом и те, кому вождь доверяет. После того, как задание будет выполнено, – а на этот раз задание предстоит куда более тонкое, чем просто стереть данные, – вирус самоуничтожится, не оставив после себя ни единого следа, если не считать, разумеется, самого преступления.

Для того, чтобы такой вирус надлежащим образом сработал на выборах, необходимо, чтобы какой-то этап в подсчете голосов происходил без участия людей (считающих либо вовсе без применения техники, либо с помощью карманного калькулятора). (Вирус может инфицировать только универсально программируемые компьютеры.) Допустим, содержимое отдельных урн считают люди и считают правильно; однако результаты этих подсчетов необходимо складывать. Насколько же эффективнее, точнее, да и современнее складывать эти числа – а их там, может быть, сотни – на компьютере, нежели вручную или с помощью калькулятора! Разумеется, никаких ошибок здесь просто быть не может. Чей бы компьютер ни использовался для подсчета общей суммы, результат будет одинаковым. Члены правящей партии получают в точности тот же результат, что и их главные противники, равно как и любая из третьих заинтересованных партий или вовсе нейтральный наблюдатель. Они даже могут использовать компьютеры разных моделей или марок, на результат это никоим образом не повлияет. Экспертам нашей зловещей организации об этих разных компьютерах известно всё – и для каждого заготовлен свой вирус. По своей структуре вирусы для разных систем несколько отличаются друг от друга, однако последствия их «работы» будут одинаковыми, а согласие между результатами, полученными с помощью различных машин, убедит даже самых упрямых скептиков.¹³⁷

Несмотря на то, что все машины дадут одинаковые цифры, цифры эти все до единой будут неверными. Все цифры хитроумно фабрикуются в соответствии с некоей точной формулой, зависящей до некоторой степени от реального распределения голосов, – отсюда согласие между результатами, полученными с помощью различных компьютеров, и смутное правдоподобие этих самых результатов, – с тем, чтобы дать правящей партии именно то преимущество, в котором она нуждается; и хотя доверчивость избирателей при этом подвергается некоторому испытанию, общий результат представляется вполне приемлемым. Всё выглядит так, будто значительное число избирателей в последнюю минуту решило проявить осторожность и проголосовать за правящую партию.

В гипотетической ситуации, описанной в этой истории, избиратели на самом деле вовсе не передумывали в последний момент, и результаты выборов оказались весьма далеки от истинного положения дел. Хотя написание ее меня вдохновили наши последние (1992 год) выборы в британский парламент, я должен особо подчеркнуть, что официально принятая в Великобритании система подсчета голосов возможность такого рода мошенничества полностью исключает. На всех этапах подсчет выполняется вручную. Может, конечно, показаться, что этот метод неэффективен и давно устарел, однако отказываться от него еще, как мне представляется, рано – по крайней мере, до тех пор, пока не будет создана система, снабженная простыми и исключаящими малейшее подозрение средствами защиты от подобного мошенничества.

С другой, более положительной, стороны, современные компьютеры предлагают замечательные возможности для введения систем голосования, в которых мнение избирателей будет представлено гораздо объективнее, чем сейчас. Здесь, разумеется, не место вдаваться в подробное обсуждение этих вопросов, однако суть такова, что новые системы позволяют избирателю не просто отдать свой голос за одного-единственного кандидата, но сообщить и множество иных сведений. Все эти сведения компьютерная система способна проанализировать мгновенно, и результат можно будет получить сразу же после окончания процедуры голосования. Однако, как показывает рассказанная выше история, применять такую систему

¹³⁷ В.Э.: В этом рассказе упущено только одно – вирус еще надо засадить в те компьютеры, на которых будут считать голоса. А по рассказу Пенроуза «Члены правящей партии получают в точности тот же результат, что и их главные противники, равно как и любая из третьих заинтересованных партий или вовсе нейтральный наблюдатель». То есть, вирусы надо занести и в компьютеры «главных противников», и «третьих заинтересованных партий» и даже «нейтральных наблюдателей». А как они туда попадут? (Помещения же, наверное, охраняются).

следует крайне осторожно, даже если в ней предусмотрены всесторонние и общедоступные проверки, убедительно предотвращающие любое такое техническое мошенничество.

Осторожность следует проявлять не только на выборах; «вирусный» метод можно применить и в других ситуациях, например, подпортить банковские счета компании-соперника. Можно придумать множество различных способов вредоносного использования специально разработанных, незаметных и коварных компьютерных вирусов. Надеюсь, что моя история убедит читателей в том, что все действия компьютеров – даже самые очевидные действия даже самых надежных компьютеров – должны постоянно контролироваться человеком. И дело здесь не столько в том, что компьютеры ничего не понимают, сколько в том, что они крайне подвержены манипуляциям со стороны тех немногих людей, кто понимает все тонкости специфики их программирования.

§8.6. Физический феномен сознания

Во второй части книги мы, не выходя за пределы научно объяснимого, попытались отыскать, если можно так выразиться, место в физике, пригодное для размещения субъективного опыта. Как выяснилось, для успеха такого поиска сегодняшние границы научного понимания придется расширить. Я почти не сомневаюсь в том, что то фундаментальное изменение, которому неминуемо должна подвергнуться наша традиционная картина физической реальности, придет откуда-то со стороны феномена редукции квантового состояния. Прежде чем физика сможет смириться с чем-то, настолько чуждым всем современным физическим представлениям, как феномен сознания, следует ожидать полного пересмотра самих основ всех существующих философских воззрений на природу реальности. По этому поводу у меня есть кое-какие краткие замечания, которые я приведу очень скоро – в следующем, последнем, параграфе. А пока давайте попробуем ответить на несколько более простой вопрос: где в известном физическом мире, учитывая предложенные на этих страницах доказательства, можно надеяться отыскать сознание?

Необходимо с самого начала внести полную ясность: выводы из упомянутых доказательств и прочих моих рассуждений носят, по большей части, «отрицательный» характер. Мы убедились, например, что современные компьютеры сознанием не обладают, но мы по-прежнему слабо представляем себе, что именно в объекте приводит к возникновению у него сознания. Основываясь на собственном опыте, мы полагаем (по крайней мере, пока), что феномен этот обычно присущ биологическим структурам. На одном конце шкалы у нас люди, и тут, конечно же, сомнений почти нет – что бы ни представляло собой в действительности сознание, оно, в нормальном своем состоянии, так или иначе связано с бодрствующим (а возможно, и со спящим) человеческим мозгом.

Что же мы видим на другом конце шкалы? Я убежден, что фокус нашего внимания следует переместить с нейронов на микротрубочки цитоскелета: именно там, вероятнее всего, возникают коллективные (когерентные) квантовые эффекты – а без такой квантовой когерентности не будет и новой ОР-физики, которая, как мне представляется, должна стать необходимым невычислимым условием для объяснения феномена сознания в научных терминах. Однако цитоскелеты есть у всех эукариотических клеток – клеток, из которых состоят растения и животные; эукариотами являются и одноклеточные организмы, такие как парамеции и амебы, но не бактерии. Следует ли из этого, что парамеция также обладает некоторым зачаточным сознанием? Возможно ли, чтобы парамеция «знала» (в любом смысле этого слова), что делает? А что же отдельные клетки человеческого тела – клетки мозга, например, или клетки печени? Может быть, когда мы поймем физическую природу процесса осознания настолько хорошо, что будем в состоянии ответить на эти вопросы, нам придется признать, что ничего такого уж нелепого в этих предположениях нет. Я не знаю. Знаю я лишь то, что проблема эта является целиком и полностью научной, а это значит, что когда-нибудь решение неизбежно будет найдено, вне зависимости от того, насколько далеки мы от этого решения сейчас.

Иногда утверждают – исходя из общих философских принципов, – что узнать, обладает ли способностью к осознанию какое бы то ни было существо, отличное от тебя самого, принципиально невозможно, не говоря уже о том, чтобы выяснить, нет ли каких-нибудь зачатков сознания у парамеции. Думаю, такая позиция чересчур узка и пессимистична. В конце концов, когда речь идет об установлении факта наличия у некоего объекта того или иного физического свойства, никто же не настаивает на абсолютной уверенности. Настанет время, и на вопросы, касающиеся способности к осознанию, мы будем отвечать с той же степенью уверенности, с какой

сегодняшние астрономы высказываются о небесных телах, удаленных от нас на многие световые годы. Еще совсем недавно ученые утверждали, что нам никогда не узнать, из чего состоят Солнце и звезды и что находится на обратной стороне Луны. Сегодня у нас есть подробные карты обратной стороны Луны (фотосъемка из космоса), а состав Солнца изучен до мельчайших подробностей (наблюдение линий солнечного спектра, а также тщательное и подробное моделирование физических процессов, происходящих внутри Солнца). Известен нам и подробный состав далеких звезд, причем с очень хорошей точностью. Мы можем даже сказать (и в некоторых отношениях сказать точно), из чего состояла вся Вселенная на начальных этапах ее развития (см. конец §4.5 {= МОИ № 17}).

Однако в отсутствие необходимых теоретических идей суждения относительно обладания сознанием не выходят (по большей части) из разряда предположений. Мое собственное предположение по этому поводу таково: с некоторых пор я совершенно уверен, что на планете Земля сознание не является исключительной прерогативой человека. В одной из наиболее захватывающих телевизионных программ Дэвида Аттенборо¹³⁸ был эпизод, после просмотра которого зрителям было трудно не поверить не только в то, что слоны, например, способны на сильные чувства, но и в то, что чувства эти не так уж далеки от тех, из каких в человеческих обществах возникают религии. Вожак стада – самка, потерявшая около пяти лет назад сестру, – ведет стадо на место ее гибели, значительно отклоняясь от обычного маршрута; прибыв на место и обнаружив останки, вожак очень осторожно поднимает с земли череп, а затем слоны начинают передавать его друг другу, поглаживая хоботами. То, что слоны способны и на понимание, убедительно, хотя и жутковато, показано в другой телевизионной программе.¹³⁹ Фильм, отснятый с вертолета, участвующего в операции, деликатно называемой «отбраковкой», очень хорошо передает ужас, охватывающий слонов, когда они до конца осознают, что происходит, и понимают, что никто из стада живым отсюда не уйдет.

Множество свидетельств имеется и в пользу наличия сознания (и самосознания) у человекообразных обезьян, и я почти не сомневаюсь, что феномен сознания присущ и животным формам, значительно менее «высокоорганизованным». Например, в еще одной телевизионной программе¹⁴⁰ – рассказывающей о чрезвычайной ловкости, решительности и изобретательности белок (некоторых) – меня особенно поразил фрагмент, в котором белка сообразила, что перекусив проволоку, она сможет освободить контейнер с орехами, подвешенный на некотором расстоянии от нее. Вряд ли этот акт понимания был инстинктивным или вытекал из какого-то прошлого опыта белки. Для того, чтобы оценить, насколько положительным окажется результат ее действия, белка должна была понять хотя бы на элементарном уровне топологию всей конструкции (см. также §1.19 {= МОИ № 17}). Мне представляется, что в данном случае мы наблюдали проявление подлинного воображения¹⁴¹ – а для этого, разумеется, необходимо сознание!

¹³⁸ «Слоны» (*Echo of the elephants*, BBC, январь 1993).

¹³⁹ «Если не пойдут дожди» (*If the rains don't come*, BBC, сентябрь 1993).

¹⁴⁰ «Грабёж среди бела дня» (*Daylight robbery*, BBC, август 1993).

¹⁴¹ В.Э.: Говоря о проявлениях «сознания» у животных, Пенроуз опять идет «от слова к объекту»: сначала есть «сознание», а потом начинает гадать – есть оно у слонов? есть оно у белок? и т.д. Более верным (как обычно) является путь «от объекта к слову». Конечно, все животные, так же, как и человек, являются материальными системами, управляемыми мозговым компьютером. Разумеется, этот компьютер самопрограммирующийся, и многие принципы его операционной системы (выработанные естественным отбором на ранних этапах филогенеза) совпадают у животных с человеком. Поэтому вопрос стоит так: какого качества и какой сложности мозговые программы способны создавать аппараты самопрограммирования того или иного биологического вида? Почти в любом учебнике по психологии можно найти описания классических опытов (Кёлера и др.): 1) Птицы не способны составить программы, которые предусматривали бы обход препятствия. Не буду описывать классический опыт Кёлера с курами (который я пересказывал в своих сочинениях уже столько раз, что он мне порядком надоел). Расскажу свое собственное наблюдение. Из окна моей квартиры видны два двора (разных домов). Они разделены проволочным забором высотой где-то 1,5 – 2 метра. Разумеется, забор прозрачный: клетки сплетенной проволоки имеют размер ок. 5 см. И вот, в соседнем дворе хозяйка бросает в окно на землю кусочки хлеба – прямо рядом с забором. Голуби стаей бросаются на хлеб. А с нашей стороны забора бегают туда-сюда один голубь, отчаянно желая тоже принять участие в общем пире, происходящем в двух метрах от него. Что стоит голубю перелететь забор высотой в 2 метра?! Но он так и остался голодным! 2) Задачи с обходом препятствия запросто решаются собаками. Кёлер, находясь в комнате вместе с собакой, бросал в зарешеченное окно кусок мяса; собака порывалась прыгнуть в окно за мясом, но решетка не давала; тогда

Почти не остается сомнений и в том, что сознание может «присутствовать» в разной степени – между «в полном сознании» и «без сознания» возможны и другие состояния. О себе, например, я могу сказать совершенно определенно: иногда я чувствую себя более «в сознании», иногда – менее (скажем, во время сна сознание присутствует в гораздо меньшей степени, чем когда я бодрствую).

Насколько же далеко мы должны зайти в наших поисках? На этот счет существуют самые различные мнения. Что касается меня, то я с трудом представляю себе, что сознанием (в какой бы то ни было степени) могут обладать насекомые – особенно после того, как я увидел документальный фильм о жизни насекомых, где было показано, как некий жук с жадностью пожирает другого жука, совершенно, по всей видимости, не обращая внимания на то, что его самого в это время ест третий. Тем не менее, как упоминалось в §1.15, поведение простого муравья отличается чрезвычайной сложностью и точностью. Надо ли полагать, что замечательно эффективные управляющие системы муравья работают вовсе без участия того принципа (каким бы он ни был), благодаря которому мы сами получаем способность понимать? Управляющие нейроны муравья также не лишены цитоскелетов, и если в этих цитоскелетах имеются микротрубочки, способные поддерживать квантовокогерентные состояния, которые, согласно моему предположению, играют ключевую роль в процессе осознания, то не следует ли из этого, что муравей является счастливым обладателем того же самого неуловимого сознания, что и мы с вами? Если же микротрубочки в человеческом мозге и в самом деле обладают той неимоверной сложностью, что необходима для поддержания коллективных квантовокогерентных процессов, то не совсем понятно, почему естественный отбор развил такую способность только в нас и в наших ближайших многоклеточных родственниках (в некоторых из них, по крайней мере). Такие квантовокогерентные состояния могли оказаться весьма полезными и для первых эукариотических одноклеточных, хотя в чем эта полезность могла бы состоять, мы можем только предполагать.¹⁴²

Одной лишь макроскопической квантовой когерентности для возникновения сознания, разумеется, недостаточно – иначе сознанием обладали бы и сверхпроводники! Однако вполне

собака кидалась в противоположную сторону, к двери и через коридор выбежала на улицу. **3)** Но собаки не способны составлять мозговые программы, в которых, помимо самого субъекта (собаки) и объекта (мяса) участвовал бы еще и третий предмет. Тысячу раз описывался опыт, где собака находилась в зарешеченной клетке; за решеткой лежал желанный кусок мяса, обвязанный веревкой, конец которой находился в клетке. Собаке нужно было только, говоря словами Пенроуза, «понять топологию конструкции», схватить в зубах веревку и притянуть к себе мясо. Но вместо этого она лишь бегала туда-сюда и скулила. **4)** Задачи, включающие третий предмет, элементарно и моментально решаются обезьянами. Они не только тянут за привязанные веревки, но и сами ищут и достают подходящие палки, а вошедший в историю науки знаменитый шимпанзе Султан даже из двух трубок, всунув одну в другую, соорудил более длинную палку, когда в окрестностях не было достаточно длинной. В оправдание птиц и собак нужно сказать, что их аппараты самопрограммирования приспособлены к тому образу жизни, который они ведут в природе. Птицы если что-то интересное видят, то и летят прямо к нему. А если объект закрывается препятствием, то они его и не видят. Летать в обход чего-то им практически никогда не нужно. Предки собак – волки – преследуя добычу стаей, предусматривают возможный внезапный поворот добычи вправо или влево, и поэтому некоторые особи стаи заблаговременно отклоняются в стороны, чтобы пресечь возможный маневр жертвы. А для этого нужно гораздо большее «пространственное воображение», нежели у птиц. Но третьи предметы волки в свои расчеты не включают; в них фигурируют только «я» и «жертва». Что же касается описанной Пенроузом белки, то ее аппарат самопрограммирования по части «понимания топологии конструкции» очевидно превосходил аппарат собак и приближался уже к аппарату обезьян. Но надо учесть, что это тоже просто соответствует тому образу жизни, который белки ведут в природе. Во-первых, они, как и обезьяны, но в противоположность собакам, живут на деревьях. Поэтому свойства висящих предметов им гораздо лучше известны, чем собакам. Белка и в лесу перегрызает ножки шишек или гроздей орехов, чтобы те падали вниз, где она их подберет. А где тут «сознание» – «не сознание» – это просто вопрос терминологии. Лучше о «сознании» вообще не говорить, а говорить о мозговых программах и о тех задачах, которые способен решить тот или иной аппарат самопрограммирования.

