

СТО ЛЕТ НЕДОСКАЗАННОСТИ

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ДЛЯ ВСЕХ В 25 ЭССЕ

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ



МОСКВА, 2024

УДК 539.12

ББК 22.314

С30

Научный редактор АЛЕКСЕЙ ЦВЕЛИК, канд. физ.-мат. наук

Редактор ПЕТР ФАВОРОВ

Иллюстрации НЮСЯ КРАСОВИЦКАЯ

Семихатов А.

С30 Сто лет недосказанности: Квантовая механика для всех в 25 эссе / Алексей Семихатов. — М. : Альпина нон-фикшн, 2024. — 372 с. : ил.

ISBN 978-5-00223-174-4

Квантовая механика — самый точный из известных человечеству способов описания мира на той фундаментальной глубине, которая определяет его структуру, но недоступна прямому наблюдению. Только благодаря квантовой природе удастся существовать атомам, людям, звездам и почти всему остальному. Квантовые эффекты, которые уже задействованы в технологиях, максимально приближаются к нашим представлениям о чудесах. Но в силу самого своего устройства квантовая механика оставляет недосказанности в отношении поведения квантовых объектов и свойств реальности.

На заре второго квантового столетия Алексей Семихатов, автор бестселлера «Всё, что движется», предлагает последовательное изложение современного состояния квантовой механики. Каковы принципиальные особенности квантового мира и какой ценой их можно примирить с интуицией? По каким правилам развиваются квантовые системы во времени и как в это развитие вмешиваются вероятности? Как различные интерпретации квантовой механики подталкивают нас к глубоко философским заключениям о возможном устройстве реальности — от параллельных вселенных до разрывов в восприятии? И как привычная нам реальность возникает из чуждой ей квантовой? Что все-таки делает квантовый компьютер, что и как вовлекается в квантовую запутанность и почему квантовым объектам приходится существовать без некоторых свойств? Оказывается, о квантовой механике можно всерьез говорить понятным языком, а обсуждение ее сложных мест делает этот разговор только интереснее.

УДК 539.12

ББК 22.314

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

© Семихатов А., 2024

© Красовицкая А., иллюстрации, 2024

© ООО «Альпина нон-фикшн», 2024

ISBN 978-5-00223-174-4

СОДЕРЖАНИЕ

Что в книге	7
1. Что внутри: от вещей к атомам.....	21
2. Что такое квант и что квантуется.....	31
3. Что враждует.....	43
4. Что еще из-за вражды	55
5. Что беспричинно	65
6. Что перестало устраивать Эйнштейна.....	77
7. Что от вращения	89
8. Что комбинируется и запутывается.....	101
9. Что толкает в будущее	115
10. Что с вероятностями, кошкой и коллапсом	127
11. Что за параллельные вселенные	139
12. Что значит поставить деньги	151
13. Что кричат лоцманы	163
14. Что можно скрыть.....	175
15. Что отвечать на экзамене.....	189

16. Что же все-таки.....	201
17. Что телепортируется, но не клонируется.....	213
18. Что погибает, сообщив ответ.....	225
19. Что из игры в классики.....	237
20. Что раз в сто миллионов лет.....	249
21. Что портит память друзьям.....	261
22. Что от Дарвина.....	273
23. Что из моря.....	285
24. Что в поле.....	297
25. Что стандартно.....	309
 Что в заключение.....	 321
Уточнения и пояснения.....	323
Персонажи.....	361

Большинство из них даже не видят, в какую рискованную игру с реальностью они играют — с реальностью как чем-то, что не зависит от установленного.

А. Эйнштейн в письме к Э. Шрёдингеру (1950)

Несмотря на беспрецедентный эмпирический успех квантовой теории, само предположение, что она может быть *буквально верным описанием природы*, до сих пор встречается с глубоким недоверием, непониманием и даже гневом.

Д. Дойч (1996)

Почему квантовая физика меня интересует: именно потому, что она ломает ограничения наших обычных представлений о реальности. [И] она постоянно подвержена этой псевдоспиритуалистской опасности.

С. Жижек (2024)

ЧТО В КНИГЕ

Квантовая механика — самое удивительное, что когда-либо было изобретено людьми: она дает лучшее возможное описание невидимых и даже непредставимых объектов, но оставляет не вполне понятным, каким образом это ей удастся.

Квантовая природа лежит в основе всего существующего, а знания о ней — в основе многих современных технологий. Каждый раз, когда нам удастся использовать в наших целях квантовые эффекты, они оказываются самым близким приближением к чудесам, какое вообще возможно без нарушения законов природы.

Согласно квантовым законам и только лишь благодаря квантовым законам существуют атомы, из которых состоим и мы сами, и почти все на планете Земля; благодаря квантовым законам горит Солнце; квантовые процессы определяют взаимодействие света и вещества; весь наш мир *собран* из квантовых объектов. Но фундаментальная квантовая природа в глубине мира остается в основном незаметной из-за мельтешения огромного числа мельчайших участников. По отдельности они ведут себя квантово и взаимодействуют друг с другом тоже по квантовым правилам, но все вместе образуют привычный нам наблюдаемый, и почти ничем не квантовый, мир. Будучи его обитателем, я не проваливаюсь сквозь пол, вижу свет, греюсь в лучах Солнца и вообще являюсь продуктом и воплощением сложной химии, не особенно задумываясь, что не-квантовые правила (законы классической физики) не в состоянии *ничего* из этого обеспечить! Парадоксальным обра-

зом привычные свойства окружающего мира основаны на чуждых ему квантовых явлениях.

