

Предисловие

Альберт Эйнштейн, который во многих отношениях был отцом квантовой механики, имел с ней характерные отношения любви-ненависти. Его полемика с Нильсом Бором — Бор полностью принимал квантовую механику, а Эйнштейн относился к ней крайне скептически — хорошо известна в истории науки. Общепринятое мнение среди большинства физиков состоит в том, что Бор победил, а Эйнштейн проиграл. На мой взгляд, и, я думаю, это мнение разделяет растущее число физиков, такая оценка несправедлива в отношении взглядов Эйнштейна.

Бор и Эйнштейн оба были очень глубокими мыслителями. Эйнштейн изо всех сил стремился показать, что квантовая механика внутренне противоречива; Бор, однако, всегда находил возражения на его аргументы. Но в своей последней атаке Эйнштейн указал на нечто столь глубокое, столь контринтуитивное, столь тревожащее и в то же время столь возбуждающее, что в начале XXI века эта идея вновь вдохновляет физиков-

теоретиков. Единственным ответом Бора на последнее великое открытие Эйнштейна — открытие квантовомеханической запутанности — было его игнорирование.

Явление запутанности — это ключевой факт квантовой механики, факт, который делает ее столь отличной от классической физики. Благодаря ему под вопросом оказалось все наше понимание того, что в физическом мире является реальным. Согласно обыденному интуитивному представлению о физических системах, если мы всё знаем о системе, то есть всё, что в принципе о ней можно знать, то мы знаем также всё о ее частях. Если мы располагаем полным знанием об автомобиле, то знаем всё о его колесах, двигателе, коробке передач — вплоть до последнего винтика, удерживающего обивку. Будет абсурдом, если механик скажет: «Я знаю всё о вашем автомобиле, но, к сожалению, я ничего не могу сказать о его деталях».

Но ведь именно это Эйнштейн объяснял Бору: в квантовой механике можно знать всё о системе и ничего о ее отдельных частях, однако Бор не смог признать этот факт, который также игнорировался в нескольких поколениях учебников по квантовой физике.

Все знают, что квантовая механика странная, но я подозреваю, что лишь очень немногие могут сказать, в каком именно смысле. Формально это книга является курсом лекций по квантовой механике, но она отличается от большинства курсов и учебников. Она концентрируется на логических принципах квантовой

теории и ставит целью не скрыть глубочайшую странность квантовой логики, а вытащить ее на дневной свет.

Я хочу напомнить, что эта книга — одна из нескольких, тесно связанных с серией моих онлайн-лекционных курсов под названием «Теоретический минимум». Мой соавтор Арт Фридман был слушателем этих курсов. Книга много приобрела благодаря тому, что Арт находился в процессе изучения ее предмета и потому был очень чувствителен к вопросам, которые могут смутить начинающего. Процесс написания доставил нам массу удовольствия, и мы пытались отчасти передать эту атмосферу с помощью юмора. Если он вам не понравится, просто игнорируйте его.

Леонард Сасскинд

Когда я получил в Стэнфорде диплом по информатике, то не догадывался, что спустя годы вернусь сюда слушать лекции Леонарда по физике. Моя короткая «карьера» в физике завершилась много лет назад, когда я получил степень бакалавра. Однако у меня сохранялся живой интерес к предмету.

И, похоже, я оказался в большой компании — в мире полно людей, кто искренне и глубоко интересуется физикой, хотя жизнь увела их в другом направлении. Эта книга предназначена для всех нас.

До некоторой степени квантовую механику можно оценить на чисто качественном уровне. Однако для того чтобы вполне насладиться ее красотой, нужна мате-

матика. Мы постарались сделать основную часть этой замечательной книги полностью ясной для математически грамотного человека, не имеющего подготовки в области физики. Я считаю, что мы сделали очень хорошую работу, и надеюсь, что вы с этим согласитесь.