¹⁴² **В.Э.:** Полезно не это таинственное пенроузовское «сознание», а способность составлять мозговые программы для определенных действий. Голубь в моем дворе поел бы, если бы смог составить себе программу действий, предусматривающую перелет через забор. Собака в клетке съела бы мясо, если бы смогла составить себе программу действий, предусматривающую захват зубами веревки. Но всё это программы в общем-то довольно сложные (попробуйте заставить настольный компьютер самостоятельно найти такие решения!), и требуются миллионы лет естественного отбора, чтобы такое выработать в биологических компьютерах.

вероятно, что такая когерентность является частью того, что для сознания необходимо. Мозг обладает чрезвычайно сложной организацией, и поскольку сознание, по-видимому, представляет собой результат глобальной координации всевозможных мыслительных процессов, следует искать когерентность в масштабах, гораздо более крупных, нежели отдельные микротрубочки или даже целые цитоскелеты. Должна существовать существенная квантовая сцепленность между состояниями, поддерживаемыми внутри отдельных цитоскелетов во многих нейронах, – т.е. нечто вроде коллективного квантового состояния, охватывающего обширные области мозга. Однако и этого недостаточно. Для того, чтобы в системе могли происходить какие бы то ни было полезные невычислимые процессы – что я считаю существенной частью сознания, – необходимо, чтобы система была способна специфическим образом задействовать подлинно неслучайные (невычислимые) аспекты OR-процедуры. Предположение, которое я сделал в §6.12, дает нам (по крайней мере) некоторое представление о соответствующих масштабах, начиная с которых можно говорить о каком-то существенном действии точной и математически невычислимой OR-процедуры.

Таким образом, предложенные мною в настоящей книге соображения дают в некотором роде основу для высказывания правдоподобных догадок (пока, во всяком случае) относительно уровня, на котором можно ожидать возникновения способности к осознанию. Процессы, которые могут быть адекватно описаны в рамках вычислимой (или случайной) физики, не могут, согласно моей точке зрения, иметь отношения к сознанию. С другой стороны, даже существенное участие точной невычислимой OR-процедуры само по себе вовсе не обязательно подразумевает наличие сознания – хотя и является, на мой взгляд, необходимым для этого условием. Разумеется, критерию не достаёт определенности, однако ничего лучшего на данный момент у меня нет. Посмотрим, далеко ли он нас заведет.

Будем исходить из сделанных в §6.12 предположений относительно того, где должна проходить граница между классическим и квантовым уровнями, а также из изложенных в §7.5–§7.7 биологических уموстроений, согласно которым эту границу, возможно, следует искать где-то в области сопряжения внутренних и внешних процессов в системах микротрубочек клетки или совокупности клеток. В качестве существенного дополнения заметим, что если редукция вектора состояния происходит просто потому, что рассматриваемая система оказывается сцеплена с слишком большим объемом окружения, то процедуру OR можно считать эффективно случайным процессом, для описания которого вполне пригодна стандартная FAPP-аргументация (представленная в общих чертах в §6.6); процедура OR в данном случае полностью идентична процедуре R. Необходимо, чтобы эта редукция происходила в точности тогда, когда начинают действовать невычислительные (и пока неизвестные) правила нашей гипотетической OR-теории. Хотя об этих правилах мы ничего не знаем, мы можем (по крайней мере, в принципе) составить некоторое представление о том уровне, на котором теория начинает соответствовать реальности. Таким образом, для того, чтобы упомянутые невычислимые аспекты процедуры OR смогли сыграть свою роль, необходимо, чтобы та или иная квантовая когерентность поддерживалась до тех пор, пока перемещение вещества (вследствие взаимодействия между внутренними и внешними микротрубочковыми процессами) не достигнет определенного предела, как раз достаточного для того, чтобы OR-процедура произошла прежде, чем успеет вмешаться случайное окружение.

Что касается микротрубочек, то я предлагаю следующую картину: внутри трубок происходят «квантовокогерентные колебания», слабо связанные с вычислительной «клеточно-автоматной» активностью, обусловленной конформационными переходами димеров тубулина на внешней поверхности трубок. Пока квантовые колебания остаются изолированными, уровень для OR слишком низок. Однако, поскольку процессы внутри и снаружи связаны, квантовое состояние вскоре захватывает тубулины, и на некотором этапе происходит редукция (OR). Необходимо, чтобы OR происходила прежде, чем с квантовым состоянием окажется сцеплено микротрубочковое окружение, потому что как только возникает такая сцепленность, невычислимые аспекты OR-процедуры теряются, и она превращается в «обычную» R-процедуру.

Итак, остается лишь выяснить, достаточна ли конформационная активность тубулина в отдельной клетке (в парамеции, например, или в клетке человеческой печени) для того, чтобы обусловленное ею перемещение масс удовлетворило бы критерию из §6.12 и процедура OR произошла бы именно тогда, когда нужно, или же этой активности недостаточно, и OR задержится до тех пор, пока окружение и в самом деле не возмутится, – и игра (призом в которой невычислимость) будет проиграна. Судя по первому впечатлению, так оно и есть – конформаци-

онная активность тубулина перемещает слишком малое количество вещества, и на требуемом уровне никакой OR-процедуры не происходит. Если же клеток много, ситуация выглядит гораздо более многообещающей.

Возможно, глядя на такую картину (в ее теперешнем виде) действительно не остается ничего другого, как предположить, что невычислительные условия для появления сознания могут возникнуть только в больших совокупностях клеток, что мы и имеем в случае достаточно большого мозга.¹⁴³ Однако я порекомендовал бы соблюдать (по крайней мере, на данном этапе) известную осторожность. Как физические, так и биологические аспекты предлагаемой картины сформулированы слишком приблизительно, чтобы можно было прямо сейчас делать какие-то однозначные выводы в отношении следствий из той точки зрения, которую я здесь представляю. Очевидно, что даже с учетом рассмотренных выше конкретных предложений потребуется еще немало исследований, как физических, так и биологических, прежде чем мы сможем сделать сколько-нибудь обоснованное предположение относительно места сознания в материальном мире.

Следует обратить внимание и на некоторые другие вопросы. Например, какая часть мозга действительно задействована в поддержании состояния сознания? Вероятнее всего, весь мозг для этого не требуется. Похоже на то, что многие функции мозга с сознанием никак не связаны. Взять хотя бы мозжечок (см. §1.14 {= МОИ № 17}), который, как это ни поразительно, работает абсолютно бессознательно. Именно мозжечок отвечает за координацию и точность наших действий в тех случаях, когда эти самые действия выполняются без участия сознания (см., например, НРК, с. 379–381). Из-за полной бессознательности его функций мозжечок часто называют «просто компьютером». Было бы, несомненно, весьма поучительно выяснить, есть ли какие-нибудь различия (и если есть, то какие именно) между клеточной или цитоскелетной организациями мозжечка и головного мозга, поскольку именно с последним, по всей видимости, гораздо более тесно связано сознание. Интересно, что если судить лишь по количеству нейронов, то разница между мозгом и мозжечком невелика – в мозге нейронов всего лишь в два раза больше, чем в мозжечке, причем отдельные клетки в мозжечке образуют, в общем случае, значительно больше синаптических связей, чем клетки мозга (см. §1.14 и рис. 1.6). Очевидно, простым подсчетом нейронов тут не обойтись, следует искать глубже.¹⁴⁴

Возможно, что-либо поучительное удастся извлечь и из изучения процесса «научения», посредством которого движения, первоначально осознаваемые мозгом, переходят под бессознательный мозжечковый контроль.¹⁴⁵ Не исключено, что «обучающие процедуры» мозжечка окажутся очень похожими на те, с помощью которых приверженцы коннекционистской

¹⁴³ Здесь можно поразмышлять на тему отсутствия (как правило) центриолей в нейронах (см. с. 557). Цитоскелеты клеток других типов, похоже, нуждаются в наличии центросом с тем, чтобы те выполняли функции «управляющего центра» (необходимого для деления клетки), цитоскелеты же нейронов, по всей вероятности, полагаются на власти более глобальные!

¹⁴⁴ Поскольку в нейроанатомии я человек вполне посторонний, меня не мог не поразить факт наличия в организации мозга одной особенности (похоже, так и не нашедшей до сих пор объяснения), которой мозжечок не обладает. Большая часть сенсорных и двигательных нервов «идут наперекрест», т.е. левая сторона мозга отвечает в основном за правую сторону тела, и наоборот. И не только это – та область мозга, что обрабатывает зрительные образы, находится сзади, а та, что заведует ногами, находится вверху; так же обстоит дело и с ушами: сигналы из правого уха обрабатываются слева, а из левого – справа. Нельзя сказать, что эта особенность мозга носит абсолютно универсальный характер, но я не могу отделаться от ощущения, что это не случайно. Потому что мозжечок устроен иначе. Может ли быть так, что сознание каким-то образом выигрывает от того, что нервным сигналам приходится идти «длинной дорогой»? **В.Э.:** Нет, дело не в этом. Дело в том, что с точки зрения Естественного отбора более выгодно, чтобы орган и центр, управляющий им, находились по возможности дальше один от другого. Тогда удар, пришедший по одному из них, оставит в целости другое. Если бы, например, правые лапы животного управлялись бы правым же полушарием мозга, то удар, полученный им по правой стороне (в результате падения с высоты или нападения хищника и т.п.) уничтожил бы всю функциональность правой стороны, животное не смогло бы передвигаться и погибло бы. Если же правые лапы управляются левой стороной мозга, то удар, полученный правой стороной, заденет правые лапы и центры управления левыми лапами. Тогда поврежденными лапами всё же будет управлять здоровый центр, а поврежденный центр управлять здоровыми лапами. Таким образом, повреждения будут распределены по организму более равномерно, сохранится хоть какая-то функциональность, и у животного будет больше шансов выжить, пока оно не выздоровеет.

¹⁴⁵ **В.Э.:** Самопрограммирование происходит в «головном мозге», а готовые двигательные программы, видимо, переписываются в мозжечок для «автоматического выполнения».

философии обучают искусственные нейронные сети. Впрочем, даже если так оно и есть и даже если верно также то, что в терминах таких процедур можно объяснить (хотя бы частично) работу мозжечка – что подразумевается, например, в коннекционистском подходе к исследованию зрительной коры,¹⁴⁶ – нет никаких оснований полагать, что то же непременно окажется верно и в случае тех аспектов деятельности головного мозга, которые связаны с сознанием. В самом деле, как свидетельствуют представленные в первой части книги доказательства, для объяснения высших когнитивных функций, непосредственно связанных с сознанием, необходимо нечто, в корне отличное от коннекционизма.

§8.7. Три мира и три загадки

Попробуем свести всё вышесказанное вместе. На протяжении всей книги мы пытаемся найти ответ на главный вопрос: как можно соотнести феномен сознания с нашим научным мировоззрением? Надо признать, я мало что могу сказать о сознании вообще. Поэтому я сосредоточился (в первой части) на одном частном ментальном качестве: способности к сознательному пониманию, в частности, к математическому пониманию. Только на примере этого ментального качества я смог достаточно убедительно показать, что возникновение способности к пониманию в результате какой бы то ни было чисто вычислительной активности решительно невозможно;¹⁴⁷ вычислением нельзя даже адекватно моделировать такую способность – особо следует отметить, что ничто в моих рассуждениях не указывает и на то, что математическое понимание в чем бы то ни было принципиально отличается от прочих видов понимания. Отсюда вывод: какая бы активность мозга ни отвечала за сознание (по крайней мере, в этом конкретном его проявлении), она должна основываться на физических процессах, описать которые численное моделирование неспособно. Во второй части мы попытались найти область в науке для соответствующего физического процесса, действительно способного вывести нас за пределы чистой вычислительности. Для того, чтобы охватить встающие перед нами при этом фундаментальные проблемы, я воспользуюсь в дальнейшем метафорой трех различных миров и трех «великих загадок», связывающих эти миры вместе. Миры в чем-то похожи на те, что описывал Поппер (см. [309]), однако акценты я расставляю совершенно иначе.

Наиболее близок нам мир наших сознательных восприятий – знание об этом мире мы получаем самым непосредственным образом и о нем же мы знаем меньше всего в смысле точного научного описания. В этом мире есть счастье, боль и цвет. В нем хранятся наши самые ранние детские воспоминания и ждет своего часа страх смерти. В нем – любовь, понимание, знание различных фактов, а также невежество и мстительность. Этот мир содержит образы столов и стульев, здесь запахи, звуки и всевозможные ощущения смешиваются с нашими мыслями и решимостью действовать.

Известны нам и два других мира – не так непосредственно, как мир восприятий, но зато об этих мирах мы знаем довольно много всего. Один из них мы называем физическим миром. В нем находятся настоящие столы и стулья, телевизоры и автомобили, люди, человеческие мозги и импульсы нейронов. В этом мире есть Солнце, Луна и звезды. В нем же – облака, ураганы, скалы, цветы и бабочки, а на более глубоком уровне – молекулы и атомы, электроны и фотоны, время и пространство. Еще там есть цитоскелеты, димеры тубулина и сверхпроводники. Не совсем ясно, почему мир восприятий должен иметь что-то общее с физическим миром, однако, судя по всему, так оно и есть.

Что касается второго мира из упомянутых двух, то само его существование многими ставится под сомнение. Речь идет о платоновском мире математических форм. Здесь обитают натуральные числа 0, 1, 2, 3, ... и алгебра комплексных чисел. Здесь мы найдем теорему

¹⁴⁶ См. [257] и, напр., [38].

¹⁴⁷ В.Э.: Ход мыслей Пенроуза здесь таков: «вот, есть некоторый алгоритм А; в рамках этого алгоритма А понимание этого алгоритма А невозможно!» Разумеется, это невозможно. Но почему Пенроуз не смотрит на вещи так, как это есть на самом деле: что этот алгоритм А (и его окружение) подвергается (со стороны) анализу по алгоритмам В, С, D, E... (и вот, эта работа алгоритмов В, С, D, E... и есть то самое «понимание»). Почему-то Пенроуз рассматривает всю человеческую интеллектуальную деятельность только как работу одного алгоритма («машины Тьюринга»), а не как взаимодействие огромного множества мозговых программ (алгоритмов). Что это? Недостаток программистского опыта? (Я думаю – да; для программиста вообще весь ход пенроузовских мыслей представляется абсолютно неестественным). И еще: стереотипы «теории алгоритмов», с точки зрения настоящего программиста – страшно примитивные.

Лагранжа¹⁴⁸ о том, что любое натуральное число есть сумма четырех квадратов, и самую знаменитую из теорем евклидовой геометрии – теорему Пифагора (о квадратах сторон прямоугольного треугольника). Где-то здесь находится правило $a \times b = b \times a$ для любых натуральных чисел и тот факт, что означенное правило не работает¹⁴⁹ в случае «чисел» некоторых других типов (например, тех, что участвуют в грассмановом произведении, упомянутом в §5.15). Этот же платоновский мир содержит геометрии, отличные от евклидовой, геометрии, в которых теорема Пифагора неверна. Здесь есть бесконечность и невычислимость, рекурсивные и нерекурсивные ординалы. Здесь незавершаемое действие машины Тьюринга и машина с оракулом, а также многие классы математических задач, неразрешимые вычислительными методами, такие как задача о замощении плоскости плитками полимино. В этом мире мы встретим электромагнитные уравнения Максвелла и гравитационные – Эйнштейна, равно как и бесчисленные удовлетворяющие им теоретические пространства-времена, как реалистичные физически, так и совершенно невероятные. Именно здесь пребывают математические модели столов и стульев, которыми можно воспользоваться в «виртуальной реальности», а также модели черных дыр и ураганов.

Имеем ли мы право утверждать, что платоновский мир действительно является «миром» – миром, который «существует» в том же смысле, в каком существуют прочие два мира¹⁵⁰? Читателю, возможно, покажется, что это вовсе не мир, а просто какой-то пыльный склад для абстрактных концепций, которые понапридумывали математики. Однако существование мира математических идей опирается на фундаментальный, вневременной и универсальный характер этих самых идей и на тот факт, что описываемые ими законы никоим образом не зависят от тех, кто их открыл. Этот «склад» (если это и впрямь склад) построен не нами. Натуральные числа были в этом мире задолго до того, как на Земле появились первые человеческие существа¹⁵¹ – да и все остальные существа, если уж на то пошло, – и останутся после того, как вся жизнь во Вселенной исчезнет. То, что любое натуральное число есть сумма четырех квадратов, было истиной всегда, а вовсе не стало ею вдруг после того, как Лагранж призвал из небытия соответствующую теорему. Натуральные числа, настолько большие, что оказываются не по зубам любому компьютеру, какой вы можете вообразить, всё равно являются суммами четырех квадратов, пусть даже мы никогда и не узнаем, квадратов каких именно чисел. Всегда будет истинным утверждение, что общей вычислительной процедуры для установления факта незавершаемости действия машины Тьюринга не существует, и оно всегда было истинным, задолго до того, как Тьюрингу пришлось в голову его определение вычислимости.