Чуждых — потому что лежащие в основании мира квантовые объекты не являются «горошинами, только очень маленькими», и на пути от нас к ним происходит качественный переход, фундаментальным образом меняющий правила игры и вообще понятия:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. Фейнман*

Свою главную задачу в этой книге я вижу в том, чтобы сконцентрироваться на квантовых принципах и на логике квантовой механики, по возможности не жертвуя при этом доступностью. *Принципы* определяют и характер изложения.

О дисциплине, в течение почти ста лет максимально успешно описывающей мир, можно наконец перестать рассказывать извинительно-индуктивно, «выводя» ее основные положения из нескольких характерных опытных фактов, организованных в условно-историческую последовательность. Вполне возможно вместо этого начать с заявления основных ее принципов — руководствуясь идеей, что, сколь бы необычными они ни казались, ста лет их повсеместного использования *достаточно* для их валидации и в дополнительных «оправданиях» никакой нужды нет. В индуктивном изложении квантовой механики, кстати, скачок при переходе от ранних экспериментов к развитому формализму все равно никуда не исчезает; историческая же канва, приводимая

* Здесь и далее цитаты даны в переводе автора.

«для поддержки», часто оказывается искаженной ретроспективным взглядом именно с высоты осознанных позднее принципов, что и историю лишает историчности, и принципы разбавляет конкретикой частных случаев.

Поэтому в этой книге нет ничего от учебника, от «краткого курса» физики. Равным образом не следует искать тут исторического изложения развития квантовой теории, хотя кое-какие отсылки к прошлому, разумеется, присутствуют, в том числе в привязке к некоторым фамилиям. (И еще я стараюсь избегать изобилия терминов, главным образом из опасения, что, один раз выпустив их на свободу, я не выдержу искушения и буду прятать за ними неполноту понимания и объяснений.) Зато в центре находятся главные положения квантовой механики и логические следствия из них, а также основные *недосказанности* квантовой механики. Эти последние определяются тем, что формальной (и на удивление хорошо работающей) схеме недостает привязки к физическим реалиям. Такое положение дел вызывает к жизни *интерпретации* — в широком смысле слова, попытки дополнить формальную схему квантовой механики более «смысловым», физическим содержанием. Развиваемые при этом рассуждения, как выясняется, доходят до вопросов о структуре реальности — приобретая тем самым даже *философское* измерение.

«Обычные» физические теории описывают какие-то конкретные аспекты физического мира, тогда как философские концепции оперируют более общими понятиями и в целом ведут независимое существование. Квантовая же механика уникальна сочетанием по крайней мере трех факторов: она, во-первых, дает количественное описание, во-вторых, имеет универсальную применимость и, в-третьих, затрагивает философские вопросы об устройстве реальности. Я хочу кратко прокомментировать каждое из этих положений.

Количественное описание. Квантовая теория с колоссальным отрывом лидирует среди всех областей человеческого знания по достигну-

той точности совпадения теоретического результата и экспериментальных данных. Свойства электрона включают величину, которую можно (ценой *значительных* усилий) с высокой точностью вычислить теоретически, а кроме того (да, при большом старании), с высокой же точностью измерить в опыте. Эти две ничем не схожие стратегии действий дают фантастически близкие результаты (совпадают 12 значащих цифр):

вычислено = 1,00115965218161(24),

измерено = 1,00115965218059(13)

(в скобках указан размер неточности в двух последних знаках). Результат вычисления опирается на «всё», что есть в квантовой теории¹, и, вне всякого сомнения, свидетельствует, что имеющаяся теория не может быть радикально неправильной, если выражаться самым сдержанным образом.

Универсальная применимость. Основные правила квантового мира представляют собой фундаментальные законы природы. С каким охватом и насколько фундаментальные? До какой степени мы в них уверены?

Ни одна физическая концепция не является «сакральным» знанием, и мы в целом готовы к тому, что при *каких-то* условиях концепции могут отказывать. Основополагающие принципы физики нельзя *доказать* в математическом смысле — они выражают собой обобщение наблюдений и не предполагают «доказательства»; опровергнуть же их, наоборот, можно даже единственным ясно выраженным контрпримером. В общем, мы пользуемся физическими теориями до тех пор, пока они соответствуют наблюдениям, а когда это перестает происходить, задумываемся о новых.

На фоне всех известных нам научных концепций квантовая механика дополнительно выделяется необычностью своего устройства. И тем не менее ни из одного угла Вселенной не поступает указаний, что базовые квантовые принципы требуют пересмотра.

Вот характерное высказывание по этому поводу (заодно затрагивающее и следующую важную тему, правда, с использованием устрашающей терминологии):

Вполне возможно, что в один прекрасный день мы обнаружим расхождения квантовой теории с экспериментами. Однако данные на сегодняшний день подтверждают тот взгляд, что наша Вселенная является квантовой до самой сердцевины, и поэтому нам необходимо согласовать принцип суперпозиции, унитарность и их последствия — иллюстрируемые, например, нарушением неравенства Белла — с нашим восприятием и пониманием.

