

Глава 1

Введение

Полвека назад, когда автор был немножко моложе, чем сейчас, и хуже знал различные науки, он тем не менее науками интересовался. Особенно физикой. Среди вещей, которые я не понимал тогда, но хотел понять, была теория относительности. Не будучи ещё готовым изучать этот предмет по соответствующему тому Ландау и Лифшица, я должен был искать ответ в популярных книгах.

Первая книга, которую я прочитал на эту тему, была «Теория относительности для миллионов» Мартина Гарднера. Эта книга была адресована широкой ненаучной аудитории и не содержала ни единой формулы. Автор пытался объяснить основные релятивистские эффекты (замедление времени и парадокс близнецов, сокращение длин, эквивалентность между энергией и массой и т. д.) без формул, а только словами. Должен сказать, что в моем случае Гарднеру это не удалось. Я ничего не понял.

Однако вторая моя попытка была более успешной. Мне попала в руки «Азбука теории относительности» Клементы Дарелла¹. В этой книге были формулы. Они меня не слишком испугали, потому что к тому времени я уже прочитал школьный учебник математики и получил некоторое представление о том, что могут значить символы x , y и даже \sqrt{z} . Помимо корней в этой книге содержались ясные и педагогические объяснения, как упомянутые выше растяжение времени и сжатие расстояний могут быть выведены из двух эйнштейновских постулатов специальной теории относительности. И я это понял.

Позднее я прочитал много других хороших популярных статей и книг. Конечно, среди них были книги Перельмана: «Занимательная физика», «Занимательная математика», «Занимательная астрономия» и проч. Я вспоминаю статью Гелл-Манна «Восьмеричный путь» (про кварковую модель и классификацию «элементарных» частиц, играющую ту же роль, что таблица Менделеева для атомов).

¹ Оригинальное заглавие книги Дарелла — «Readable Relativity». Я использовал эту модель для английского заглавия книги.

Ещё позже я с интересом и удовольствием прочитал «Первые три минуты» Стивена Вайнберга про рождение Вселенной и про то, что случилось в первые три минуты её существования. В это время я был уже студентом-старшекурсником. Но книгу Вайнберга может читать и способный школьник, несмотря на (а я бы сказал — *благодаря*) наличию некоторых простых алгебраических соотношений.

Физика — это всё-таки точная наука. И слово *точная* значит, что она выражается на языке математики. И без математики физику понять нельзя.

Разумеется, существует математика разного уровня. Если говорить о специальной теории относительности, то её вполне можно достаточно хорошо постичь, не выходя за пределы элементарной алгебры с квадратными корнями. Чтобы *полностью* её понять (на несколько более высоком уровне, чем понимал её Эйнштейн в 1905 г., когда он писал свои знаменитые статьи), надо быть также знакомым с векторным и тензорным анализом и элементами теории групп.

Как читатель уже, наверное, догадался, в *этой* книге, посвящённой квантовой теории поля, формулы *будут* присутствовать. Более того, необходимый уровень знания математики в нашем случае существенно выше, чем тот, что нужен для постижения специальной теории относительности. Книга написана так, чтобы быть понятной неспециалистам, но она вряд ли будет доступна 12-летним школьникам, даже очень способным. Целевая аудитория моей книги — это люди, которые уже изучили физику на университетском уровне.

Собственно, в этом и состоял мой главный побудительный мотив к написанию этой книги. Я знаю много инженеров, математиков, химиков, физиков других специальностей, которые хотят узнать, что такое *квантовая хромодинамика*, или *Стандартная модель*, но которые не хотят или не могут потратить на это изрядное количество времени, необходимое, чтобы постичь эти науки на профессиональном уровне.

Первые две части книги (первые две перемены обеда, на который я вас приглашаю) написаны для них. Для их чтения необходимо владеть не только элементарной алгеброй, но также элементарным анализом и линейной алгеброй на уровне первых двух университетских курсов (обычные и частные производные, обычные и кратные интегралы, дифференциальные уравнения, матрицы). Необходимо также знать общую физику на уровне двух-трёх курсов университета. Я также предполагаю знание теории относительности и основ квантовой механики.

Лучший известный мне курс общей физики написан Фейнманом. Но вообще-то знакомство с «Фейнмановскими лекциями по физике» — достаточное, но не необходимое условие для чтения первых двух частей книги. Эти части написаны достаточно популярно. В некотором смысле начало книги даже *более* популярно, чем упоминавшаяся выше книга Дарелла по специальной теории относительности. В то время как человек, прочитавший книгу Дарелла, получает весьма ясное понимание предмета, мы не можем обещать того же человеку, который ограничит знакомство с нашей книгой двумя первыми её частями.

К сожалению, квантовая теория поля намного сложнее СТО, и знание стандартного университетского курса физики недостаточно, чтобы понять по-настоящему, что это такое. Во вводной части книги мы в основном ограничиваемся тем, что *анонсируем* результаты и даём там, где это возможно, эвристические объяснения. Но мы не *выводим* эти результаты строго.