Тем не менее, многие возражают, утверждая, что абсолютный характер математической истины никоим образом не является аргументом в пользу реальности «существования» математических концепций и математических истин. (Время от времени я слышу, что математический платонизм якобы устарел. Разумеется, мне известно, что сам Платон умер что-то около 2340 лет

¹⁴⁸ В.Э.: Тут уже начинается путаница в этих «мирах». Давайте всё-таки уточним и разделим. В «платоновском мире» существует не «теорема Лагранжа», а собственно соотношение между числами, закономерность такая, что... (понятно, какая). А теорема эту закономерность описывает. Теорема – это текст, это утверждение, это высказывание, и существует она НЕ в «платоновском мире». То же самое о теореме Пифагора.

¹⁴⁹ В.Э.: Ой, какая неточность мысли и неточность слов! Не «правило не работает» для других чисел, а в других «числах» (т.е. в потенциальных продуктах других алгоритмов) не наблюдается упомянутая закономерность!

¹⁵⁰ В.Э.: Имеем. Но нужно при этом отдавать себе отчет в том, что это в точности означает. А означает это, что в мозговом компьютере представления (номиналии) объектов физического мира и объектов платоновского мира в принципе одинаковы и для самого мозгового компьютера по внутренним критериям неразличимы (различимы только по внешним, «логическим» соображениям). В этом смысле оба мира для мозгового компьютера одинаково реальны.

¹⁵¹ В.Э.: Опять надо уточнить. «Задолго до того, как на Земле появились первые человеческие существа» имелись две вещи: 1) материальные множества и их соотношения в физическом мире; 2) потенциальная возможность создать программы классификации этих множеств и их соотношений (и когда бы они ни были созданы, в их потенциальных продуктах всегда вскрылись бы одни и те же закономерности). В этом смысле числа существовали всегда и будут существовать всегда. Но реально такие программы классификации были созданы только когда люди начали считать, и только тогда в их мозговых компьютерах появились номиналии, кодирующие числа. В этом смысле числа начали существовать только тогда. Понимать эти вещи важнее, чем просто перекидываться фразами, что «числа существовали всегда» или «числа были созданы людьми».

назад, однако едва ли это можно считать достаточной причиной! Более серьезную причину могут составить трудности, с которыми порой сталкиваются философы, пытаясь обосновать целиком и полностью абстрактный мир, способный оказывать реальное воздействие на мир физический.¹⁵² Эта фундаментальная проблема, собственно, является частью одной из тех загадок, к которым мы очень скоро перейдем.) На деле же идея реальности математических концепций вполне естественна для математиков, чего нельзя сказать о тех, кто никогда не испытывал радости исследования чудес и тайн того мира. Впрочем, на данном этапе от читателя не требуется соглашаться с тем, что математические концепции действительно образуют «мир», реальность которого сравнима с реальностью физического и ментального миров. Различия во взглядах на природу математических концепций для нас пока существенной роли не играют. Можете, если хотите, рассматривать «платоновский мир математических форм» как риторическую фигуру, введенную для удобства последующих рассуждений. Когда мы доберемся до трех загадок, связывающих эти три «мира», причина именно такого выбора слов, возможно, станет несколько яснее.

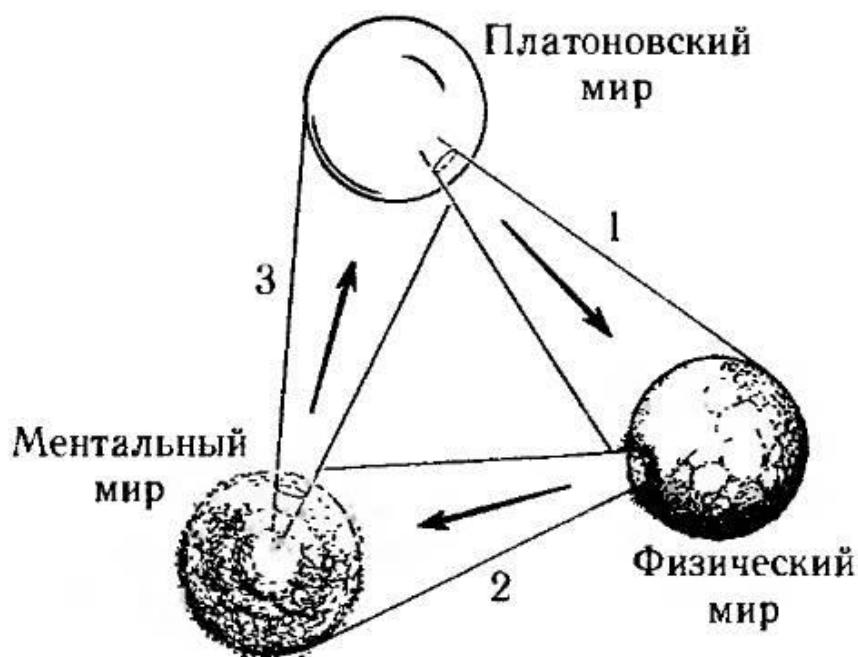


Рис. 8.1. Кажется, что каждый из трех миров – платоновский математический, физический и ментальный – неким таинственным образом «произрастает» из какой-то малой части своего предшественника (или, по крайней мере, очень тесно с этим предшественником связан).

Что же это за загадки? Для начала взгляните на рис. 8.1. Первая загадка: почему столь точные и фундаментальные математические законы играют такую важную роль в поведении физического мира¹⁵³? Кажется, что сам мир физической реальности каким-то таинственным

¹⁵² В.Э.: Абстрактный мир «реальное воздействие на мир физический» не оказывает, если не считать такие случаи, как когда человек при помощи математики просчитал проект моста, а потом его построил.

¹⁵³ В.Э.: Это неверно. В действительности дело обстоит так. В физическом мире существуют материальные множества и между ними определенные соотношения. Математика начинается как человеческие мозговые алгоритмы, работающие с этими множествами и соотношениями (с их номиналиями). Поэтому уже с этих первых шагов существует соответствие (изоморфизм) между физическими множествами и мозговыми программами. Потом мозговые программы переносят акцент с первичных алгоритмов (работающих с номиналиями) на вторичные алгоритмы (работающие с нотатами). Алгоритмы становятся разнообразными и уже не всегда имеют изоморфизм с физическими множествами. Но тогда, когда этот изоморфизм всё же сохраняется, Пенроуз будет говорить, что «физический мир подчиняется математическим законам». На самом деле он «подчиняется» (если так вообще можно выразиться) сам своим собственным «законам», и при этом оказывается, что соотношения материальных множеств можно охарактеризовать теми или иными вычислительными алгоритмами математики.

образом возникает из платоновского мира математики.¹⁵⁴ Этот процесс проиллюстрирован направленной вниз стрелкой на рисунке справа – от платоновского мира к физическому. Вторая загадка: как физический мир порождает восприятие объектов в сознании? Каким таким таинственным образом сложно организованные материальные объекты производят из самих себя объекты ментальные¹⁵⁵? Этот процесс представлен на рис. 8.1 стрелкой внизу, направленной от физического к ментальному миру. И наконец, последняя загадка: как мысль «творит» из той или иной ментальной модели математическую концепцию¹⁵⁶? Эти по виду нечеткие, ненадежные и часто вовсе неподходящие ментальные инструменты, доставшиеся нам, похоже, в комплекте с ментальным миром, каким-то таинственным образом оказываются, тем не менее, способны (по крайней мере, когда они «в ударе») производить из пустоты абстрактные математические формы, открывая нам тем самым доступ, через посредство понимания, в платоновское царство чистой математики. Этот процесс символизирует стрелка слева на рисунке, направленная вверх, от ментального мира к платоновскому.

Сам Платон большое внимание уделял первой из этих стрелок (а также, на свой лад, третьей), и неустанно подчеркивал различие между совершенной математической формой и ее несовершенной «тенью» в физическом мире. Так, сумма углов математического треугольника (евклидова треугольника, обязательно уточним мы сегодня) составляет ровно два прямых угла, тогда как углы физического треугольника, сделанного, скажем, из дерева со всей точностью, на которую мы способны, образуют в сумме угол, величина которого очень близка к требуемой, но всё же не равна ей. Эти свои соображения Платон изложил в виде притчи. Он вообразил нескольких граждан, заточенных в пещере и прикованных таким образом, чтобы они не могли видеть находившихся за их спинами совершенных форм, отбрасывающих в свете костра тени на стену пещеры, доступную взорам прикованных граждан. Таким образом, люди непосредственно видели лишь несовершенные тени тех форм, к тому же искаженные неровным светом костра. Совершенные формы символизировали собой математические идеи, а тени на стене – мир «физической реальности».

Со времен Платона основополагающая роль математики в объяснении воспринимаемой структуры и действительного поведения физического мира возросла чрезвычайно. В 1960 году видный физик Юджин Вигнер прочел знаменитую лекцию под названием «Непостижимая эффективность математики в физических науках». В ней он отметил поразительную точность и хитроумную применимость замысловатых математических конструкций, которые физики регулярно и во всё больших количествах обнаруживают в своих описаниях реальности.

Для меня наиболее впечатляющим примером эффективности математики является общая теория относительности Эйнштейна. Нередко можно услышать, что физики всего лишь подмечают время от времени, где именно на этот раз математические концепции оказались хорошо применимыми к физическому поведению.¹⁵⁷ Утверждают, соответственно, что физики, как правило, направляют свои интересы в сторону тех областей, где имеющиеся математические описания работают; таким образом, нет ничего удивительного в том, что математические и физические описания так хорошо друг с другом уживаются. Мне, впрочем, представляется, что авторы подобных заявлений, что называется, попадают пальцем в небо. Они просто никак не объясняют то фундаментальное единство, которое, как показывает, в частности, теория

¹⁵⁴ В.Э.: Такое ощущение свидетельствует о том, что мышление происходит недостаточно четко и ясно. У меня, например, нет такого ощущения, будто «мир физической реальности каким-то таинственным образом возникает из платоновского мира математики».

¹⁵⁵ В.Э.: На это отвечает теория информации (не та – шенноновская, а настоящая, материалистическая). Она показывает, как информация возникает, передается, обрабатывается. Весь «ментальный мир» – это «мир» обработки информации.

¹⁵⁶ В.Э.: На это отвечает Веданская теория. Она показывает, как компьютер, обрабатывающий информацию, создает абстрактные объекты («платоновского мира»).

¹⁵⁷ В.Э.: Отчасти это так. Они действительно подмечают, где между математическими конструкциями и соотношениями физического мира существует изоморфизм (соответствие). Но не надо забывать, что это нечто гораздо большее, чем просто совпадение. Сама математика началась именно с этого изоморфизма, она с самого начала создавалась и строилась такой, чтобы этот изоморфизм существовал, она изначально предназначалась для использования такого изоморфизма. Поэтому изоморфизм между математическими конструкциями и соотношениями физического мира – это норма, и именно отклонениями от нормы можно считать те случаи, когда такого изоморфизма нет (когда «математическое изображение» превзошло «физический мир»).

Эйнштейна, существует между математикой и устройством мироздания.¹⁵⁸ Когда Эйнштейн разрабатывал свою теорию, никакой действительной необходимости в ней, с экспериментальной точки зрения, не было. Ньютоновская теория тяготения держалась уже почти 250 лет и достигла за это время потрясающей точности (погрешность порядка одной десятиллионной – одно это является достаточно убедительным доказательством глубинной математической основы физической реальности). Да, в движении планеты Меркурий была замечена аномалия, однако это, разумеется, не послужило поводом для отказа от схемы Ньютона. И всё же Эйнштейн считал, что можно добиться лучшего результата, если изменить саму основу теории тяготения.¹⁵⁹ В первые годы после того, как Эйнштейн обнаружил теорию относительности, в поддержку ее можно было привести лишь несколько наблюдаемых эффектов, а преимущество над теорией Ньютона в точности было крайне незначительным. Теперь же, по прошествии 80 лет, общая точность теории относительности возросла в миллионы раз. Эйнштейн не просто «подметил» повторяющиеся особенности поведения физических объектов. Он обнаружил фундаментальную математическую субструктуру,¹⁶⁰ реально существующую и до тех пор скрытую в глубинах мироздания. Более того, он искал вовсе не какие-то физические феномены, которые могли бы подойти под красивую теорию. Он искал и нашел точное математическое соотношение, заложенное в самой структуре пространства и времени, – наиболее фундаментальное из всех физических понятий.

В основе всех других успешных теорий элементарных физических процессов всегда лежит некая математическая структура, которая оказывается не только чрезвычайно точной, но и весьма хитроумной математически. (А чтобы читатель не подумал, что «ниспровержение» прежних физических представлений – например, теории Ньютона – каким-то образом эти представления обесценивает и лишает смысла, спешу уверить, что это ни в коем случае не так. Если прежние идеи были достаточно обоснованы – что можно сказать, например, о теориях Галилея или того же Ньютона, – то они и дальше остаются в добром здравии и находят в новой схеме свое место.) Кроме того, и сама математика, в своем стремлении как можно точнее описать поведение природных объектов, находит для себя немало полезного, порой неочевидного и неожиданного. И квантовая теория (тесные взаимоотношения которой с математикой – через посредство комплексных чисел – очевидны, надеюсь, даже из того краткого обзора предмета, что попал на эти страницы), и общая теория относительности, и электромагнитные уравнения Максвелла – все они дали весьма ощутимый толчок развитию математики. Причем это верно не только для относительно новых теорий, что я перечислил. Не менее верно это и для теорий, куда более отдаленных от нас во времени, – например, для ньютоновской механики (давшей нам математический анализ) или древнегреческого анализа структуры пространства (которому мы обязаны самим понятием геометрии). Необычайная точность математики в описании физического поведения (например, точность квантовой электродинамики, достигающая одиннадцатого или даже двенадцатого знака после запятой) не раз удивляла ученых. Однако на этом загадки не заканчиваются. Концепции, скрывающиеся в физических процессах, обладают чрезвычайной глубиной, тонкостью и математической плодотворностью. Об этом люди зачастую и не подозревают – если, конечно, они не математики, вплотную занимающиеся соответствующей проблемой.

Следует особо подчеркнуть, что эта математическая плодотворность, дающая математикам ценный стимул в их работе, не является всего лишь следствием некоей математической моды (хотя и мода, надо признать, играет во всем этом свою роль). Идеи, которые были разработаны с единственной целью углубить наше понимание устройства физического мира, очень часто дают неожиданные и удивительно эффективные средства для решения других математических задач, которые уже какое-то время интенсивно и безуспешно пытаются решить другие люди совсем для других целей. В качестве одного из наиболее ярких недавних примеров можно привести найденное оксфордским математиком Саймоном Доналдсоном применение теорий типа Янга Миллса (разработанных физиками в процессе отыскания математического объяснения взаимо-

¹⁵⁸ В.Э.: Я думаю, что Веданская теория объясняет. Тут, правда, остается вопрос: почему мир именно таков, каков он есть? Тут тоже кое-что можно было бы сказать, но это уже не касается взаимоотношений математики и физики.

¹⁵⁹ В.Э.: Ну, движущим мотивом-то наверно было не стремление «добиться лучшего результата» в смысле точности, а желание более глубоко понять сущность явлений.

¹⁶⁰ В.Э.: Нет, не «математическую субструктуру», а просто «субструктуру» (т.е. физическую), которую можно охарактеризовать такими-то, вот, математическими конструкциями.

действий между субатомными частицами) к исследованию четырехмерных многообразий,¹⁶¹ в результате чего были объяснены некоторые совершенно неожиданные их свойства, над которыми ученые бились в течение нескольких предыдущих лет. Что самое интересное, все эти математические средства (несмотря на то, что мы и не подозревали об их существовании, пока нас не посетило соответствующее озарение) вечно пребывают в безвременьи платоновского мира – неизменные истины, ожидающие своего открытия и открывающиеся лишь тем, кто обладает достаточным мастерством, проницательностью и упорством.