В. Зурек

Устройство реальности: интерпретации. «Восприятие и понимание» в приведенной цитате — это о том, как, собственно, устроена квантовая реальность и наши взаимоотношения с ней, при том что мир вокруг нас совсем не выглядит квантовым. Выяснить это непросто: квантовая реальность прячется за сложением эффектов, происходящих от огромного числа объектов, а непосредственно «подглядеть» за ними поодиночке очень непросто уже по той причине, что квантовые объекты вообще *никак не выглядят*. Достигнутые успехи в понимании квантовой природы потребовали мышления с опорой не на наглядность, а на логику, вовлекающую математические абстракции. Но при этом в известной мере стирается грань между самими объектами и языком, на котором мы их обсуждаем. Не так просто разграничить три типа «вещей»: квантовую теорию как формально-математическую схему (необычайно успешную, как уже было сказано), квантовый мир «сам по себе» (ускользающий от прямого рассмотрения) и результаты измерений, которые мы получаем, изучая квантовые системы.

Недоговоренности по поводу того, «что есть что» в мире и в наших представлениях о нем, ничуть не мешают успехам

квантовой механики, но только усиливают желание предложить *интерпретации* — основанные на некоторых дополнительных предположениях пояснения о том, «что все-таки происходит», *что* именно описывает квантовая теория и как *оно* связано с наблюдаемой структурой мира. В подавляющем большинстве традиционных руководств по квантовой механике вопросы различных интерпретаций практически не обсуждаются как слишком философские, да и не нужные для вычислений, но здесь им будет уделено должное внимание. Интерес к ним, надо сказать, составляет тенденцию последнего времени, отмеченную среди прочего недавней Нобелевской премией по физике и подпитываемую перспективой квантовых вычислений и расширяющимися экспериментальными возможностями.

Что же в книге? Разбиение на главы отражает содержательную часть, а не исторические вехи, как уже было сказано. Вот подсказки для нетерпеливых. Самые «веселые» (в значении, близком к «беззаботные») главы — 11 и 12; самые «практичные» (при общем отсутствии акцента на практических аспектах) — 17 и 18; самые сложные — 24 и 25; самая загадочная — 21; основные в отношении базисного содержания квантовой механики — 8, 9 и 10; самые «исторические» (при общем отсутствии акцента на исторических аспектах) — 6, 14 и 23. Про не упомянутые здесь главы нельзя сказать, что у них нет никаких качеств, просто не видно какого-то одного заведомо доминирующего. Для тех, кто не собирается читать по порядку, но сначала все же наткнулся на этот абзац, вот кратчайшее описание содержания.

Вслед за вводной главой 1 главные качественные особенности квантового мира обсуждаются в главах 2–5. Основные мотивы здесь — возникновение дискретности (глава 2), несовместимость различных свойств друг с другом (которую я называю враждой, чтобы избежать технически очень нагруженного высказывания; главы 3 и 4) и индетерминизм (глава 5). Промежуточный итог

в некотором роде подводится в главе 6, отчасти с критических позиций, которые в свое время отстаивал Эйнштейн. Он руководствовался определенными представлениями об устройстве реальности, и в книге эти вопросы также появляются в этой главе. До некоторой степени техническое, но совершенно необходимое для всего дальнейшего «отступление» в главе 7 посвящено спине.

В главах 8 и 9 появляется основное средство для описания *состояний* квантовых систем — фундаментальное эволюционное уравнение, к которому «сама тянется рука» каждого профессионала перед лицом едва ли не любой квантовой задачи. Вооружившись этим знанием, в главе 10 мы на новом уровне возвращаемся к индетерминизму, а конкретно к вероятностям.

С этого момента становятся видны основные «недоговоренности» квантовой механики. Они представляют собой определенный вызов, и значительная часть книги (главы 11, 12, 13, 19, 20) посвящена вариантам ответа на него — интерпретациям квантовой механики. Они кажутся мне интересными не только каждая сама по себе, но еще и тем, насколько они непохожи. Мы *пока* не в состоянии эмпирически обосновать выбор между ними, но прогресс в технологиях уже позволил получить от природы ответ на конкретный вопрос о том, как в квантовой реальности (не) могут присутствовать скрытые параметры — «еще более глубокий» слой реальности. Эта история, начало которой восходит к сомнениям Эйнштейна, а кульминация на данный момент отмечена Нобелевской премией 2022 года, излагается в главах 14, 15, 16. Здесь не обошлось без некоторой исторической канвы, а на первом плане оказалась квантовая запутанность.

Возможности квантовой механики в действии иллюстрируются на примере квантовой телепортации (глава 17) и квантовых вычислений (глава 18). Комбинация нескольких концепций в главе 21 позволяет заострить и уточнить вопросы об устрой-

стве квантовой реальности. Столь важная для нас метаморфоза — «превращение» квантового мира внутри вещей в окружающий нас классический мир — обсуждается в главе 22.