Никто не может выполнить такого масштаба проект в одиночку. Сотрудники *Brockman, Inc.* значительно упростили коммерческие аспекты, производственный отдел *Perseus Books* был бесподобен. Хочу выразить искреннюю благодарность Т. Дж. Келлехеру, Рейчел Кинг и Тисси Такаджи. Нам также повезло работать с прекрасным литературным редактором Джоном Сёрци.

Я признателен другим студентам Леонарда, продолжающим учиться у него, за то, что они постоянно поднимают глубокие провокативные вопросы, и за множество вдохновляющих разговоров после занятий. Роб Колуелл, Тодд Крэйг, Монти Фрост и Джон Нэш сделали к рукописи конструктивные замечания. Джереми Брэнском и Расс Брайан подробно проверили весь текст и обнаружили множество проблем.

Я благодарен семье и друзьям за поддержку и энтузиазм, в особенности моей дочери Ханне за заботу о повседневных делах.

Помимо любви, поддержки, понимания и чувства юмора моя замечательная жена Маргарет Слоун приложила руку к трети всех рисунков, включая обе картинки пивной «Гильбертс Плэйс». Спасибо, Мэгги.

Предисловие

В начале работы Леонард, чувствуя силу моей мотивации, отметил, что один из лучших способов изучить физику — писать о ней. Это правда, но я даже не догадывался, до какой степени, и благодарен за то, что получил шанс это узнать. Огромное спасибо, Леонард.

Арт Фридман

Пролог

Арт взглянул поверх своего пива и сказал:

— Ленни, а не сыграть ли нам партию в игру про Эйнштейна — Бора?

— О'кей, но мне надоело проигрывать. В этот раз ты будешь Артштейном, а я — Эль-Бором. И ты начинаешь.

— Справедливо. Мой первый ход: Бог не играет в кости. Ха-ха, Эль-Бор, одно очко в мою пользу.

— Не так быстро Артштейн, не так быстро. Вы, мой друг, были первым, кто отметил, что квантовая теория принципиально вероятностная. Ай-яй-яй, это двухочковый ход!

— Хорошо, я беру ход назад.

— Так нельзя.

— Можно.

— Нельзя.

Немногие знают, что Эйнштейн в своей статье «О квантовой теории излучения», опубликованной в 1917 году, доказывает, что гамма-излучение подчиняется статистическому закону.

Профессор и лоботряс идут в бар

В *первом томе* я приводил короткие диалоги между Ленни и Джорджем, выдуманными персонажами, отдаленно напоминающими двух героев Джона Стейнбека. В этом томе «Теоретического минимума» я вдохновлялся рассказами Дэймона Раниона¹. В его мире полно плутов, аферистов, идиотов, манипуляторов и добряков. И еще есть немного обычных людей, живущих одним днем. Действие разворачивается в питейном заведении «Гильбертс Плэйс».

Отправившись прогуляться, Ленни и Арт, двое простаков из Калифорнии, отстали от своего экскурсионного автобуса. Пожелаем им удачи. Она им пригодится.

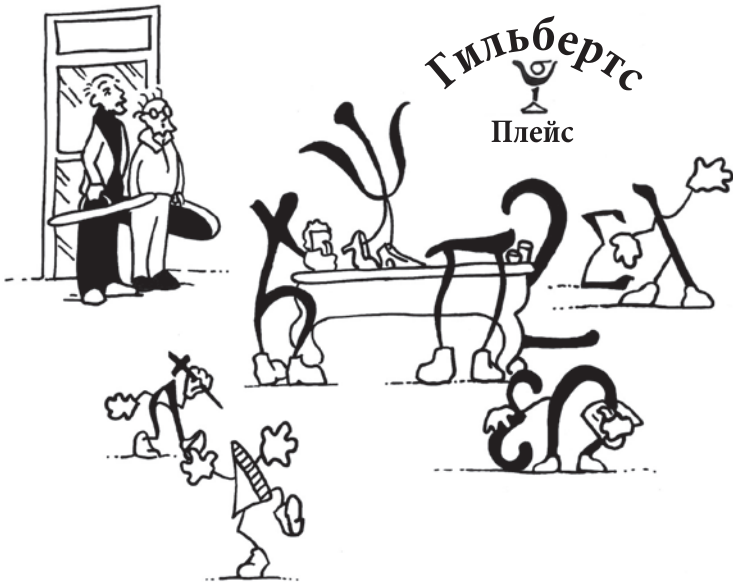
Что вам понадобится

Вам не нужно быть физиком, чтобы отправиться в это путешествие, но вам потребуются базовые знания ма-