Надеюсь, мне удалось убедить читателя в существовании тесной и вполне реальной (хотя и всё еще крайне загадочной) взаимосвязи между платоновским математическим миром и миром физических объектов. Надеюсь также, что само наличие такой взаимосвязи поможет скептикам отнестись к платоновскому миру именно как к «миру» несколько более серьезно, нежели они полагали для себя возможным прежде. Может быть, кто-то даже шагнет еще дальше, на что я в рамках данного обсуждения не осмелился. Возможно, реальностью в платоновском смысле следует наделять и прочие абстрактные концепции, а не только математические. Сам Платон настаивал, что идеальные понятия «добра» и «красоты» реальны (см. §8.3) ничуть не меньше, чем математические идеи.¹⁶² Лично у меня такая возможность никакого неприятия не вызывает, однако в моих размышлениях здесь она пока не играет сколько-нибудь серьезной роли. Я не уделил вопросам этики, морали и эстетики надлежащего внимания, однако это не повод для того, чтобы напрочь отказывать им в той же «реальности», какая досталась концепциям, которые рассмотрения удостоились. Безусловно, есть множество важных и разнообразных вопросов, которые следует изучить в этой связи, однако цели, что я ставил перед собой при написании этой конкретной книги, несколько уже.¹⁶³

Не уделил я большого внимания и собственно загадке (стрелка 1 на рис. 8.1) той непостижимой и абсолютной роли, что платоновский математический мир играет в физическом мире, – даже того, что получили другие две, о которых мы имеем еще меньшее представление. В первой части я обращался, по большей части, к вопросам, поднимаемым третьей стрелкой: загадкой нашего восприятия математического мира, т.е. выяснением природы процесса, посредством которого сознательное размышление способно «порождать», словно из ничего, те самые платоновские математические формы. (Как будто совершенные математические формы суть лишь тени наших несовершенных мыслей.) Такой взгляд на платоновский мир – как на продукт нашего сознания – весьма серьезно противоречит воззрениям самого Платона. Для Платона мир совершенных форм первичен, поскольку лежит вне времени и не зависит от человека. В истинно платоновском представлении мою третью стрелку на рис. 8.1 следует, очевидно, направить не вверх, а вниз: от мира совершенных форм к миру нашего сознания. Если же мы рассматриваем математический мир как продукт наших способов мышления, то это будет уже не платоновское представление, которого я здесь придерживаюсь, а самое настоящее кантианство.

Возможно, кому-то захочется аналогичным образом оспорить и направления остальных моих стрелок. Например, епископ Беркли, скорее всего, предпочел бы развернуть вторую стрелку, направить ее от ментального мира к миру физическому, поскольку, согласно его представлениям, «физическая реальность» есть лишь тень нашего ментального существования. Есть и такие (так называемые «номиналисты»), кто выступил бы за разворот первой стрелки, так как, по их мнению, мир математики является не более чем отражением аспектов мира физичес-

¹⁶¹ [96]; неплохое изложение вопроса для нематематиков имеется в [89] (гл. 10).

¹⁶² В.Э.: «Идеи» добра и красоты – это тоже потенциальные продукты мозговых алгоритмов (по которым субъект признает что-то добром или злом, а что-то красивым или уродливым). Они «абсолютны» в том смысле, что любой, кто будет применять тот же алгоритм, получит тот же результат. (Как и при классификации множеств, когда создаются числа). Но числа создаются при помощи очень простых алгоритмов, почти не допускающих вариантов, поэтому практически не возникают «разночтений» в понятии числа у разных людей. А «добро» и «красота» определяются по очень обширным, сложным алгоритмам, допускающим почти что бесконечное множество всяких вариантов, и поэтому людям почти невозможно договориться о том, какой же алгоритм «правильный». И в этом смысле понятия добра и красоты относительны.

¹⁶³ Объекты, которые разместились бы в таком расширенном платоновском мире, несколько напоминают те ментальные конструкции, что содержит попперовский «Мир 3»; см. [309]. Однако «Мир 3» не претендует ни на вневременное, независимое от нас существование, ни на то, чтобы служить основой для физической реальности. Соответственно, статус его существенно отличается от статуса того «платоновского мира», что рассматриваем мы с вами.

кой реальности. Я сам, как явствует из этой книги, являюсь весьма решительным противником разворота первых двух стрелок; возможно, не менее очевидно и то, что я чувствую себя несколько неловко, будучи вынужден направить третью стрелку на рис. 8.1 в направлении, явно кантианском! Для меня мир совершенных форм первичен (как и для Платона) – существование этого мира является чуть ли не логической необходимостью, – оба же прочих мира суть его тени.¹⁶⁴

По причине такого расхождения во мнениях относительно того, какой из миров на рис. 8.1 следует считать первичным, а какие вторичными, я порекомендовал бы взглянуть на стрелки несколько иначе. Существенным качеством стрелок на рис. 8.1 является не столько их направление, сколько тот факт, что каждая представляет такое соответствие, при котором лишь малая область одного мира «порождает» весь следующий мир целиком. Что касается первой стрелки: мне много раз указывали на то, что огромная часть мира математики (если судить по результатам деятельности самих математиков) если и имеет какое-то отношение к действительному физическому поведению, то весьма незначительное. Получите: в основе структуры нашей физической вселенной может лежать лишь крохотная часть платоновского мира. Аналогичным образом, вторая стрелка символизирует тот факт, что существование нашего ментального мира есть продукт очень малой части мира физического – той части, где имеются в точности те условия, что необходимы для возникновения сознания, как, например, в мозге человека. Точно так же третья стрелка захватывает весьма небольшую область мира ментальной активности, а именно ту, что «заведует» абсолютными и вневременными вопросами – в особенности, математической истиной. Наша с вами ментальная жизнь проходит, по большей части, совсем в других местах.

Есть нечто парадоксальное в этих соответствиях: каждый мир, похоже, «возникает» всего лишь из крохотной части того мира, что ему предшествует. На рис. 8.1 я постарался этот парадокс подчеркнуть. Впрочем, я рассматриваю стрелки не как утверждения о каких-то действительных «возникновениях», а просто как символы имеющих соответствий, поскольку не хочу умножать предрассудки, и без того окружающие вопрос о том, какой из миров следует считать первичным, вторичным или третичным, если там вообще уместно такое «старшинство».

И всё же полностью избежать предрассудков (или просто предвзятости) на рис. 8.1 мне не удалось. Если верить рисунку, то следует предположить, что целый мир отражается частью (причем малой) своего предшественника. Возможно, мои предрассудки ошибочны. Возможно, какие-то аспекты поведения физического мира невозможно описать в точных математических терминах; возможно, какая-то ментальная жизнь не связана неразрывно с физическими структурами (такими, как мозг); возможно также, что существуют математические истины, которые принципиально недоступны человеческому пониманию или интуиции. Для того, чтобы учесть все эти альтернативные возможности, рисунок 8.1 следует перерисовать таким образом, чтобы какие-то из миров (или все) охватывались стрелкой из предыдущего мира не полностью.

В первой части я большое внимание уделил некоторым следствиям из знаменитой теоремы Гёделя о неполноте; кто-то из читателей, возможно, придерживается мнения, что теорема Гёделя как раз и утверждает, что в мире платоновских математических истин имеются области, принципиально недоступные человеческому пониманию или интуиции. Надеюсь, что мои доказательства ясно показали, что это не так.¹⁶⁵ Те математические предположения, что упоминаются в остроумном доказательстве Гёделя, человеку вполне доступны – при условии, что они построены в рамках математических (формальных) систем, которые уже приняты нами как достоверные средства оценки математической истинности. Из доказательства Гёделя отнюдь не следует, что существуют недоступные математические истины. Из него следует лишь, что человеческая интуиция не укладывается ни в рамки формальной аргументации, ни в рамки вычислительных процедур. Более того, из него недвусмысленно следует само существование

¹⁶⁴ В.Э.: Марксистский «диалектический материализм» времен моей юности такую позицию характеризовал бы как «идеализм». Эта позиция, разумеется, очень тесно связана и с позицией Пенроуза в отношении «сильного ИИ». В общем это можно охарактеризовать словами: он не смог найти наиболее точную и адекватную модель мира и пользуется неточными, во многих аспектах неадекватными моделями.

¹⁶⁵ Во введении в свою книгу [270] Мостовски ясно показывает, что аргументы, подобные гёделевским, не имеют никакого отношения к вопросу о возможности существования абсолютно неразрешимых математических задач. На настоящий момент вопрос следует считать полностью открытым – нет ни доказательства, ни опровержения. Как и в случае с двумя другими стрелками, нам остается лишь верить или не верить.

платоновского математического мира. Математическая истина не определяется произвольным образом по правилам некоей «искусственной» формальной системы, но имеет абсолютный характер и находится вне любой такой системы устанавливаемых правил. Поддержка платоновского мировоззрения (в противовес формализму) была одной из важных причин, побудивших Гёделя взяться за работу. С другой стороны, рассуждения Гёделя могут служить иллюстрацией глубокой непостижимости нашего математического восприятия.¹⁶⁶ Для того, чтобы такое восприятие возникло, мы не просто «вычисляем»; тут на самом глубинном уровне задействовано что-то еще – что-то, что было бы невозможно без собственно осознания, которое, в конечном счете, и формирует мир восприятий.

Во второй части мы занимались в основном вопросами, имеющими отношение ко второй стрелке (хотя их адекватное рассмотрение невозможно без некоторых отсылок к стрелке первой), посредством которой плотный физический мир способен каким-то образом вызывать теневой феномен, называемый нами сознанием. Как же из таких, казалось бы, бесперспективных ингредиентов, как материя, пространство и время, возникает такой тонкий феномен, как сознание? До ответа мы так и не добрались, однако я надеюсь, что читатели смогли составить представление о загадочной природе как самой материи, так и пространства-времени, в рамках структуры которого оперируют теперь физические теории. Мы просто-напросто не располагаем достаточными знаниями ни о природе материи, ни о законах, которые этой материей управляют, – достаточными для того, чтобы понять, какая ее организация (в физическом мире) необходима, чтобы возникло осознающее себя существо. Более того, чем глубже мы исследуем природу материи, тем более эфемерной, таинственной и математической эта материя становится. Мы можем спросить: что же такое материя согласно лучшим теориям, которыми располагает на настоящий момент наука? Ответ мы получим математический, причем не столько в виде системы уравнений (хотя и уравнения тоже важны), сколько в виде тонких математических концепций, для одного лишь правильного понимания которых потребуется некоторое время.

Если общая теория относительности Эйнштейна показала, насколько могут измениться, приняв таинственный и математический вид, наши самые, казалось бы, незыблемые понятия о природе пространства и времени, то с концепцией материи аналогичную шутку сыграла квантовая механика. Глубокое потрясение испытали не только представления о материи, но и наше видение реальности вообще. Как может быть так, что одна лишь контрфактуальная возможность какого-либо события – т.е. что-то, чего в действительности не произошло, – оказывает вполне осязаемое воздействие на то, что в этой самой действительности происходит? При всей непостижимости проявлений квантовой механики в ней есть что-то такое, что по крайней мере кажется куда более близким (чем всё, что может предложить классическая физика) к другой непостижимости, – той, за которой скрывается объяснение феномена ментальности в мире физической реальности. Я несколько не сомневаюсь в том, что с появлением более глубоких теорий сознание наконец займет свое место в физическом мире и перестанет выглядеть на его фоне той «белой вороной», какой оно выглядит сегодня.

В §7.7 и §8.6 я попытался ответить на вопрос, какие физические условия могут оказаться подходящими для возникновения феномена сознания. Я, однако, никоим образом не рассматриваю сознание исключительно как результат когерентного перемещения надлежащего количества вещества согласно правилам той или иной ОР-теории квантово-классического интерфейса. Как я, надеюсь, достаточно ясно показал, все эти вещи всего лишь дают возможность расчистить в пределах современной физической картины мира место для невычислительных процессов. Подлинное сознание предполагает способность осознавать бесконечное разнообразие качественно различных вещей – зеленый цвет травы, запах цветов, пение птиц или мягкость меха, а также течение времени, радость, беспокойство, удивление или отношение к новой идее. Мы имеем идеалы, питаем надежды, выражаем намерения и усилием воли управляем множеством различных движений нашего тела, необходимых для реализации упомянутых намерений. Благодаря исследованиям в области нейроанатомии, неврологических нарушений, психиатрии и психологии, мы многое знаем о тонких взаимосвязях между физическими свойствами мозга и нашими ментальными состояниями. Всё это мы, несомненно, вполне

¹⁶⁶ В.Э.: Хе-хе!

способны¹⁶⁷ объяснить в терминах одной лишь физики критических объемов когерентного перемещения вещества. Однако без прорыва в новую физику мы так и останемся связаны смирительной рубашкой полностью вычислительной (или вычислительной вперемешку со случайной) физики. Внутри мы не найдем научного объяснения ни интенциональности, ни субъективному опыту. Вырвавшись же из пут, мы получаем, по крайней мере, шанс когда-нибудь такое объяснение отыскать.

Многие, кто с этим согласится, добавляют, что объяснения таким вещам не даст никакая научная картина. Тем, кто придерживается подобных взглядов, я могу лишь пожелать проявить немного терпения: подождем и посмотрим, как продвинется наука в будущем. Я думаю, что уже сейчас имеются некоторые указания (в загадочных процедурах квантовой механики) на то, что ментальные концепции стали ближе к нашим представлениям о физической вселенной, нежели прежде, – пусть и всего лишь чуть ближе. Я убежден, что с обнаружением необходимых новых физических принципов эти указания станут куда более отчетливыми. Науке еще есть куда развиваться; уж в этом-то сомневаться не приходится.

Более того, сама возможность понимания таких вещей человеком многое говорит о тех способностях, что дает нам сознание. Следует признать, что время от времени встречаются люди – например, Ньютон и Эйнштейн, Архимед и Галилей, Максвелл и Дирак; или Дарвин, Леонардо да Винчи, Рембрандт, Пикассо, Бах, Моцарт, Платон или те великие умы, что смогли породить такие шедевры, как «Илиада» или «Гамлет», – которые, по-видимому, наделены способностью «чувствовать» истину или красоту в значительно большей степени, нежели отпущено остальным. Однако единство с этой природной механикой потенциально присутствует во всех нас, проявляясь в способности к сознательному пониманию и ощущениям, на каком бы уровне эти процессы ни происходили. Каждый осознающий себя мозг сплетен из тончайших физических составляющих, неясным пока образом извлекающих сознание из фундаментальной структуры математически обусловленной Вселенной – с тем, чтобы мы, в свою очередь, смогли, вооружившись платоновским «пониманием», получить своего рода прямой доступ к первопричинам функционирования Вселенной на всевозможных уровнях.

Вопросы эти чрезвычайно глубоки и пока еще очень далеки от объяснения. Я утверждаю, что однозначных ответов мы не получим до тех пор, пока не поймем, как именно взаимодействуют между собой все три мира.¹⁶⁸ Не получим мы ответов и в том случае, если будем пытаться разрешить каждый из вопросов отдельно от остальных. Я говорил о трех мирах и трех загадках, связывающих их друг с другом. Разумеется, в действительности миров вовсе не три – мир всего один, и о его истинной природе мы всё еще не имеем ни малейшего представления.

Эпилог

Джессика с отцом вышли из пещеры. Снаружи было уже совсем темно и тихо, в прозрачном небе начали появляться звезды. Джессика повернулась к отцу.

– Знаешь, пап, вот я смотрю в небо, и мне всё равно не верится, что Земля и вправду движется – и не только сама крутится вокруг оси, так еще и летит куда-то со скоростью сто тысяч километров в час, – хоть на самом деле я и знаю, что всё это должно быть правдой.

Она замолчала и некоторое время просто стояла, глядя на звезды.

– Пап, расскажи мне о звездах...

¹⁶⁷ В.Э.: Видимо, ошибка перевода, и должно быть «не способны» (нельзя – даже по мнению Пенроуза – всё это объяснить «в терминах одной лишь физики критических объемов когерентного перемещения вещества»).

¹⁶⁸ В.Э.: Это верно. Но я утверждаю, что я знаю, КАК они взаимодействуют.

Послесловие в Векордии

2010.10.31 16:11 пятница
До Нового, 2011 года 7 часов и 49 минут

В.Э.: Итак, я «перепечатал» в Векордии полные тексты двух главных книг Роджера Пенроуза, посвященных проблеме интеллекта: «Новый Разум Короля» и «Тени Разума». Всё вместе это здесь заняло 9 томов.

Мартин Гарднер писал {PENRO1 = МОИ № 14, с.5} в Предисловии к первой из них: «Книга Пенроуза является самой мощной атакой на теорию сильного ИИ из всего написанного до сих пор».

Именно так! – Именно так я воспринимал книги Пенроуза и именно поэтому перепубликовал их у себя вместе со своими комментариями.

Атаке Пенроуза нужно было дать отпор.

Мне уже говорили {PENRS1 = МОИ № 14, с.24}, и несомненно сказали бы и в будущем еще много раз, что Пенроуз уже давным-давно опроверг всё то, о чем рассказывает Веданская теория. А теперь пусть попробует кто-нибудь сказать такое – пусть укажет, ГДЕ в этих девяти томах и КАК Пенроуз опроверг то, что утверждаю я!

В этом, разумеется, состояла главная цель данной публикации.

Безусловно, Пенроуз сам по себе очень интересный автор, и его книги очень ценны и познавательны. В мире есть тысячи, может быть, даже миллионы книг, нападающих на то, что можно было бы назвать по-Гарднеру «теорией сильного ИИ». Но подавляющее большинство из этих книг недостойны ни внимания, ни, тем более, помещения в Векордию и подробного разбора здесь. Неинтересно и скучно разговаривать с людьми, «атакующими» нас с позиций какого-нибудь там «космического разума» или христианской веры.