Завершающие главы 23, 24, 25 — это переход от квантовой механики к релятивистской квантовой теории поля, начинающийся с бессмертной саги с Дираком в главной роли. Впрочем, кульминационную в этом сюжете главу 24 придется, возможно, пропустить из-за заметного превышения допустимого уровня абстракции (я надеюсь, что читатель великодушно простит мне «выпадение» около 4% общего объема книги). Для «валидации» всей конструкции квантовых полей в глазах тех читателей, у кого она вызвала легкую оторопь, в главе 25 появляется Стандартная модель. Путеводитель по этой фундаментальной теории там искать не следует, но мне кажется важным в завершение книги добраться до самой квантовой «сердцевины».

В конце для справки приведены кратчайшие биографические сведения о почти всех упоминаемых в книге людях.

Если в этой книге есть сквозная тема, то это *запутанность*. Это существенно квантовое явление когда-то воспринималось как экзотика, но сейчас играет все более определяющую роль в нашем понимании того, как функционирует квантовый мир, одновременно находя применение в такой практической области, как тайнопись. Запутанность не сконцентрирована в какой-то одной главе, поэтому может оказаться полезным отдельный краткий путеводитель по тем местам, где она встречается.

Впервые запутанность упоминается в главе 6. Вообще-то она представляет собой свойство волновой функции, с которой мы знакомимся только в главе 8, и там, с учетом приобретенного знания, она обсуждается с использованием метафоры «квантового казино» (которая по существу является слегка замаскированной формой абстрактного математического определения).

Запутанность, которая в согласии с фундаментальными правилами должна бы наблюдаться, но не наблюдается («практические» кошки не запутываются по Шрёдингеру), — предмет беспокойства и обсуждения начиная с главы 10. Разрешение противоречия, обсуждаемое в главе 11, основано на идее, что запутанности в мире не меньше, а больше, чем представляется: запутываются в том числе хозяева и хозяйки кошек, из-за чего их «копии» расходятся по различным вселенным. В главах 15 и 16 запутанность возникает во всей полноте как средство задавать природе тонкие вопросы о том, когда и как квантовые объекты приобретают свои свойства. В главе 17 запутанность — главная идея, потому что на ней и основана квантовая телепортация. В полной мере работает запутанность и в главе 18, где без нее от квантовых вычислений не осталось бы практически ничего. В главе 20 именно запутанность приводит к немедленному распространению локализации с одного электрона «на всю кошку». В главе 21 она играет не последнюю роль в знаменитом конфликте восприятий, намекающем на «конфликтную» структуру квантовой реальности, а в главе 22 она же делает все возможное, чтобы конфликты замаскировать и создать у всех нас иллюзию гладкой классической реальности.

Для некоторых читателей может оказаться полезным и еще один взгляд на часть содержания: с точки зрения уже упомянутых интерпретаций квантовой механики. *Вообще* их известно немало, поэтому неизбежен отбор. Вот что получилось:

- (0) «Копенгагенское» (лучше: стандартное) понимание растворено в начальных главах и «дооформляется» в главе 10.
- (1) Из твердого следования логике уравнения Шрёдингера и полного доверия волновой функции как адекватному отображению мира вырастает многомировая интерпретация, обсуждаемая в главе 11.
- (2) В резком контрасте с ней — героический кьюбизм из главы 12, где волновая функция, а заодно и многое другое, оказывается всего лишь содержимым вашей головы.

(3) Классике жанра — квантовой механике де Бройля — Боме — посвящена глава 13; уроки в отношении скрытых параметров и нелокальности (извлеченные не сразу, но послужившие триггером для важного дальнейшего развития) обсуждаются в главе 14. (4) Последовательные/основательные истории в главе 19 — это «копенгаген с человеческим лицом» в виде набора правил для любого рассказчика историй «из жизни квантовых объектов»; соблюдение их избавляет от противоречий внутри сюжета, но сюжетов получается столько же, сколько рассказчиков. (5) А в главе 20 постулируется механизм, который, возможно, недопридуман в «копенгагене», — самопроизвольная локализация волновой функции как физический процесс; это, строго говоря, уже не совсем интерпретация квантовой механики, а, скорее, ее развитие в другую теорию. Объять необъятное невозможно: здесь совсем не обсуждаются относительные состояния и модальные интерпретации и лишь едва упомянут супердетерминизм.

Любая форма — это ограничение. Во-первых, объем книги решительно не позволил затронуть даже теоретические аспекты квантовых явлений в веществе и квантовой оптики, не говоря уже о захватывающих экспериментальных подробностях. Эти обширнейшие области, развивающиеся самым активным образом и, собственно, производящие те самые «чудеса без нарушения законов природы», представляют собой все выразительнее звучащую симфонию квантовой теории; на них приходится львиная доля всех ее приложений. Сюда относится, строго говоря, вся электроника, а также фотоника, практическая квантовая криптография и многое другое. Одни только названия разнообразных эффектов звучат сверхзавлекательно (например, «кристаллы времени», «квантовое обращение времени», «топологические изоляторы», «квантовый эффект Зенона», «квантовые радары»). Каждый из них заслуживает отдельного эссе, а поскольку время от времени появляются не менее завлекательные новые эффекты, эта книга никогда не была бы закончена; да и вообще это темы для другой,

куда менее «философской» книги. Я рассчитываю, однако, что их растущая актуальность разбудит и более «философский» интерес к тому, что лежит в основе как всех практических приложений квантовой теории, так и определяемых ею фундаментальных аспектов мироустройства.