¹ Альфред Дэймон Ранион (1880–1946) — американский писатель и журналист. Наибольшую известность ему принесла серия рассказов, описывающая мир нью-йоркского Бродвея эпохи сухого закона. — *Примеч. пер.*

тематического анализа и линейной алгебры. Также необходимо знать кое-что о вопросах, которые рассматривались в *томе I*. Нестрашно, если ваши математические знания несколько подзабылись. Многие из них мы напомним и поясним по ходу дела, в особенности то, что касается линейной алгебры. В *томе I* изложены основные идеи анализа.

И пусть наш беззаботный юмор не создает у вас впечатления, будто мы пишем для балбесов. Вовсе нет. Наша цель в том, чтобы сделать сложный предмет «настолько простым, насколько это возможно, но не проще того», и мы надеемся немного повеселиться в пути. Увидимся в «Гильбертс Плейс».



Введение

Классическая механика интуитивна; предметы движутся предсказуемым образом. Опытному игроку достаточно на мгновение увидеть летящий мяч, чтобы переместиться, куда нужно, и поймать его. Конечно, внезапный порыв ветра может его обмануть, но лишь потому, что он не принял во внимание все переменные. Есть очевидная причина, делающая классическую механику интуитивной: она ежедневно и многократно используется людьми для выживания, а до них использовалась животными. Но до XX века никто и никогда не использовал квантовую механику. Квантовая механика описывает вещи столь малые, что они полностью выпадают из области действия человеческих органов чувств. Так что следует заключить, что эволюция не выработала у нас интуиции квантового мира. Единственный способ понять ее — перекрыть нашу интуицию абстрактной математикой. К счастью, по неким странным причинам, мы выработали способность к такому перекрытию.

Обычно мы сначала изучаем классическую механику, а затем подступаемся к квантовой. Однако квантовая физика намного фундаментальнее классической. Насколько нам известно, квантовая физика дает точное описание всех физических систем, но некоторые предметы достаточно массивны, чтобы вместо квантовой механики можно было с хорошей точностью использовать классическую. Аппроксимация — это все, что представляет собой классическая механика. С логической точки зрения мы должны были бы сначала изучать квантовую механику, но очень немногие учителя физики рекомендуют так поступать. Даже этот курс лекций — «Теоретический минимум» — начинается с классической механики. Тем не менее классическая механика не будет играть почти никакой роли в этом курсе лекций по квантовой теории, за исключением самого конца курса, когда все основные принципы квантовой механики уже будут объяснены. Я считаю, что это по-настоящему правильный способ изучения — не только логически, но и педагогически. На этом пути мы не попадаем в ловушку, где кажется, что квантовая механика — это, по сути, та же классическая механика с добавлением пары новых трюков. Между прочим, технически квантовая механика намного проще классической.

Простейшая классическая система — это базовый логический элемент современной информатики: система с двумя состояниями. Иногда мы называем ее

битом. Она может представлять собой нечто, способное находиться только в двух состояниях: монету, которая может лежать орлом или решкой, тумблер, который может быть включен или выключен, крошечный магнитик, который может быть сориентирован на север или на юг. Как вы могли ожидать, особенно если знакомились с лекциями *тома I*, теория классических систем с двумя состояниями предельно проста, на самом деле даже скучна. В этом томе мы начнем с квантовой версии системы с двумя состояниями, называемой *кубитом*, которая гораздо интереснее. Для ее понимания нам понадобится совершенно новый способ мышления — новый фундамент логики.