Так что факт перепубликации в Векордии книг Пенроуза и моя критика его утверждений является с моей стороны не чем-то уничижительным к Пенроузу, а, наоборот, актом высшей похвалы. Пенроуз – достойный противник.

Большая часть фактов, приводимых Пенроузом, мне были известны и до него, но некоторые вопросы (а именно: связанные с квантовой механикой) после прочтения его книг стали мне яснее.

Нет сомнения, что Пенроуз – ученый, и крупный ученый. Его стремление создать «новую квантовую теорию» можно только приветствовать.

Но что касается «проблемы интеллекта», то здесь он находится во власти глобального заблуждения.

Истоки этого заблуждения не так просты, как можно было бы подумать. Сам он мотивирует и обосновывает свою позицию теоремой Гёделя {PENRO5 = МОИ № 16, с.93}. Но тем, кто разбирается в людской психологии, должно быть ясно, что Пенроуз сначала не верит в ИИ, а потом уж он ищет какие-то логические обоснования своему неверию – и находит их в теореме Гёделя. А если пожелать найти причины этого первичного неверия, то их следует искать, скорее всего, в направлении полушарий мозга: Пенроуз сам говорит {PENRO5 = МОИ №16, с.101}, что он «тяготеет к геометрическим методам» (оно и понятно, если вспомнить все эти его «замощения»), что за это отвечает правое полушарие, а за аналитические способности – левое. Конечно, всё не так примитивно, но всё же я думаю, что это первоначальное неверие Пенроуза в ИИ начало берет там же, где и его «геометрические наклонности», а именно: в полушарии, противоположном аналитическому.

Однако, если отбросить психологические факторы и рассматривать только логические, то самый основной, самый фундаментальный ход пенроузовских мыслей таков: 1) теорема Гёделя(–Тьюринга) показывает, что алгоритм не может установить истину; 2) однако мы эту истину устанавливаем; 3) следовательно, наше мышление не алгоритмично; 4) но оно всё же может быть научно объяснено; 5) значит, объяснение должно быть неалгоритмично – невычислительно; 6) его надо искать в квантовой механике.

Но вся эта логическая цепочка неверна уже с самого первого шага: ничего такого ни теоремы Гёделя, ни теоремы Тьюринга не показывают – а после этого всё дальнейшее отпадает само собой.

И не показывают эти теоремы ничего потому, что опираются они на диагональный процесс Кантора. А про этот процесс можно сказать следующее. Если мы его применяем к продуктам алгоритмов, к «миру алгоритмов», то этот метод элементарно и вульгарно ошибочен. А чтобы сделать его не элементарно и вульгарно ошибочным, нужно выйти за пределы «мира алгоритмов», приняв определенный постулат (о равномошности бесконечных множеств). Но в таком случае этот метод уже ничего не может доказать относительно «мира алгоритмов», от которого он отрекся своим постулатом.

Вот и всё: либо одно, либо другое – и в обоих случаях в «мире алгоритмов» и истина алгоритмами все-таки устанавливается, и «строгий ИИ» запросто создается, и человеческое сознание мозговыми программами без труда объясняется.

В этом в общем-то и состоит мой ответ Роджеру Пенроузу – на том же уровне фундаментальности, на котором обитает его схема.

Валдис Эгле

31 декабря 2010 года

Литература

- [1] Aharonov, Y., Albert, D.Z. (1981). *Can we make sense out of the measurement process in relativistic quantum mechanics?* Phys. Rev., D24, 359–370.
- [2] Aharonov, Y., Vaidman, L. (1990). *Properties of a quantum system during the time interval between two measurements.* Phys. Rev., A41, 11.
- [3] Aharonov, Y., Anandan, J., Vaidman, L. (1993). *Meaning of the wave function.* Phys. Rev., A47, 4616–4626.
- [4] Aharonov, Y., Bergmann, P.G., Liebowitz, J.L. (1964). *Time symmetry in the quantum process of measurement.* В сб. *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek). Princeton University Press, 1983; первоначально в Phys. Rev., B134, 1410–1416.
- [5] Aharonov, Y., Albert, D.Z., Vaidman, L. (1986). *Measurement process in relativistic quantum theory.* Phys. Rev., D34, 1805–1813.
- [6] Albert, D.Z. (1983). *On quantum-mechanical automata.* Phys. Lett., 98A (5, 6), 249–252.
- [7] Albrecht Buehler, G. (1981). *Does the geometric design of centrioles imply their function?* Cell Motility, 1, 237–245.
- [8] Albrecht Buehler, G. (1985). *Is the cytoplasm intelligent too?* Cell and Muscle Motility, 6, 1–21.
- [9] Albrecht Buehler, G. (1991). *Surface extensions of 3T3 cells towards distant infrared light sources.* J. Cell Biol., 114, 493–502.
- [10] Anthony, M., Biggs, N. (1992). *Computational learning theory, an introduction.* Cambridge University Press.
- [11] Applewhite, P.B. (1979). *Learning in protozoa.* В сб. *Biochemistry and physiology of protozoa.* Vol. 1 (ed. M. Levandowsky, S.H. Hunter), 341–355. Academic Press, New York.
- [12] Arhem, P., Lindahl, B.I.B. (ed.) (1993). *Neuroscience and the problem of consciousness: theoretical and empirical approaches.* В сб. *Theoretical medicine*, 14, Number 2. Kluwer Academic Publishers.
- [13] Aspect, A., Grangier, P. (1986). *Experiments on Einstein–Podolsky–Rosen type correlations with pairs of visible photons.* В сб. *Quantum concepts in space and time* (ed. R. Penrose, C.J. Isham). Oxford University Press.
- [14] Aspect, A., Grangier, P., Roger, G. (1982). *Experimental realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedanken-experiment: a new violation of Bell's inequalities.* Phys. Rev. Lett., 48, 91–94.
- [15] Baars, B.J. (1988). *A cognitive theory of consciousness.* Cambridge University Press.
- [16] Bailey, T.N., Baston, R.J. (ed.) (1990). *Twistors in mathematics and physics.* London Mathematical Society Lecture Notes Series, 156. Cambridge University Press.
- [17] Baylor, D.A., Lamb, T.D., Yau, K.-W. (1979). *Responses of retinal rods to single photons.* J. Physiol., 288, 613–634.
- [18] Beck, F., Eccles, J.C. (1992). *Quantum aspects of consciousness and the role of consciousness.* Proc. Nat. Acad. Sci., 89, 11357–11361.
- [19] Becks, K.-H., Hemker, A. (1992). *An artificial intelligence approach to data analysis.* В сб. *Proceedings of 1991 CERN School of Computing* (ed. C. Verkerk). CERN, Switzerland.
- [20] Bell, J.S. (1964). *On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox.* Physics, 1, 195–200.
- [21] Bell, J.S. (1966). *On the problem of hidden variables in quantum theory.* Revs. Mod. Phys., 38, 447–452.
- [22] Bell, J.S. (1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics.* Cambridge University Press.
- [23] Bell, J.S. (1990). *Against measurement.* Physics World, 3, 33–40.
- [24] Benacerraf, P. (1967). *God, the Devil and Gödel.* The Monist, 51, 9–32.
- [25] Benioff, P. (1982). *Quantum mechanical Hamiltonian models of Turing Machines.* J. Stat. Phys., 29, 515–546.
- [26] Bennett, C.H., Brassard, G., Breidbart, S., Wiesner, S. (1983). *Quantum cryptography, or unforgeable subway tokens.* В сб. *Advances in cryptography.* Plenum, New York.
- [27] Bernard, C. (1875). *Leçons sur les anesthésiques et sur l'asphyxie.* J.B. Bailliere, Paris.
- [28] Blakemore, C., Greenfield, S. (ed.) (1987). *Mind-waves: thoughts on intelligence, identity and consciousness.* Blackwell, Oxford.
- [29] Blum, L., Shub, M., Smale, S. (1989). *On a theory of computation and complexity over the real numbers: NP completeness, recursive functions and universal machines.* Bull. Amer. Math. Soc., 21, 1–46.
- [30] Bock, G.R., Marsh, J. (1993). *Experimental and theoretical studies of consciousness.* Wiley.
- [31] Boden, M. (1977). *Artificial intelligence and natural man.* The Harvester Press, Hassocks.
- [32] Boden, M.A. (1990). *The creative mind: myths and mechanisms.* Wiedenfeld and Nicolson, London.

- [33] Bohm, D. (1952). *A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables, I and II*. В сб. *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek). Princeton University Press 1983. Первоначально в *Phys. Rev.*, 85, 166–193.
- [34] Bohm, D., Hiley, B. (1994). *The undivided universe*. Routledge, London.
- [35] Boole, G. (1854). *An investigation of the laws of thought*. 1958, Dover, New York.
- [36] Boolos, G. (1990). *On seeing the truth of the Gödel sentence*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 655.
- [37] Bowie, G.L. (1982). *Lucas' number is finally up*. *J. of Philosophical Logic*, 11, 279–285.
- [38] Brady, M. (1993). *Computational vision*. В сб. *The simulation of human intelligence* (ed. D. Broadbent). Blackwell, Oxford.
- [39] Braginsky, V.B. (1977). *The detection of gravitational waves and quantum non-disturbative measurements*. В сб. *Topics in theoretical and experimental gravitation physics* (ed. V. de Sabbata., J. Weber), 105. Plenum, London.
- [40] Broadbent, D. (1993). *Comparison with human experiments*. В сб. *The simulation of human intelligence* (ed. D. Broadbent). Blackwell, Oxford.
- [41] Brown, H.R. (1993). *Bell's other theorem and its connection with nonlocality*. Part 1. В сб. *Bell's Theorem and the foundations of physics* (ed. A. Van der Merwe, F. Selleri). World Scientific, Singapore.
- [42] Butterfield, J. (1990). *Lucas revived? An undefended flank*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 658.
- [43] Castagnoli, G., Rasetti, M., Vincenti, A. (1992). *Steady, simultaneous quantum computation: a paradigm for the investigation of nondeterministic and non recursive computation*. *Int. J. Mod. Phys. C*, 3, 661–689.
- [44] Caudill, M. (1992). *In our own image. Building an artificial person*. Oxford University Press.
- [45] Chaitin, G.J. (1975). *Randomness and mathematical proof*. *Scientific American* (May 1975), 47.
- [46] Chalmers, D.J. (1990). *Computing the thinkable*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 658.
- [47] Chandrasekhar, S. (1987). *Truth and beauty. Aesthetics and motivations in science*. The University of Chicago Press.
- [48] Chang, C.L., Lee, R. C.-T. (1987). *Symbolic logic and mechanical theorem proving*, 2nd edn (1 st edn 1973). Academic Press, New York.
- [49] Chou, S.C. (1988). *Mechanical geometry theorem proving*. Ridel.
- [50] Christian, J.J. (1994). *On definite events in a generally covariant quantum world*. Unpublished preprint.
- [51] Church, A. (1936). *An unsolvable problem of elementary numbertheory*. *Am. Jour. of Math.*, 58, 345–363.
- [52] Church, A. (1941). *The calculi of lambda-conversion*. *Annals of Mathematics Studies*, No. 6. Princeton University Press.
- [53] Churchland, P.M. (1984). *Matter and consciousness*. Bradford Books, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [54] Clauser, J.F., Horne, M.A. (1974). *Experimental consequences of objective local theories*. *Phys. Rev.*, D10, 526–535.
- [55] Clauser, J.F., Horne, M.A., Shimony, A. (1978). *Bell's theorem: experimental tests and implications*. *Rpts. on Prog. in Phys.*, 41, 1881–1927.
- [56] Cohen, P.C. (1966). *Set theory and the continuum hypothesis*. Benjamin, Menlo Park. CA.
- [57] Conrad, M. (1990). *Molecular computing*. В сб. *Advances in computers* (ed. M.C. Yovits), Vol. 31. Academic Press, London.
- [58] Conrad, M. (1992). *Molecular computing: the lock key paradigm*. *Computer* (November 1992), 11–20.
- [59] Conrad, M. (1993). *The fluctuon model of Force, Life, and computation: a constructive analysis*. *Appl. Math. and Comp.*, 56, 203–259.
- [60] Cooke, 1988.
- [61] Costa de Beauregard, O. (1989). В сб. *Bell's theorem, quantum theory, and conceptions of the universe* (ed. M. Kafatos). Kluwer, Dordrecht.
- [62] Craik, K. (1943). *The nature of explanation*. Cambridge University Press.
- [63] Crick, F. (1994). *The astonishing hypothesis. The scientific search for the soul*. Charles Scribner's Sons, New York, and Maxwell Macmillan International.
- [64] Crick, F., Koch, C. (1990). *Towards a neurobiological theory of consciousness*. *Seminars in the Neurosciences*, 2, 263–275.
- [65] Crick, F., Koch, C. (1992). *The problem of consciousness*. *Scientific American*, 267, 110.
- [66] Curl, R.F., Smalley, R.E. (1991). *Fullerenes*. *Scientific American*, 265, No. 4, 32–41.
- [67] Cutland N.J. (1980). *Computability. An introduction to recursive function theory*. Cambridge University Press.
- [68] Davenport, H. (1952). *The higher arithmetic*. Hutchinson's University Library.
- [69] Davies, P.C.W. (1974). *The physics of time asymmetry*. Surrey University Press, Belfast.
- [70] Davies, P.C.W. (1984). *Quantum mechanics*. Routledge, London.

- [71] Davis, M. (ed.) (1965). *The undecidable – basic papers on undecidable propositions, unsolvable problems and computable functions*. Raven Press, Hewlett, New York.
- [72] Davis, M. (1978). *What is a computation?* В сб. *Mathematics today; twelve informal essays* (ed. L.A. Steen). Springer-Verlag, New York.
- [73] Davis M. (1990). *Is mathematical insight algorithmic?* Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 659.
- [74] Davis, M. (1993). *How subtle is Gödel's theorem?* Behavioural and Brain Sciences, 16, 611–612.
- [75] Davis, M., Hersch, R. (1975). *Hilbert's tenth problem*. Scientific American (Nov. 1973), 84.
- [76] Davis, P.J., Hersch, R. (1982). *The mathematical experience*. Harvester Press.
- [77] de Broglie, L. (1956). *Tentative d'interprétation causale et nonlinéaire de la mécanique ondulatoire*. Gauthier-Villars, Paris.
- [78] Deeke, L., Grötzinger, B., Kornhuber, H.H. (1976). *Voluntary finger movements in man: cerebral potentials and theory*. Biol. Cybernetics. 23, 99.
- [79] del Giudice, E., Doglia, S., Milani, M. (1983). *Self-focusing and ponderomotive forces of coherent electric waves – a mechanism for cytoskeleton formation and dynamics*. В сб. *Coherent excitations in biological systems* (ed. H. Fröhlich, F. Kremer). Springer-Verlag, Berlin.
- [80] Dennett, D. (1990). *Betting your life on an algorithm*. Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 660.
- [81] Dennett, D.C. (1991). *Consciousness explained*. Little, Brown and Company.
- [82] d'Espagnat, B. (1989). *Conceptual foundations of quantum mechanics*, 2nd edn. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- [83] Deutsch, D. (1985). *Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer*. Proc. Roy. Soc. (Lond.), A400, 97–117.
- [84] Deutsch, D. (1989). *Quantum computational networks*. Proc. Roy. Soc. (Lond.), A425, 73–90.
- [85] Deutsch, D. (1991). *Quantum mechanics near closed time-like lines*. Phys. Rev., D44, 3197–3217.
- [86] Deutsch, D. (1992). *Quantum computation*. Phys. World, 5, 57–61.
- [87] Deutsch, D., Ekert, A. (1993). *Quantum communication moves into the unknown*. Phys. World, 6, 22–23.
- [88] Deutsch, D., Jozsa, R. (1992). *Rapid solution of problems by quantum computation*. Proc. R. Soc. Lond., A439, 553–558.
- [89] Devlin, K. (1988). *Mathematics: the New Golden Age*. Penguin Books, London.
- [90] DeWitt, B.S., Graham, R.D. (ed.) (1973). *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton University Press.
- [91] Dicke, R.H. (1981). *Interaction-free quantum measurements: a paradox?* Am. J. Phys., 49, 925–930.
- [92] Diósi, L. (1989). *Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations*. Phys. Rev., A40, 1165–1174.
- [93] Diósi, L. (1992). *Quantum measurement and gravity for each other*. В сб. *Quantum chaos, quantum measurement*; NATO ASI Series C. Math. Phys. Sci 357 (ed. P. Cvitanovic, I.C. Percival, A. Wirzba). Kluwer, Dordrecht.
- [94] Dirac, P.A.M. (1947). *The principles of quantum mechanics*, 3rd edn. Oxford University Press.
- [95] Dodd, A. (1991). *Gödel, Penrose, and the possibility of AI*. Artificial Intelligence Review, 5.
- [96] Donaldson, S.K. (1983). *An application of gauge theory to four dimensional topology*. J. Diff. Geom., 18, 279–315.
- [97] Doyle, J. (1990). *Perceptive questions about computation and cognition*. Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 661.
- [98] Dreyfus, H.L. (1972). *What computers can't do*. Harper and Row, New York.
- [99] Dummett, M. (1973). *Frege: philosophy of language*. Duckworth, London.
- [100] Dustin, P. (1984). *Microtubules*, 2nd revised edn. Springer-Verlag, Berlin.
- [101] Dryl, S. (1974). *Behaviour and motor responses in paramecium*. В сб. *Paramecium – a current survey* (ed. W.J. Van Wagendonk), 165–218. Elsevier, Amsterdam.
- [102] Eccles, J.C. (1973). *The understanding of the brain*. McGraw-Hill, New York.
- [103] Eccles, J.C. (1989). *Evolution of the brain: creation of the self*. Routledge, London.
- [104] Eccles, J.C. (1992). *Evolution of consciousness*. Proc. Natl. Acad. Sci., 89, 7320–7324.
- [105] Eccles, J.C. (1994). *How the self controls its brain*. Springer-Verlag, Berlin.
- [106] Eckert, R., Randall, D., Augustine, G. (1988). *Animal physiology. Mechanisms and adaptations*, Chapter 11. Freeman, New York.
- [107] Eckhorn, R., Bauer, R., Jordan, W., Brosch, M., Kruse, W., Munk, M., Reitboeck, H.J. (1988). *Coherent oscillations: a mechanism of feature linking in the visual cortex?* Biol. Cybern., 60, 121–130.
- [108] Edelman, G.M. (1976). *Surface modulation and cell recognition on cell growth*. Science, 192, 218–226.
- [109] Edelman, G.M. (1987). *Neural Darwinism, the theory of neuronal group selection*. Basic Books, New York.
- [110] Edelman, G.M. (1988). *Topobiology, an introduction to molecular embryology*. Basic Books, New York.