Во-вторых, я полностью отдаю себе отчет, что и по поводу любого из затронутых в книге вопросов можно высказаться точнее и глубже, да и вообще сказать больше, в том числе добавив (иногда и правда занятные) исторические подробности. Если читатель захочет обратиться к другим источникам, чтобы в этом убедиться, моя задача будет выполнена.

Еще, пожалуй, стоит с достаточной определенностью высказаться по поводу недосказанностей квантовой механики, которые я здесь подробно обсуждаю. Самое несуразное, что можно заключить из их наличия, — это что существующая квантовая теория представляет собой конгломерат произвольных заявлений, каждое из которых можно по желанию заменить на какое-то другое. Ничего подобного. Математическая схема квантовой механики последовательна и лишена внутренних противоречий; она позволяет получать численные предсказания, которые подтверждаются опытными фактами. *Необходимости* в каких бы то ни было изменениях фундаментальных квантовых идей замечено не было, никаких указаний на это ниоткуда не поступает. *Возможности* их дополнения, как и их интерпретации в привычных нам терминах, обсуждаются, однако и они, при всем имеющемся разнообразии, далеки от «произвольных», и несколько конкурирующих идей сосуществуют тут до тех пор, пока это, опять же, позволяют логическая последовательность и согласие с опытом².

Попутно я бы предостерег от поверхностных аналогий и параллелей между квантовой механикой и далекими от нее областями. Прекрасно, если *методы* квантовой механики применимы где-то еще. Квантовая механика, однако, — это вполне конкретная схема, работающая по ясным правилам, и аналогия между

каким-то ее аспектом и явлением из другой сферы не означает, что эта последняя имеет в каком бы то ни было смысле квантовую природу. Да, настойчивый вопрос «Как ты ко мне относишься?» влияет на человеческие отношения вопрошающей и ответствующей сторон, и это обстоятельство может даже служить *метафорой* того факта из квантовой теории, что любое наблюдение представляет собой воздействие, — но не более чем метафорой. Кстати, в книге о квантовой механике без формул какие-то сравнения и метафоры неизбежны, и я прошу читателя не забывать, что любая метафора — не модель явления. Она в лучшем случае передает какую-то часть картины, а потому даже в качестве иллюстрации имеет ограниченное применение. После всех этих предупреждений можно наконец двинуться вперед!

Благодарности. Я благодарен многим, кто (в силу самых разнообразных причин и поводов) разными способами, в основном задавая вопросы или заставляя меня отвечать на незаданные вопросы, побуждал меня думать о том, что в итоге оказалось написанным, или/и о том, что я вычеркнул в последний момент. Среди прочих это Екатерина Абросимова, Михаил Аркадьев, Максим Гревцев, Александр Жаданов, Григорий Ковбасюк, Валентина Овчинникова, Алексей Сивухин, Руслан Смелянский, Янина Хужина, Алексей Шилов. Я также благодарю всех своих слушателей в разных аудиториях за внимание и вопросы, как и всех тех, кто при незапланированных встречах высказывал мне поддержку. В процессе написания мне сильно помогли критические отзывы об отдельных главах, которые я получал от Ирины Гарт, Андрея Когуня, Валентины Овчинниковой, Марии Попцовой, Ксении Семихатовой, Николая Семихатова, Аркадия Цейтлина, Олега Шейнкмана.

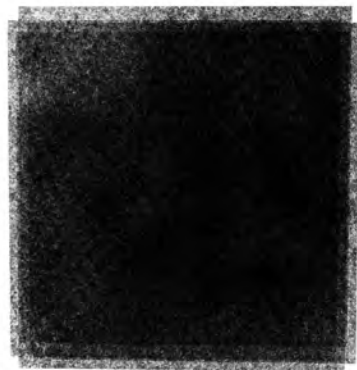
Лучшая шутка из всех, что я слышал за последние полгода (уж во всяком случае среди шуток в мой адрес), принадлежит Андрею Когуню: что я являюсь автором *локализации* терминов

Alice и *Bob*. Эта история тянется с моей предыдущей книги*, но «Аня» и «Яша» фигурируют и здесь тоже; пожалуй, я в немалой степени сроднился с ними, и мне приятно, что наше сотрудничество продолжается. И не только с ними. Неисчерпаемый потенциал помощи со стороны этих двух ассистентов в проведении мысленных экспериментов далеко превзойден тем вкладом, который внес в эту книгу ее редактор Петр Фаворов. Сделанные им многочисленные разноуровневые улучшения касаются и способа выражения, и смыслов, и все вместе с необычайной точностью способствуют поддержанию того духа книги, который я с самого начала хотел воплотить, но сталкивался с нехваткой выразительных средств. Неблагодарный труд научного редактирования взял на себя Алексей Цвелик; я обязан ему рядом поправок и несколькими очень точными дополнениями, сделанными согласно его предложениям там, где мое знание как раз заканчивалось; моей возросшей верой в себя благодаря его отклику на мои усилия и одновременно осознанием скромности этих усилий перед лицом неисчерпаемости такой темы, как *понимание* квантовой механики. Я благодарю Павла Подкосова и издательство «Альпина нон-фикшн» за смелое решение издать вторую мою книгу в течение двух лет — и до сих не знаю, подстроило ли издательство мою случайную встречу с Нюсей Красовицкой в дождливый осенний день на одном из мероприятий, куда я пришел по их просьбе. Эта встреча экспоненциально быстро превратилась в ее чудесное решение взяться за иллюстрации к этой книге, невзирая на мои уверения, что сам предмет начисто лишен наглядного представления. Последовавшие затем отчаянные обсуждения несуществующих

* Семихатов А. Всё, что движется: Прогулки по беспокойной Вселенной. От космических орбит до квантовых полей. — М.: Альпина нон-фикшн, 2023, ISBN 978–5–00139–749–6. Я пользуюсь случаем поблагодарить читателей за внимание, вопросы и присланные исправления; на глупую оплошность в формулировке закона Кеплера в первом тираже раньше всех мне указал Сергей Мамон, а небольшую «прогулку по печаткам» предпринял Ян Партс.

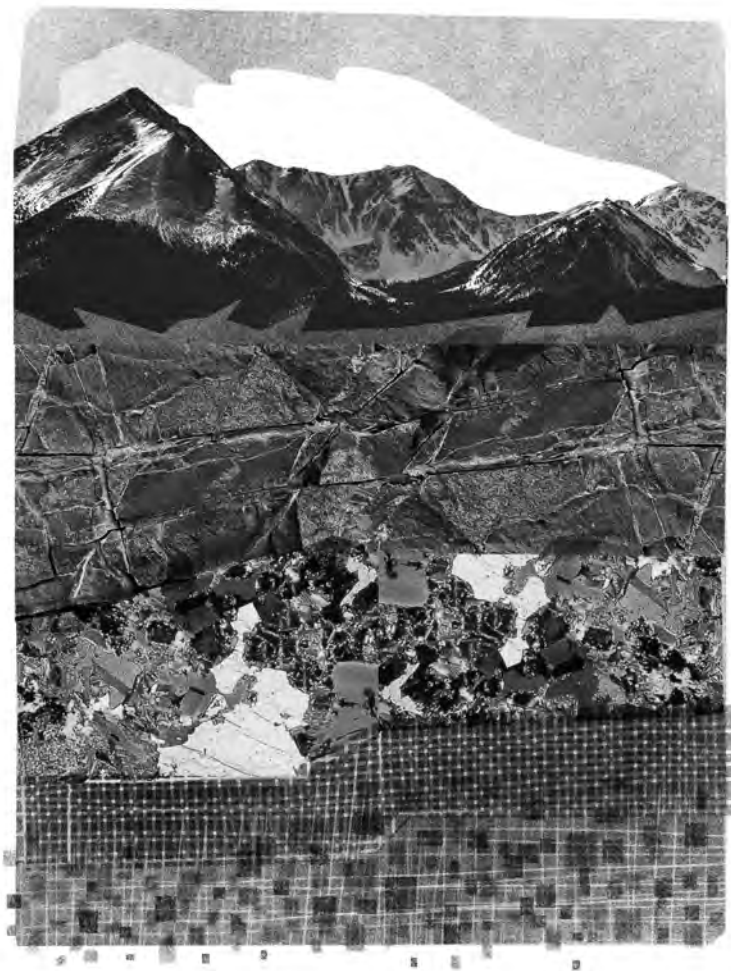
образов должны были причинять ей нескончаемые мучения, а меня заставляли высказываться более емко и определенно, что в итоге нашло свое отражение и в тексте; поэтому получилось так, что иллюстрации в этой книге — больше, чем просто визуальные метафоры. Вот и первая — приглашающая читателя к необычному.

Квантовые объекты
вообще никак
не выглядят.



1

Что внутри:
от вещей
к атомам



В глубине обычных вещей — непредставимые
объекты, существующие по своим правилам.

Вопрос о том, из чего сделаны вещи, иногда происходит из необходимости, например, если предмет требуется починить или как-то улучшить, но чаще — из любопытства. На первый взгляд все довольно просто: джинсы «сделаны из» ткани и ниток с добавлением, если угодно, заклепок, пуговиц и молний. Ткань, в свою очередь, сделана из нитей, причем ключевую роль здесь играет способ, каким эти нити организованы. Уже в XVII в. голландские ремесленники и купцы контролировали качество ткани, используя увеличительные стекла, постепенно превратившиеся в микроскоп. Выросший в этой среде ван Левенгук решил использовать микроскоп не для дела, а для удовлетворения любопытства, заинтересовавшись еще более мелкими деталями внутреннего строения вещей. В течение 1670–1680 гг. эти действия привели к череде открытий, среди которых инфузории, чешуйки кожи и сперматозоиды, а микроскоп вслед за тем надолго стал важнейшим средством, позволяющим углубиться в структуру вещей. Одно из моих детских воспоминаний — микроскоп у нас дома и загадочные разноцветные картинки каменных срезов — шлифов, которые изучала моя мама и на которые время от времени мне удавалось взглянуть. Каждая такая картинка сама по себе ничем не напоминала камень, но несла в себе информацию о его структуре и даже происхождении. Погружение в глубину вещей «объясняло» эти вещи — в данном случае горные породы — как определенную комбинацию нескольких более примитивных блоков, а именно минералов. Вопрос следующего уровня — из чего состоят сами минералы — был уже предметом не петрографии («науки о камнях»), а химии («науки о составе всего»). Путешествие еще на несколько уровней «вниз» и является предметом этой книги — в первую очередь в отношении того, какие правила там действуют и как эти правила определяют условия *сборки* элементов, которые в конце концов складываются во все, что нас окружает.