- [111] Edelman, G.M. (1989). *The remembered present. A biological theory of consciousness*. Basic Books, New York.
- [112] Edelman, G.M. (1992). *Bright air, brilliant fire: on the matter of the mind*. Allen Lane, The Penguin Press, London.
- [113] Einstein, A., Podolsky, P., Rosen, N. (1935). *Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?* В сб. *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek). Princeton University Press, 1983. Первоначально в *Phys. Rev.*, 47, 777–780.
- [114] Elitzur, A.C., Vaidman, L. (1993). *Quantum-mechanical interaction-free measurements*. *Found. of Phys.*, 23, 987–997.
- [115] Elkies, Noam G. (1988). *On $A^4 + B^4 + C^4 = D^4$* . *Maths. of Computation*, 51, (No. 184), 825–835.
- [116] Everett, H. (1957). *"Relative State" formulation of quantum mechanics*. В сб. *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek). Princeton University Press, 1983; первоначально в *Rev. of Modern Physics*, 29, 454–462.
- [117] Feferman, S. (1988). *Turing in the Land of $O(z)$* . В сб. *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken). Kammerer and Unverzagt, Hamburg.
- [118] Feynman, R.P. (1948). *Space-time approach to non-relativistic quantum mechanics*. *Revs. Mod. Phys.*, 20, 367–387.
- [119] Feynman, R.P. (1982). *Simulating physics with computers*. *Int. J. Theor. Phys.*, 21 (6/7), 467–488.
- [120] Feynman, R.P. (1985). *Quantum mechanical computers*. *Optics News*, Feb., 11–20.
- [121] Feynman, R.P. (1986). *Quantum mechanical computers*. *Foundations of Physics*, 16 (6), 507–531.
- [122] Fodor, J.A. (1983). *The modularity of mind*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [123] Franks, N.P., Lieb, W.R. (1982). *Molecular mechanics of general anaesthesia*. *Nature*, 300, 487–493.
- [124] Freedman, D.H. (1994). *Brainmakers*. Simon and Schuster. New York.
- [125] Freedman, S.J., Clauser, J.F. (1972). *Experimental test of local hidden-variable theories*. В сб. *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek). Princeton University Press, 1983; первоначально в *Phys. Rev. Lett.*, 28, 938–941.
- [126] Frege, G. (1893). *Grundgesetze der Arithmetik, begriffsschriftlich abgeleitet*, Vol. 1. H. Pohle, Jena.
- [127] Frege, G. (1964). *The basic laws of arithmetic, translated and edited with an introduction by Montgomery Firth*. University of California Press, Berkeley.
- [128] French, J.W. (1940). *Trial and error learning in paramecium*. *J. Exp. Psychol.*, 26, 609–613.
- [129] Fröhlich, H. (1968). *Long range coherence and energy storage in biological systems*. *Int. Jour. of Quantum. Chem.*, 11, 641–649.
- [130] Fröhlich, H. (1970). *Long range coherence and the actions of enzymes*. *Nature*, 228, 1093.
- [131] Fröhlich, H. (1975). *The extraordinary dielectric properties of biological materials and the action of enzymes*. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 72 (11), 4211–4215.
- [132] Fröhlich, H. (1984). *General theory of coherent excitations on biological systems*. В сб. *Nonlinear electrodynamics in biological systems* (ed. W.R. Adey, A.F. Lawrence). Plenum Press, New York.
- [133] Fröhlich, H. (1986). *Coherent excitations in active biological systems*. В сб. *Modern bioelectrochemistry* (ed. F. Gutmann, H. Keyzer). Plenum Press, New York.
- [134] Fukui, K., Asai, H. (1976). *Spiral motion of paramecium caudatum in small capillary glass tube*. *J. Protozool.*, 23, 559–563.
- [135] Gandy, R. (1988). *The confluence of ideas in 1936*. В сб. *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken). Kammerer and Unverzagt, Hamburg.
- [136] Gardner, M. (1965). *Mathematical magic show*. Alfred Knopf, New York; Random House, Toronto.
- [137] Gardner, M. (1970). *Mathematical games: the fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life"*. *Scientific American*, 223, 120–123.
- [138] Gardner, M. (1989). *Penrose tiles to trapdoor ciphers*. Freeman, New York.
- [139] Gelber, B. (1958). *Retention in paramecium aurelia*. *J. Comp. Physiol. Psych.*, 51, 110–115.
- [140] Gelernter, D. (1994). *The muse in the machine*. The Free Press, Macmillan Inc., New York; Collier Macmillan, London.
- [141] Gell-Mann, M., Hartle, J.B. (1993). *Classical equations for quantum systems*. *Phys. Rev.*, D47, 3345–3382.
- [142] Gernoth, K.A., Clark, J.W., Prater, J.S., Bohr, H. (1993). *Neural network models of nuclear systematics*. *Phys. Lett.*, B300, 1–7.
- [143] Geroch, R. (1984). *The Everett interpretation*. *Nous*, 4 (специальный выпуск, посвященный основным принципам квантовой механики), 617–633.
- [144] Geroch, R., Hartle, J.B. (1986). *Computability and physical theories*. *Found. Phys.*, 16, 533.
- [145] Ghirardi, G.C., Rimini, A., Weber, T. (1980). *A general argument against superluminal transmission through the quantum mechanical measurement process*. *Lett. Nuovo Cim.*, 27, 293–298.
- [146] Ghirardi, G.C., Rimini, A., Weber, T. (1986). *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*. *Phys. Rev.*, D34, 470.
- [147] Ghirardi, G.C., Grassi, R., Rimini, A. (1990). *Continuous-spontaneous-reduction model involving gravity*. *Phys. Rev.*, A42, 1057–1064.

- [148] Ghirardi, G.C., Grassi, R., Pearle, P. (1990). *Relativistic dynamical reduction models: general framework and examples*. Foundations of Physics, 20, 1271–1316.
- [149] Ghirardi, G.C., Grassi, R., Pearle, P. (1992). *Comment on "Explicit collapse and superluminal signals"*. Phys. Lett., A166, 435–438.
- [150] Ghirardi, G.C., Grassi, R., Pearle, P. (1993). *Negotiating the tricky border between quantum and classical*. Physics Today, 46, 13.
- [151] Gisin, N. (1989). *Stochastic quantum dynamics and relativity*. Helv. Phys. Acta, 62, 363–371.
- [152] Gisin, N., Percival, I.C. (1993). *Stochastic wave equations versus parallel world components*. Phys. Lett., A175, 144–145.
- [153] Gleick, J. (1987). *Chaos. Making a new science*. Penguin Books.
- [154] Glymour, C., Kelly, K. (1990). *Why you'll never know whether Roger Penrose is a computer*. Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 666.
- [155] Gödel, K. (1931). *Über formal unentscheidbare Sätze per Principia Mathematica und verwandter Systeme I*. Monatshefte für, Mathematik und Physik, 38, 173–198.
- [156] Gödel, K. (1940). *The consistency of the axiom of choice and of the generalized continuum-hypothesis with the axioms of set theory*. Princeton University Press, Oxford University Press.
- [157] Gödel, K. (1949). *An example of a new type of cosmological solution of Einstein's field equations of gravitation*. Rev. of Mod. Phys., 21, 447.
- [158] Gödel, K. (1986). *Kurt Gödel, collected works, Vol. I (publications 1929–1936)* (ed. S. Feferman et al.). Oxford University Press.
- [159] Gödel, K. (1990). *Kurt Gödel, collected works, Vol. II (publications 1938–1974)* (ed. S. Feferman et al.). Oxford University Press.
- [160] Gödel, K. (1995). *Kurt Gödel, collected works, Vol. III* (ed. S. Feferman et al.). Oxford University Press.
- [161] Golomb, S.W. (1965). *Polyominoes*. Scribner and Sons.
- [162] Good, I.J. (1965). *Speculations concerning the first ultraintelligent machine*. Advances in Computers, 6, 31–88.
- [163] Good, I.J. (1967). *Human and machine logic*. Brit. J. Philos. Sci., 18, 144–147.
- [164] Good, I.J. (1969). *Gödel's theorem is a red herring*. Brit. J. Philos. Sci., 18, 359–373.
- [165] Graham, R.L., Rothschild, B.L. (1971). *Ramsey's theorem for n-parameter sets*. Trans. Am. Math. Soc., 59, 290.
- [166] Grant, P.M. (1994). *Another December revolution?* Nature, 367, 16.
- [167] Gray, C.M., Singer, W. (1989). *Stimulus-specific neuronal oscillations in orientation columns of cat visual cortex*. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 86, 1689–1702.
- [168] Grangier, P., Roger, G., Aspect, A. (1986). *Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: a new light on single-photon interferences*. Europhysics Letters, 1, 173–179.
- [169] Green, D.G., Bossomaier, T. (ed.) (1993). *Complex systems: from biology to computation*. IOS Press.
- [170] Greenberger, D.M., Horne, M.A., Zeilinger, A. (1989). *Going beyond Bell's theorem. B c6. Bell's theorem, quantum theory, and conceptions of the universe* (ed. M. Kafatos), 73–76. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands.
- [171] Greenberger, D.M., Horne, M.A., Shimony, A., Zeilinger, A. (1990). *Bell's theorem without inequalities*. Am. J. Phys., 58, 1131–1143.
- [172] Gregory, R.L. (1981). *Mind in science: a history of explanations in psychology and physics*. Weidenfeld and Nicholson Ltd. (также Penguin, 1984).
- [173] Grey Walter, W. (1953). *The living brain*. Gerald Duckworth and Co. Ltd.
- [174] Griffiths, R. (1984). *Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics*. J. Stat. Phys., 36, 219.
- [175] Grossberg, S. (ed.) (1987). *The adaptive brain I: Cognition, learning, reinforcement and rhythm и The adaptive brain II: Vision, speech, language and motor control*. North-Holland, Amsterdam.
- [176] Grünbaum, B., Shephard, G.C. (1987). *Tilings and Patterns*. Freeman, New York.
- [177] Grundler, W., Keilmann, F. (1983). *Sharp resonances in yeast growth proved nonthermal sensitivity to microwaves*. Phys. Rev. Letts., 51, 1214–1216.
- [178] Guccione, S. (1993). *Mind the truth: Penrose's new step in the Gödelian argument*. Behavioural and Brain Sciences, 16, 612–613.
- [179] Haag, R. (1992). *Local quantum physics: fields, particles, algebras*. Springer-Verlag, Berlin.
- [180] Hadamard, J. (1945). *The psychology of invention in the mathematical field*. Princeton University Press.
- [181] Hallett, M. (1984). *Cantorian set theory and limitation of size*. Clarendon Press, Oxford.
- [182] Hameroff, S.R. (1974). *Chi: a neural hologram?* Am. J. Clin. Med., 2 (2), 163–170.
- [183] Hameroff, S.R. (1987). *Ultimate computing. Biomolecular consciousness and nano-technology*. North Holland, Amsterdam.
- [184] Hameroff, S.R., Watt, R.C. (1982). *Information in processing in microtubules*. J. Theor. Biol., 98, 549–561.

- [185] Hameroff, S.R., Watt, R.C. (1983). *Do anesthetics act by altering electron mobility?* *Anesth. Analg.*, 62, 936–940.
- [186] Hameroff, S.R., Rasmussen, S., Mansson, B. (1988). *Molecular automata in microtubules: basic computational logic of the living state?* В сб. *Artificial Life, SFI studies in the sciences of complexity* (ed. C. Langton). Addison-Wesley, New York.
- [187] Hanbury Brown, R., Twiss, R.Q. (1954). *A new type of interferometer for use in radio astronomy.* *Phil. Mag.*, 45, 663–682.
- [188] Hanbury Brown, R., Twiss, R.Q. (1956). *The question of correlation between photons in coherent beams of light.* *Nature*, 177, 27–29.
- [189] Harel, D. (1987). *Algorithmics. The spirit of computing.* Addison-Wesley, New York.
- [190] Hawking, S.W. (1975). *Particle creation by Black Holes.* *Commun. Math. Phys.*, 43, 199–220.
- [191] Hawking, S.W. (1982). *Unpredictability of quantum gravity.* *Commun. Math. Phys.*, 87, 395–415.
- [192] Hawking, S.W., Israel, W. (ed.) (1987). *300 years of gravitation.* Cambridge University Press.
- [193] Hebb, D.O. (1949). *The organization of behaviour.* Wiley, New York.
- [194] Hecht, S., Schlaer, S., Pirenne, M.H. (1941). *Energy, quanta and vision.* *Journal of General Physiology*, 25, 821–840.
- [195] Herbert, N. (1993). *Elemental mind. Human consciousness and the new physics.* Dutton Books, Penguin Publishing.
- [196] Heyting, A. (1956). *Intuitionism: an introduction.* North-Holland, Amsterdam.
- [197] Heywood, P., Redhead, M.L.G. (1983). *Nonlocality and the Kochen–Specker Paradox.* *Found. Phys.*, 13, 481–499.
- [198] Hodges, A.P. (1983). *Alan Turing: the enigma.* Burnett Books and Hutchinson, London; Simon and Schuster, New York.
- [199] Hodgkin, D., Houston, A.I. (1990). *Selecting for the con in consciousness.* *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 668.
- [200] Hodgson, D. (1991). *Mind matters: consciousness and choice in a quantum world.* Clarendon Press, Oxford.
- [201] Hofstadter, D.R. (1979). *Gödel, Escher, Bach: an eternal golden braid.* Harvester Press, Hassocks, Essex.
- [202] Hofstadter, D.R. (1981). *A conversation with Einstein's brain.* В сб. *The mind's I* (ed. D.R. Hofstadter, D. Dennett). Basic Books; Penguin, Harmondsworth, Middlesex.
- [203] Hofstadter, D.R., Dennett, D.C. (ed.) (1981). *The mind's I.* Basic Books; Penguin, Harmondsworth, Middlesex.
- [204] Home, D. (1994). *A proposed new test of collapse-induced quantum nonlocality.* Preprint.
- [205] Home, D., Nair, R. (1994). *Wave function collapse as a nonlocal quantum effect.* *Phys. Lett.*, A187, 224–226.
- [206] Home, D., Selleri, F. (1991). *Bell's Theorem and the EPR Paradox.* *Rivista del Nuovo Cimento*, 14, N. 9.
- [207] Hopfield, J.J. (1982). *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities.* *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 79, 2554–2558.
- [208] Hsu, F.-H., Anantharaman, T., Campbell, M., Nowatzyk, A. (1990). *A grandmaster chess machine.* *Scientific American*, 263.
- [209] Huggett, S.A., Tod, K.P. (1985). *An introduction to twistor theory.* London Math. Soc. student texts. Cambridge University Press.
- [210] Hughston, L.P., Jozsa, R., Wootters, W.K. (1993). *A complete classification of quantum ensembles having a given density matrix.* *Phys. Letters*, A183, 14–18.
- [211] Isham, C.J. (1989). *Quantum gravity.* В сб. *The new physics* (ed. P.C.W. Davies), 70–93. Cambridge University Press.
- [212] Isham, C.J. (1994). *Prima facie questions in quantum gravity.* В сб. *Canonical relativity: classical and quantum* (ed. J. Ehlers, H. Friedrich). Springer-Verlag, Berlin.
- [213] Jibu, M., Hagan, S., Pribram, K., Hameroff, S.R., Yasue, K. (1994). *Quantum optical coherence in cytoskeletal microtubules: implications for brain function.* *Bio. Systems* (готовится к печати).
- [214] Johnson Laird, P.N. (1983). *Mental models.* Cambridge University Press.
- [215] Johnson Laird, P.N. (1987). *How could consciousness arise from the computations of the brain?* В сб. *Mindwaves: thoughts on intelligence, identity and consciousness* (ed. C. Blakemore, S. Greenfield). Blackwell, Oxford.
- [216] Károlyházy, F. (1966). *Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies.* *Nuo. Cim. A*, 42, 390–402.
- [217] Károlyházy, F. (1974). *Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies.* *Magyar Fizikai Polyoirat*, 12, 24.
- [218] Károlyházy, F., Frenkel, A., Lukacs, B. (1986). *On the possible role of gravity on the reduction of the wave function.* В сб. *Quantum concepts in space and time* (ed. R. Penrose, C.J. Isham). Oxford University Press.