Еще в первой половине XIX в. о структуре материи стало постепенно известно примерно следующее. У каждого вещества

(чистого, т.е. не являющегося смесью) имеется наименьшая часть — атом или молекула. Молекулы же построены как комбинации нескольких атомов — элементов, меньше которых уже ничего нет. В химических реакциях одни молекулы разрушаются, а другие образуются, и происходит это именно за счет перераспределения атомов между ними.

Сейчас мы узнаём это в школе, часто не вполне осознавая, что уже здесь намечается разрыв с привычной реальностью. Дело в том, что этих атомов и молекул не видно ни в один микроскоп в обычном понимании этого слова. И возникли они в науке XIX в. не как элементы физической реальности, а как «средство бухгалтерского учета» в химических реакциях — как вычислительный прием, позволяющий определить, какое количество одного вещества полностью прореагирует с заданным количеством другого вещества. В этом самом месте мы впервые встречаемся с мотивом, который, с некоторыми вариациями, прозвучит для нас еще не раз. Этим атомам, которые использовались для подсчета баланса в химических реакциях, *не назначалось никаких других свойств*, кроме способности вступать в комбинации друг с другом, составляя тем самым различные молекулы. Это и правда было средством учета, почти как разбиение доходов и расходов по статьям. В таком теоретическом качестве идея атомов отлично работала, но совершенно правомочно звучал вопрос: а существуют ли они? Не слишком ли самоуверенно думать, что раз мы нашли удобную вычислительную схему для определения правильных количеств веществ в химических реакциях и успешно оперируем ею на бумаге, то в природе, видите ли, на полном серьезе обнаружатся элементы этой схемы?

Скепсис (который, надо сказать, является одним из составляющих науки) набрал немалую силу в отношении атомов на рубеже XIX и XX вв., и *реальность* этих конструктов многим (включая и Менделеева — первооткрывателя Периодического закона) представлялась тогда далеко не очевидной. Дополнительный аргумент скептиков состоял в том, что атомы, как считалось, *принци-*

ниально ненаблюдаемы. Спрашивается, следует ли полагаться на «реальное» существование объектов, реальность которых едва ли можно проверить?

Увидеть атом и правда нельзя, причем не из-за свойств нашего зрения, а в силу определения того, что значит «увидеть». Дело в том, что различить с помощью света можно только те подробности, которые по размеру больше (а лучше — заметно больше), чем длина световой волны. А у видимого света, даже если он фиолетовый, т.е. наиболее коротковолновый, длина волны такая, что на ней укладывается пара тысяч атомов. Попробуйте-ка разглядеть одну букву в слове, если самое мелкое, что можно увидеть, — слово из тысячи букв! (Красивые изображения атомов, которыми нередко иллюстрируются научные достижения, — например, атомы, уложенные регулярными рядами, — это результаты компьютерной обработки данных, которые получены довольно хитрыми, непрямыми способами и сами по себе фотографии не являются; обычно это восстановленная по некоторым косвенным измерениям усредненная электронная плотность.) В общем, я предлагаю начинать привыкать к тому, что атом никак не выглядит.

Принято воздавать должное атомистической концепции, уходящей корнями в Античность. Да, порой интересно искать в прошлом предшественников дорогих нам существенно более поздних идей, но, действуя так, мы часто переносим на те ранние догадки и предположения хотя бы часть того, что нам сейчас известно про обсуждаемую концепцию. И заодно мы склонны забывать, что эти первоначальные идеи конкурировали тогда с другими, часто противоположными воззрениями, а сигналов из будущего насчет предпочтения одних перед другими не поступало. Предсказал ли атомы в V в. до н.э. Демокрит, высказавший идею о существовании пустоты и неделимых атомов, исходя при этом из вполне философского беспокойства по поводу бесконечной делимости материи? Произвольно сделанное предположение, пусть даже ставшее фундаментом философской системы, можно

с легкостью «опровергнуть», высказав другое равно произвольное предположение и выстроив на его основе другую философскую систему. В точности так и поступил с атомами Аристотель (ок. 330 г. до н.э.), высказав противоположную идею непрерывности и заодно разделившись с пустотой (которой, по его известному мнению, природа не терпит).

Серьезная же дискуссия о реальности атомов, с опорой на опыт в комбинации с существенно более развитыми теоретическими методами, пришла к своему завершению после 1908 г. Скепсис начала 20-го века оказался преодолен благодаря экспериментам, в которых был остроумно задействован «посредник» — мелкая частичка, брошенная в жидкость. От нее требовалось быть настолько мелкой, чтобы случайным образом дергаться в жидкости под действием «пинков», которые сообщают ей непрерывно движущиеся молекулы, но при этом достаточно крупной, чтобы (в отличие от самих молекул и атомов) ее можно было разглядеть в микроскоп. Оказалось, что характер видимого движения такой частички действительно определяется «пинками» со стороны предполагаемых невидимых агентов и, более того, отражает некоторые свойства этих агентов, например их массу и характерный размер, — в полном согласии с тем, что получалось, если считать эти агенты молекулами. Что же более основательно доказывает физическое, а не номенклатурное существование каких-либо объектов, как не удары, получаемые с их стороны? Атомы прочно и уже безвозвратно прописались в наших взглядах на мир.