- [219] Kasumov, A.Y., Kislov, N.A., Khodos, I.I. (1993). *Can the observed vibration of a cantilever of supersmall mass be explained by quantum theory?* *Microsc. Microanal. Microstruct.*, 4, 401–406.
- [220] Kentridge, R.W. (1990). *Parallelism and patterns of thought*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 670.
- [221] Khalifa, J. (ed.) (1994). *What is intelligence?* The Darwin College lectures. Cambridge University Press.
- [222] Klarner, D.A. (1981). *My life among the Polyominoes*. В сб. *The mathematical gardner* (ed. D.A. Klarner). Prindle, Weber and Schmidt, Boston, MA; Wadsworth Int., Belmont, CA.
- [223] Kleene, S.C. (1952). *Introduction to metamathematics*. North-Holland, Amsterdam, van Nostrand, New York.
- [224] Klein, M.V., Furtak, T.E. (1986). *Optics*, 2nd edn. Wiley, New York.
- [225] Kochen, S., Specker, E.P. (1967). *The problem of hidden variables in quantum mechanics*. *J. Math. Mech.*, 17, 59–88.
- [226] Kohonen, T. (1984). *Self-organization and associative memory*. Springer-Verlag, New York.
- [227] Komar, A.B. (1969). *Qualitative features of quantized gravitation*. *Int. J. Theor. Phys.*, 2, 157–160.
- [228] Koruga, D. (1974). *Microtubule screw symmetry: packing of spheres as a latent bioinformation code*. *Ann. NY Acad. Sci.*, 466, 953–955.
- [229] Koruga, D., Hameroff, S., Withers, J., Loutfy, R., Sundareshan, M. (1993). *Fullerene C₆₀. History, physics, nanobiology, nanotechnology*. North-Holland, Amsterdam.
- [230] Kosko, B. (1994). *Fuzzy thinking: the new science of fuzzy logic*. Harper Collins, London.
- [231] Kreisel, G. (1960). *Ordinal logics and the characterization of informal concepts of proof*. *Proc. of the Internal. Cong. of Mathematics*, Aug. 1958. Cambridge University Press.
- [232] Kreisel, G. (1967). *Informal rigour and completeness proofs*. В сб. *Problems in the philosophy of mathematics* (ed. I. Lakatos), 138–186. North-Holland, Amsterdam.
- [233] Laguës, M., Xiao Ming Xie, Tebbji, H., Xiang Zhen Xu, Mairet, Y., Hatterer, C., et al. (1993). *Evidence suggesting superconductivity at 250 K in a sequentially deposited cuprate film*. *Science*, 262, 1850–1851.
- [234] Lander, L.J., Parkin, T.R. (1966). *Counterexample to Euler's conjecture on sums of like powers*. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 72, 1079.
- [235] Leggett, A.J. (1984). *Schrödinger's cat and her laboratory cousins*. *Contemp. Phys.*, 25 (6), 583.
- [236] Lewis, D. (1969). *Lucas against mechanism*. *Philosophy*, 44, 231–233.
- [237] Lewis, D. (1989). *Lucas against mechanism II*. *Can. J. Philos.*, 9, 373–376.
- [238] Libet, B. (1990). *Cerebral processes that distinguish conscious experience from unconscious mental functions*. В сб. *The principles of design and operation of the brain* (ed. J.C. Eccles, O.D. Creutzfeldt), Experimental Brain research series 21, 185–205. Springer-Verlag, Berlin.
- [239] Libet, B. (1992). *The neural time-factor in perception, volition and free will*. *Revue de Metaphysique et de Morale*, 2, 255–272.
- [240] Libet, B., Wright, E.W. Jr., Feinstein, B., Pearl, D.K. (1979). *Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience*. *Brain*, 102, 193–224.
- [241] Linden, E. (1993). *Can animals think?* *Time Magazine* (March), 13.
- [242] Lisboa, P.G.J. (ed.) (1992). *Neural networks: current applications*. Chapman Hall, London.
- [243] Lockwood, M. (1989). *Mind, brain and the quantum*. Blackwell, Oxford.
- [244] Longair, M.S. (1993). *Modern cosmology – a critical assessment*. *Q.J.R. Astr. Soc.*, 34, 157–199.
- [245] Longuet-Higgins, H.C. (1987). *Mental processes: studies in cognitive science*, Part II. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [246] Lucas, J.R. (1961). *Minds, machines and Gödel*. *Philosophy*, 36, 120–124; также в Alan Ross Anderson (ed.) (1964) *Minds and Machines*. Englewood Cliffs.
- [247] Lucas, J.R. (1970). *The freedom of the will*. Oxford University Press.
- [248] McCarthy, J. (1979). *Ascribing mental qualities to machines*. В сб. *Philosophical perspectives in artificial intelligence* (ed. M. Ringle). Humanities Press, New York.
- [249] McCulloch, W.S., Pitts, W.H. (1943). *A logical calculus of the idea immanent in nervous activity*. *Bull. Math. Biophys.*, 5, 115–133. (Также в McCulloch, W.S., *Embodiments of mind*, MIT Press, 1965.)
- [250] McDermott, D. (1990). *Computation and consciousness*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 676.
- [251] MacLennan, B. (1990). *The discomforts of dualism*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 673.
- [252] Majorana, E. (1932). *Atomi orientati in campo magnetico variabile*. *Nuovo Cimento*, 9, 43–50.
- [253] Manaster-Ramer, A., Savitch, W.J., Zadrozny, W. (1990). *Gödel redux*. *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 675.
- [254] Mandelkow, E.-M., Mandelkow, F. (1994). *Microtubule structure*. *Curr. Opinions Structural Biology*, 4, 171–179.
- [255] Margulis, L. (1975). *Origins of eukaryotic cells*. Yale University Press, New Haven, CT.
- [256] Markov, A.A. (1958). *The insolubility of the problem of homeomorphy*. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 121, 218–220.
- [257] Marr, D.E. (1982). *Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information*. Freeman, San Francisco.

- [258] Marshall, I.N. (1989). *Consciousness and Bose–Einstein condensates*. *New Ideas in Psychology*, 7.
- [259] Mermin, D. (1985). *Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory*. *Physics Today*, 38, 38–47.
- [260] Mermin, D. (1990). *Simple unified form of the major no-hidden-variables theorems*. *Phys. Rev. Lett.*, 65, 3373–3376.
- [261] Michie, D., Johnston, R. (1984). *The creative computer. Machine intelligence and human knowledge*. Viking Penguin.
- [262] Minsky, M. (1968). *Matter, mind and models*. В сб. *Semantic information processing* (ed. M. Minsky). MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [263] Minsky, M. (1986). *The society of mind*. Simon and Schuster, New York.
- [264] Minsky, M., Papert, S. (1972). *Perceptrons: an introduction to computational geometry*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [265] Misner, C.W., Thorne, K.S., Wheeler, J.A. (1973). *Gravitation*. Freeman, New York.
- [266] Moore, A.W. (1990). *The infinite*. Routledge, London.
- [267] Moravec, H. (1988). *Mind children: the future of robot and human intelligence*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- [268] Moravec, H. (1994). *The Age of Mind: transcending the human condition through robots*. Готовится к печати.
- [269] Mortensen, C. (1990). *The powers of machines and minds*. *Behavioural and Brain Sciences*: 13 (4), 678.
- [270] Mostowski, A. (1957). *Sentences undecidable in formalized arithmetic: an exposition of the theory of Kurt Gödel*. North-Holland, Amsterdam.
- [271] Nagel, E., Newman, J.R. (1958). *Gödel's proof*. Routledge and Kegan Paul.
- [272] Newell, A., Simon, H.A. (1976). *Computer science as empirical enquiry: symbols and search*. *Communications of the ACM*, 19, 113–126.
- [273] Newell, A., Young, R., Polk, T. (1993). *The approach through symbols*. В сб. *The simulation of human intelligence* (ed. D. Broadbent). Blackwell, Oxford.
- [274] Newton, I. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Репринт: Cambridge University Press.
- [275] Newton, I. (1730). *Opticks*. 1952, Dover, New York.
- [276] Oakley, D.A. (ed.) (1985). *Brain and mind*. Methuen, London.
- [277] Obermayer, K, Teich, W.G., Mahler, G. (1988). *Structural basis of multistationary quantum systems. I. Effective single-particle dynamics*. *Phys. Rev.*, B37, 8096–8110.
- [278] Obermayer, K, Teich, W.G., Mahler, G. (1988). *Structural basis of multistationary quantum systems. II. Effective few-particle dynamics*. *Phys. Rev.*, B37, 8111–8121.
- [279] Omnès, R. (1992). *Consistent interpretations of quantum mechanics*. *Rev. Mod. Phys.*, 64, 339–382.
- [280] Pais, A. (1991). *Niels Bohr's times*. Clarendon Press, Oxford.
- [281] Pauling L. (1964). *The hydrate microcrystal theory of general anesthesia*. *Anesth. Analg.*, 43, 1.
- [282] Paz, J.P., Zurek, W.H. (1993). *Environment induced decoherence, classicality and consistency of quantum histories*. *Phys. Rev.*, D48 (6), 2728–2738.
- [283] Paz, J.P., Habib, S., Zurek, W.H. (1993). *Reduction of the wave packet: preferred observable and decoherence time scale*. *Phys. Rev.*, D47 (2), 3rd Series, 488–501.
- [284] Pearle, P. (1976). *Reduction of the state-vector by a nonlinear Schrödinger equation*. *Phys. Rev.*, D13, 857–868.
- [285] Pearle, P. (1989). *Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localization*. *Phys. Rev.*, A39, 2277–2289.
- [286] Pearle, P. (1992). *Relativistic model state-vector reduction*. В сб. *Quantum chaos – Quantum measurement*, NATO Adv. Sci. Inst. Ser. C. Math. Phys. Sci. 358 (Copenhagen 1991). Kluwer, Dordrecht.
- [287] Peat, F.D. (1988). *Superstrings and the search for the theory of everything*. Contemporary Books, Chicago.
- [288] Penrose, O. (1970). *Foundations of statistical mechanics: a deductive treatment*. Pergamon, Oxford.
- [289] Penrose, O., Onsager, L. (1956). *Bose–Einstein condensation and liquid helium*. *Phys. Rev.*, 104, 576–584.
- [290] Penrose, R. (1980). *On Schwarzschild causality – a problem for "Lorentz covariant" general relativity*. В сб. *Essays in general relativity* (A. Taub Festschrift) (ed. F.J. Tipler), 1–12. Academic Press, New York.
- [291] Penrose, R. (1987). *Newton, quantum theory and reality*. В сб. *300 Years of gravity* (ed. S.W. Hawking, W.Israel). Cambridge University Press.
- [292] Penrose, R. (1990). *Author's response*, *Behavioural and Brain Sciences*, 13 (4), 692.
- [293] Penrose, R. (1991). *The mass of the classical vacuum*. В сб. *The philosophy of vacuum* (ed. S. Saunders, H.R. Brown). Clarendon Press, Oxford.
- [294] Penrose, R. (1991). *Response to Tony Dodd's "Gödel, Penrose, and the possibility of AI"*. *Artificial Intelligence Review*, 5, 235.

- [295] Penrose, R. (1993). *Gravity and quantum mechanics*. В сб. *General relativity and gravitation 1992*. Proceedings of the Thirteenth International Conference on General Relativity and Gravitation held at Cordoba, Argentina 28 June – 4 July 1992. Part 1: Plenary lectures (ed. R.J. Gleiser, C.N. Kozameh, O.M. Moreschi). Institute of Physics Publications, Bristol.
- [296] Penrose, R. (1993). *Quantum non-locality and complex reality*. В сб. *The Renaissance of general relativity* (in honour of D.W. Sciama) (ed. G. Ellis, A. Lanza, J. Miller). Cambridge University Press.
- [297] Penrose, R. (1993). *Setting the scene: the claim and the issues*. В сб. *The simulation of human intelligence* (ed. D. Broadbent). Blackwell, Oxford.
- [298] Penrose, R. (1993). *An emperor still without mind*. Behavioural and Brain Sciences, 16, 616–622.
- [299] Penrose, R. (1994). *On Bell non-locality without probabilities: some curious geometry*. В сб. *Quantum reflections* (in honour of J.S. Bell) (ed. J. Ellis, A. Amati). Cambridge University Press.
- [300] Penrose, R. (1994). *Non-locality and objectivity in quantum state reduction*. В сб. *Fundamental aspects of quantum theory* (ed. J. Anandan, J.L. Safko). World Scientific, Singapore.
- [301] Penrose, R., Rindler, W. (1984). *Spinors and space-time*, Vol. 1: *Two-spinor calculus and relative fields*. Cambridge University Press.
- [302] Penrose, R., Rindler, W. (1986). *Spinors and space-time*, Vol. 2: *Spinor and twistor methods in space-time geometry*. Cambridge University Press.
- [303] Percival, I.C. (1994). *Primary state diffusion*. Proc. R. Soc. Lond., A (статья отправлена в журнал).
- [304] Peres, A. (1985). *Reversible logic and quantum computers*. Phys. Rev., A32 (6), 3266–3276.
- [305] Peres, A. (1990). *Incompatible results of quantum measurements*. Phys. Lett., A151, 107–108.
- [306] Peres, A. (1991). *Two simple proofs of the Kochen–Specker theorem*. J. Phys. A: Math. Gen., 24, L175–L178.
- [307] Perlis, D. (1990). *The emperor's old hat*. Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 680.
- [308] Planck, M. (1906). *The theory of heat radiation* (пер. на англ.: M. Masius, основана на лекциях, прочитанных в Берлине в 1906/1907 годах). 1959, Dover, New York.
- [309] Popper, K.R., Eccles, J.R. (1977). *The self and its brain*. Springer International.
- [310] Post, E.L. (1936). *Finite combinatory processes-formulation I*, Jour. Symbolic Logic, 1, 103–105.
- [311] Poundstone, W. (1985). *The recursive universe: cosmic complexity and the limits of scientific knowledge*. Oxford University Press.
- [312] Pour-El, M.B. (1974). *Abstract computability and its relation to the general purpose analog computer. (Some connections between logic, differential equations and analog computers.)* Trans. Amer. Math. Soc., 119, 1–28.
- [313] Pour-El, M.B., Richards, I. (1979). *A computable ordinary differential equation which possesses no computable solution*. Ann. Math. Logic, 17, 61–90.
- [314] Pour-El, M.B., Richards, I. (1981). *The wave equation with computable initial data such that its unique solution is not computable*. Adv. in Math., 39, 215–239.
- [315] Pour-El, M.B., Richards, I. (1982). *Noncomputability in models of physical phenomena*. Int. J. Theor. Phys., 21, 553–555.
- [316] Pour-El, M.B., Richards, I. (1989). *Computability in analysis and physics*. Springer-Verlag, Berlin.
- [317] Pribram, K.H. (1966). *Some dimensions of remembering: steps toward a neuropsychological model of memory*. В сб. *Macromolecules and behaviour* (ed. J. Gaito), 165–187. Academic Press, New York.
- [318] Pribram, K.H. (1975). *Toward a holonomic theory of perception*. В сб. *Gestalttheorie in der modern psychologie* (ed. S. Ertel), 161–184. Erich Wengenroth, Kohl.
- [319] Pribram, K.H. (1991). *Brain and perception: holonomy and structure in figural processing*. Lawrence Erlbaum Assoc., New Jersey.
- [320] Putnam, H. (1960). *Minds and machines*. В сб. *Dimensions of mind* (ed. S. Hook), New York Symposium. Также в *Minds and machines* (ed. A.R. Anderson), 43–59, Prentice-Hall, 1964; и в *Dimensions of mind: a symposium* (Proceedings of the third annual NYU Institute of Philosophy), 148–179, NYU Press, 1964.
- [321] Ramon y Cajal, S. (1955). *Studies on the cerebral cortex* (пер. на англ.: L.M. Kroft). Lloyd Luke, London.
- [322] Redhead, M.L.G. (1987). *Incompleteness, nonlocality, and realism*. Clarendon Press, Oxford.
- [323] Rosenblatt, F. (1962). *Principles of neurodynamics*. Spartan Books, New York.
- [324] Roskies, A. (1990). *Seeing truth or just seeming true?* Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 682.
- [325] Rosser, J.B. (1936). *Extensions of some theorems of Gödel and Church*. Jour. Symbolic Logic, 1, 87–91.
- [326] Rubel, L.A. (1985). *The brain as an analog computer*. J. Theoret. Neurobiol., 4, 73–81.
- [327] Rubel, L.A. (1988). *Some mathematical limitations of the general-purpose analog computer*. Adv. in Appl. Math., 9, 22–34.
- [328] Rubel, L.A. (1989). *Digital simulation of analog computation and Church's thesis*. Jour. Symb. Logic, 54 (3), 1011–1017.
- [329] Rucker, R. (1984). *Infinity and the mind: the science and philosophy of the infinite*. Paladin Books, Granada Publishing Ltd., London. (Первое издание: Harvester Press Ltd., 1982.)
- [330] Sacks, O. (1973). *Awakenings*. Duckworth, London.

- [331] Sacks, O. (1985). *The man who mistook his wife for a hat*. Duckworth, London.
- [332] Sagan, L. (1967). *On the origin of mitosing cells*. J. Theor. Biol., 14, 225–274.
- [333] Сахаров А.Д. (1967). *Квантовые флуктуации вакуума в искривленном пространстве и теория гравитации* (Saharov A.D. *Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation*). Доклады Акад. наук СССР, 177, 70–71. Пер. на англ. в Sov. Phys. Doklady, 12, 1040–1041 (1968).
- [334] Schrödinger, E. (1935). *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik*. Naturwissenschaften, 23, 807–812, 823–828, 844–849. (Пер. на англ.: J.T. Trimmer (1980) в Proc. Amer. Phil. Soc., 124, 323–338.) Также в сб. *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek). Princeton University Press, 1983.
- [335] Schrödinger, E. (1935). *Probability relations between separated systems*. Proc. Camb. Phil. Soc., 31, 555–563.
- [336] Schrödinger, E. (1967). *"What is Life?" and "Mind and Matter"*. Cambridge University Press.
- [337] Schroeder, M. (1991). *Fractals, chaos, power laws. Minutes from an infinite paradise*. Freeman, New York.
- [338] Scott, A.C. (1973). *Information processing in dendritic trees*. Math. Bio. Sci., 18, 153–160.
- [339] Scott, A.C. (1977). *Neurophysics*. Wiley Interscience, New York.
- [340] Searle, J.R. (1980). *Minds, brains and programs*. В сб. *The behavioral and brain sciences*. Vol. 3. Cambridge University Press. (Также в сб. *The mind's I* (ed. D.R. Hofstadter, D.C. Dennett). Basic Books, Inc.; Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middlesex, 1981.)
- [341] Searle, J.R. (1992). *The rediscovery of the mind*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [342] Seymore, J., Norwood, D. (1993). *A game for life*. New Scientist, 139, No. 1889, 23–26.
- [343] Sheng, O., Yang, J., Gong, C., Holz, A. (1988). *A new mechanism of high T_c superconductivity*. Phys. Lett., A133, 193–196.
- [344] Sloman, A. (1992). *The emperor's real mind: review of Roger Penrose's The Emperor's New Mind*. Artificial Intelligence, 56, 355–396.
- [345] Smart, J.J.C. (1961). *Gödel's theorem, Church's theorem and mechanism*. Synthèse, 13, 105–110.
- [346] Smith, R.J.O., Stephenson, J. (1975). *Computer simulation of continuous systems*. Cambridge University Press.
- [347] Smith, S., Watt, R.C., Hameroff, S.R. (1984). *Cellular automata in cytoskeletal lattice proteins*. Physica D, 10, 168–174.
- [348] Smolin, L. (1993). *What have we learned from non-perturbative quantum gravity?* В сб. *General relativity and gravitation 1992*. Proceedings of the thirteenth international conference on GRG, Cordoba, Argentina (ed. R.J. Gleiser, C.N. Kozameh, O.M. Moreschi). Institute of Physics Publications, Bristol.
- [349] Smolin, L. (1994). *Time, structure and evolution in cosmology*. В сб. *Temponelle scienziae filosofia* (ed. E. Agazzi). Word Scientific, Singapore.
- [350] Smorynski, C. (1975). *Handbook of mathematical logic*. North-Holland, Amsterdam.
- [351] Smorynski, C. (1983). *"Big" news from Archimedes to Friedman*. Notices Amer. Math. Soc., 30, 251–256.
- [352] Smullyan, R. (1961). *Theory of Formal Systems*. Princeton University Press.
- [353] Smullyan, R. (1992). *Gödel's incompleteness theorem*. Oxford Logic Guide No. 19. Oxford University Press.
- [354] Squires, E.J. (1986). *The mystery of the quantum world*. Adam Hilger Ltd., Bristol.
- [355] Squires, E.J. (1990). *On an alleged proof of the quantum probability law*. Phys. Lett., A145, 67–68.
- [356] Squires, E.J. (1992). *Explicit collapse and superluminal signals*. Phys. Lett., A163, 356–358.
- [357] Squires, E.J. (1992). *History and many-worlds quantum theory*. Found. Phys. Lett., 5, 279–290.
- [358] Stairs, A. (1983). *Quantum logic, realism and value-definiteness*. Phil. Sci., 50 (4), 578–602.
- [359] Stapp, H.P. (1979). *Whiteheadian approach to quantum theory and the generalized Bell's theorem*. Found. Phys., 9, 1–25.
- [360] Stapp, H.P. (1993). *Mind, matter, and quantum mechanics*. Springer-Verlag, Berlin.
- [361] Steen, L.A. (ed.) (1978). *Mathematics today: twelve informal essays*. Springer-Verlag, Berlin.
- [362] Stoney, G.J. (1881). *On the physical units of nature*. Phil. Mag. (Series 5), 11, 381.
- [363] Stretton, A.O.W., Davis, R.E., Angstadt, J.D., Donmoyer, J.E., Johnson, C.D., Meade, J.A. (1987). *Nematode neurobiology using Ascaris as a model system*. J. Cellular Biochem., 51A, 144.
- [364] Thorne, K.S. (1994). *Blaek holes & time warps: Einstein's outrageous legacy*. W.W. Norton and Company, New York.
- [365] Torrence, J. (1992). *The concept of nature*. The Herbert Spencer lectures. Clarendon Press. Oxford.
- [366] Tsotsos, J.K. (1990). *Exactly which emperor is Penrose talking about?* Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 686.
- [367] Turing, A.M. (1937). *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. Proc. Lond. Math. Soc. (ser. 2), 42, 230–265; исправления в 43, 544–546.
- [368] Turing, A.M. (1939). *Systems of logic based on ordinals*. Proc. Lond. Math. Soc., 45, 161–228.
- [369] Turing, A.M. (1950). *Computing machinery and intelligence*. Mind, 59, No. 236; также в *The mind's I* (ed. D.R. Hofstadter, D.C. Dennett), Basic Books; Penguin, Harmondsworth, Middlesex, 1981.

- [370] Turing, A.M. (1986). *Lecture to the London Mathematical Society on 20 February 1947*. В сб. *A.M. Turing's ACE report of 1946 and other papers* (ed. B.E. Carpenter, R.W. Doran). The Charles Babbage Institute, vol. 10, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [371] TuszŹyński, J., Trpisová, B., Sept, D., Satorić, M.V. (1996). *Microtubular self-organization and information processing capabilities*. В сб. *Toward a science of consciousness: contributions from the 1994 Tucson conference* (ed. S. Hameroff, A. Kaszniak, A. Scott). MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [372] von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer-Verlag, Berlin. Пер. на англ.: *Mathematical foundations of quantum mechanics*. Princeton University Press, 1955.
- [373] von Neumann, J., Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behaviour*. Princeton University Press.
- [374] Waltz, D. L. (1982). *Artificial intelligence*. Scientific American, 247 (4), 101–122.
- [375] Wang, Hao (1974). *From mathematics to philosophy*. Routledge, London.
- [376] Wang, Hao (1987). *Reflections on Kurt Gödel*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [377] Wang, Hao (1993). *On physicalism and algorithmism: can machines think?* Philosophia mathematica (Ser. III), 97–138.
- [378] Ward, R.S., Wells, R.O. Jr. (1990). *Twistor geometry and field theory*. Cambridge University Press.
- [379] Weber, J. (1960). *Detection and generation of gravitational waves*. Phys. Rev., 117, 306.
- [380] Weinberg, S. (1977). *The first three minutes: a modern view of the origin of the universe*. Andre Deutsch, London.
- [381] Werbos, P. (1989). *Bell's theorem; the forgotten loophole and how to exploit it*. В сб. *Bell's theorem, quantum theory, and conceptions of the universe* (ed. M. Kafatos). Kluwer, Dordrecht.
- [382] Wheeler, J.A. (1957). *Assessment of Everett's "relative state" formulation of quantum theory*. Revs. Mod. Phys., 29, 463–465.
- [383] Wheeler, J.A. (1975). *On the nature of quantum geometrodynamics*. Annals of Phys., 2, 604–614.
- [384] Wigner, E.P. (1960). *The unreasonable effectiveness of mathematics*. Commun. Pure Appl. Math., 13, 1–14.
- [385] Wigner, E.P. (1961). *Remarks on the mind–body question*. В сб. *The scientist speculates* (ed. I.J. Good). Heinemann, London. (Также в E. Wigner (1967), *Symmetries and reflections*. Indiana University Press, Bloomington; и в *Quantum theory and measurement* (ed. J.A. Wheeler, W.H. Zurek) Princeton University Press, 1983.)
- [386] Wilensky, R. (1990). *Computability, consciousness and algorithms*. Behavioural and Brain Sciences, 13 (4), 690.
- [387] Will, C. (1988). *Was Einstein right? Putting general relativity to the test*. Oxford University Press.
- [388] Wolpert, L. (1992). *The unnatural nature of science*. Faber and Faber, London.
- [389] Woolley, B. (1992). *Virtual worlds*. Blackwell, Oxford.
- [390] Wykes, A. (1969). *Doctor Cardano. Physician extraordinary*. Frederick Muller.
- [391] Young, A.M. (1990). *Mathematics, physics and reality*. Robert Briggs Associates, Portland, Oregon.
- [392] Zeilinger, A., Gaehler, R., Shull, C.G., Mampe, W. (1988). *Single and double slit diffraction of neutrons*. Revs. Mod. Phys., 60, 1067.
- [393] Zeilinger, A., Horne, M.A., Greenberger, D.M. (1992). *Higher-order quantum entanglement*. В сб. *Squeezed states and quantum uncertainty* (ed. D. Han, Y.S. Kirn, W.W. Zachary), NASA Conf. Publ. 3135. NASA, Washington, DC.
- [394] Zeilinger, A., Zukowski, M., Horne, M.A., Bernstein, H.J., Greenberger, D.M. (1994). *Einstein–Podolsky–Rosen correlations in higher dimensions*. В сб. *Fundamental aspects of quantum theory* (ed. J. Anandan, J.L. Safko). World Scientific, Singapore.
- [395] Zimba, J. (1993). *Finitary proofs of contextuality and nonlocality using Majorana representation of spin-3/2 states*, M. Sc. thesis, Oxford.
- [396] Zimba, J., Penrose, R. (1993). *On Bell non-locality without probabilities: more curious geometry*. Stud. Hist. Phil. Sci., 24 (5), 697–720.
- [397] Zohar, D. (1990). *The quantum self. Human nature and consciousness defined by the New Physics*. William Morrow and Company, Inc., New York.
- [398] Zohar, D., Marshall, I. (1994). *The quantum society. Mind, physics and a new social vision*. Bloomsbury, London.
- [399] Zurek, W.H. (1991). *Decoherence and the transition from quantum to classical*. Physics Today, 44 (No. 10), 36–44.
- [400] Zurek, W.H. (1993). *Preferred states, predictability, classicality and the environment-induced decoherence*. Prog. of Theo. Phys., 89 (2), 281–302.
- [401] Zurek, W.H., Habib, S., Paz, J.P. (1993). *Coherent states via decoherence*. Phys. Rev. Lett., 70 (9), 1187–1190.

Роджер Пенроуз
ТЕНИ РАЗУМА: В ПОИСКАХ НАУКИ О СОЗНАНИИ

Дизайнер М.В. Ботя

Технический редактор А.В. Широбоков

Корректоры З.Ю. Соболева, М.Т. Пушель

Подписано в печать 02.08.2005. Формат 84 × 108 ¹/₃₂.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 36,12. Уч. изд. л. 39,94.

Гарнитура Литературная. Бумага офсетная № 1.

Тираж 1500 экз. Заказ № 3963.

АНО «Институт компьютерных исследований» 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

<http://rcd.ru> E-mail: borisov@rcd.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленных диапозитивов в ОАО «Дом печати – ВЯТКА» 610033, г. Киров, ул. Московская, 122

Научно-популярное издание
«Мысли об Истине»
Выпуск № 18
Сформирован 28 июля 2014 года

Все читатели приглашаются принять участие в создании альманаха МОИ и присылать свои статьи и заметки для этого издания по адресу: Marina.Olegovna@gmail.com. Если присланные материалы будут соответствовать направлению Альманаха и минимальным требованиям информативности и корректности, то они будут опубликованы в нашем издании.

Основной вид существования Альманаха МОИ – в виде PDF-файлов в Вашем компьютере. Держите все выпуски МОИ в одной папке. Скачать PDF-ы можно с разных мест в Интернете, и не важно, откуда номер скачан. В Интернете нет одной фиксированной резиденции МОИ.

Содержание

Файл PENRS3	2
<i>Роджер Пенроуз. «Тени разума»</i>	3
Глава 5. Структура квантового мира.....	3
§5.1. Квантовая теория: головоломки и парадоксы	3
§5.2. Задача Элитцура–Вайдмана об испытании бомб.....	5
§5.3. Магические додекаэдры	6
§5.4. Z-загадки ЭПР-типа: экспериментальный статус	10
§5.5. Фундамент квантовой теории: исторический экскурс	13
§5.6. Основные правила квантовой теории	19
§5.7. Унитарная эволюция U	21
§5.8. Редукция R вектора состояния.....	24
§5.9. Решение задачи Элитцура–Вайдмана об испытании бомб.....	28
§5.10. Квантовая теория спина. Сфера Римана	30
§5.11. Местонахождение частицы и ее количество движения	36
§5.12. Гильбертово пространство	36
§5.13. Описание редукции R в терминах гильбертова пространства.....	39
§5.14. Коммутирующие измерения	42
§5.15. Квантовомеханическое «И»	43
§5.16. Ортогональность произведений состояний	44
§5.17. Квантовая сцепленность.....	45
§5.18. Объяснение загадки магических додекаэдров	49
Приложение В: Нераскрашиваемость додекаэдра.....	53
Приложение С: Ортогональность общих спиновых состояний	54
Глава 6. Квантовая теория и реальность.....	56
§6.1. Является ли R реальным процессом?.....	56
§6.2. О множественности миров	58
§6.3. Не принимая вектор $ \psi\rangle$ всерьез.....	60
§6.4. Матрица плотности.....	63
§6.5. Матрицы плотности для ЭПР-пар	67
§6.6. FAPP-объяснение процедуры R	68
§6.7. FAPP-объяснение правила квадратов модулей	72
§6.8. О редукции вектора состояния посредством сознания	73
§6.9. А теперь попробуем принять $ \psi\rangle$ действительно всерьез.....	74
§6.10. Гравитационная редукция вектора состояния.....	77
§6.11. Абсолютные единицы.....	80
§6.12. Новый критерий	81
Файл PENRS4	87
<i>Роджер Пенроуз. «Тени разума»</i>	88
Глава 7. Квантовая теория и мозг.....	88
§7.1. Макроскопическая квантовая процедура в работе мозга.....	88
§7.2. Нейроны, синапсы и компьютеры	91
§7.3. Квантовые вычисления.....	94
§7.4. Цитоскелет и микротрубочки	95
§7.5. Квантовая когерентность внутри микротрубочек.....	104
§7.6. Микротрубочки и сознание.....	105
§7.7. Модель разума.....	107
§7.8. Невычислимость в квантовой гравитации (1)	112
§7.9. Машины с оракулом и физические законы	113
§7.10. Невычислимость в квантовой гравитации (2)	115
§7.11. Время и сознательное восприятие.....	117

§7.12. ЭПР-феномены и время: необходимость в новом мировоззрении.....	121
Глава 8. Возможные последствия.....	124
§8.1. Искусственные разумные «устройства»	124
§8.2. Что компьютеры умеют делать хорошо... и что не очень	126
§8.3. Эстетика и т.д.	129
§8.4. Опасности компьютерных технологий	131
§8.5. Неправильные выборы	132
§8.6. Физический феномен сознания.....	135
§8.7. Три мира и три загадки.....	140
Эпилог	148
Послесловие в Векордии	149
Литература	151
Содержание	163