Но победа передового атомизма во всемирном масштабе не обошлась, как это случается в подобных ситуациях, без перегибов. Вольно или невольно мысль склонялась к тому, что раз атомы пихаются как маленькие мячики, то, наверное, они и представляют собой что-то похожее на мячики, только *очень* маленькие. Но «мячики, только очень маленькие» оставляют больше вопросов, чем дают ответов. Например, как представлять себе их поверхность: из чего она *сделана*? Если снова затянуть ту же песню — сделана, мол, из еще более мелких штучек, — то и правда пора

обращаться к Демокриту за моральной поддержкой против дурного деления материи на всё более мелкие части. Однако инерция мышления сильна и в несчетном числе рассказов об устройстве атомного мира продолжали существовать маленькие шарики.

Желание видеть внутреннее устройство вещей как миниатюризацию чего-то привычного было все еще заметно в модели атома, которая появилась в 1913 г. В ней атом уподоблялся планетной системе с электронами вместо планет и ядром вместо звезды, но на орбиты накладывались жесткие условия, из-за которых оказывались возможными лишь отдельные, «избранные» орбиты. Эта модель была прогрессивной для того момента, она принесла Нобелевскую премию ее автору, Бору, но и пользу в качестве важного шага к разрыву с классической картиной мира, но это неправильная модель. Тем не менее аналогия с «понятным» устройством вещей сделала ее, по существу, мемом, хотя после появления настоящей квантовой механики сам автор модели, Бор, сталкиваясь с апелляциями к ней, вопрошал: «Они что, никогда не слышали про квантовую механику?» При случае стоит спросить себя, каким же образом несколько орбит превращают крохотный объем пространства во что-то, похожее не на диск, а на шар? И как, собственно, организовать атом, одинаковый по всем направлениям, исходящим из его центра, в простейшем случае, когда там имеется всего один электрон? (Солнечную систему с одним только Меркурием сложно назвать шарообразной.)

С электронами мы слегка забежали вперед, и сейчас это исправим. К моменту победы атомизма действительно никто уже не воспринимал атомы как нечто неделимое: стало понятно, что в них содержатся носители отрицательного электрического заряда, которые при определенных условиях могут оттуда уходить. Это электроны, намеки на существование которых появлялись уже с середины XIX в., но которые были «официально» открыты в 1897 г. именно как агенты, проявляющие себя вне атома, но происходящие из атомов. И вот электроны-то, кстати сказать, — неделимые (по самым современным представлениям). В годы,

предшествовавшие их открытию, когда о чем-то подобном высказывались еще только догадки и предположения, говорили об «атомах электричества»¹. Кто знает, если бы последовательность событий в истории науки оказалась несколько иной, электроны тоже сначала могли бы восприниматься не в физическом, а в «бухгалтерском» смысле — как средство учета электрических зарядов. Но, как бы то ни было, вполне физическое существование электрона зафиксировал Дж. Дж. Томсон, подведя итог нескольким десятилетиям исследования явлений, которые исторически были известны как «катодные лучи» и «бета-лучи» (а в действительности являются не чем иным, как потоками электронов, испускаемыми в различных физических ситуациях).

Электроны, как и атомы, *никак не выглядят*, а все, что нам удается видеть, — это следы, оставленные ими в нашем макроскопическом мире: таковы и трек в пузырьковой камере, и светящийся пиксель на экране телевизора XX в. Весь свет, который отражается от письменного стола, за которым я сейчас сижу, исходит из атомов, а точнее, испускается электронами в этих атомах — но не может ничего сообщить о том, как атом или электрон выглядят. Когда самая малая порция света попадает в атом, она взаимодействует там с электроном, отдавая ему свою энергию. И наоборот, электрон, получивший лишнюю энергию, может ее отдать, излучив свет. Но этот свет несет информацию не о том, как что-то выглядит, а о правилах жизни электронов внутри атомов. Сейчас эти правила следуют из квантовой теории — предмета всех последующих глав; угаданы же они были во многом благодаря изучению света, происходящего из атомов.

Во избежание недопонимания стоит сразу оговориться, что атомы, лишённые чего бы то ни было похожего на «твёрдую поверхность», имеют тем не менее характерный размер. Как бы ни был атом устроен, влияние всего того, что в нем находится, не простирается бесконечно. Эпитет «характерный» в применении к размеру атома надо понимать как «типичный и приблизительный». Если оценивать этот размер различными (по необходимости непря-

мыми) способами, то получающиеся значения могут различаться, но не слишком сильно; слово «характерный» не предполагает абсолютно точного совпадения. Характерный размер атома — десятая доля нанометра, или 1 ангстрем, или 10^{-8} см (это можно разными способами уточнять для атомов различных видов, но отличия не очень значительны). Это и правда не слишком много: «нано» довольно прочно ассоциируется с малым, а это еще меньше.

То, что происходит внутри атома, и, собственно, само его существование оказалось невозможно описать в рамках законов природы, известных к началу XX в., несмотря на все успехи, достигнутые на их основе. Сформулированные новые законы природы составили квантовую механику — которая уже почти сто лет удивляет своей эффективностью и одновременно заметной необычностью своего устройства.