По этому поводу можно сделать следующее общее замечание. Законы физики формулируются на математическом языке. Но между физикой и математикой есть существенная разница, и есть существенная разница между тем, как студент обычно изучает эти науки. Разные области математики хотя и связаны между собой, но эта связь не такая тесная. Эксперт по функциональному анализу может плохо знать теорию групп или теорию чисел, и наоборот. Теория групп и функциональный анализ — это разные логические системы, основанные на разных системах аксиом. Их можно изучать отдельно и независимо. Конечно, лучше, когда математик знает не одну только свою область, но и соседние. Широкая математическая культура даёт перспективу и помогает в работе. Она желательна. Но не обязательна.

Но в физике всё по-другому. У физика по сути дела всего один объект исследования — мир, в котором мы живём. Разные физические явления тесно связаны друг с другом, и их математические описания часто очень похожи. Одно и то же волновое уравнение $\square f = 0$ описывает свет, звук и морской прибой. Поэтому невозможно изучать физику раздел за разделом. Невозможно, например, изучить на достаточно высоком уровне оптику, не имея представления о механике (и в том числе о теоретической механике), об уравнениях Максвелла и проч.

Студента, изучающего физику, можно сравнить с деталью, обрабатываемой на токарном станке. Он приобретает нужную форму только после определённого числа сделанных оборотов.

В старших классах хорошей школы он делает первый оборот, получая поверхностное представление о всех областях физики. Он может теперь вычислить траекторию пушечного ядра и ёмкость конденсатора.

Второй оборот — это университетский курс общей физики. Студент, в частности, узнаёт там, что свет по своей природе — это электромагнитные волны, решение уравнений Максвелла для электромагнитного поля.

Третий оборот — это курс теорфизики.

Несколько подобных оборотов претерпит и наш читатель. Первый такой оборот — это вторая «закусочная» часть. В главах 3, 4 читатель увидит панорамную «аэросъёмку» Вселенной и узнает о разных типах фундаментальных взаимодействий. В главе 5 мы не спускаемся с облаков сильно вниз, но фокусируемся на главном предмете книги, квантовой теории поля, и даём поверхностное — в основном словесное — описание современных теорий трёх фундаментальных взаимодействий: электромагнитного, сильного и слабого.

Пятая глава — это последняя из наших закусок, и читатель, который почувствует, что он уже заморил червячка, не захочет больше тратить время на застолье и предпочтёт обратиться к более важным своим делам, может не читать всё остальное, кроме разве что части VI, *Нормандской паузы* нашего обеда¹, где нет формул и я рассказываю не о физике, а о физиках — Фейнмане, Ландау, Тер-Мартirosяне — и делюсь с терпеливым читателем некоторыми своими личными воспоминаниями.

Но если читатель захочет пройти второй оборот и узнать, как утверждения, сделанные в первых пяти главах, выводятся и доказываются, мы его приглашаем отведать четыре питательных блюда, поданные в четвёртой и пятой частях книги. В частности, главы 11 и 12 посвящены двум основным составным частям современной квантовой полевой теории (известной под неприятным именем «Стандартная модель»). В этих главах детально описываются теория сильных взаимодействий и объединённая теория электромагнитных и слабых взаимодействий.

¹ «Нормандская пауза» (*trou normand* по-французски, не путать с «нормандской четвёркой») — это специальное блюдо в традиционной праздничной французской трапезе — бокал кальвадоса или что-то подобное. Нормандская пауза позволяет пирующему переварить уже поглощённую пищу и приготовиться к десерту.

Однако чтобы понять эти главы, читатель должен расширить свои знания по математике, классической и квантовой механике. Вся необходимая дополнительная информация даётся в части «Кулинарные тайны».

Глава 6 — это очень краткий курс по теории групп. Даются сведения, необходимые для понимания математической формулировки полевых теорий, описанных в главах 10—12. Я также ввожу в этой математической главе понятие антикоммутирующих грассмановых чисел — они необходимы для описания фермионных полей, о которых мы рассказываем в главе 9.

В §7.1 я кратко описываю лагранжев и гамильтонов формализмы теоретической механики. Этот материал, вероятно, не нов для нашего читателя. Но в последующих параграфах главы 7 я рассказываю о применении методов теоретической механики к классической теории поля. Пожалуйста, посмотрите эти разделы: в стандартном университетском курсе эти вопросы обычно не затрагиваются.

Глава 8 посвящена теории рассеяния в квантовой механике и тому, как амплитуда упругого рассеяния может быть описана на языке диаграмм. Мы выводим диаграммное представление для *нерелятивистской* амплитуды вполне точно и строго (в релятивистском случае это будет не так).

Надо сказать, что, хотя части III—V нельзя назвать популярным чтением, в *некотором* смысле они популярны. Я попытался дать там только *минимальные* технические детали, необходимые для понимания смысла описываемых теорий на некотором уровне, но это ещё не профессиональный уровень! Например, в главе 10 мы будем обсуждать фейнмановские диаграммы. Я попытаюсь объяснить, откуда они берутся, какие аналитические выражения для амплитуд рассеяния им соответствуют. Но я не выведу строго правила Фейнмана для построения амплитуд и не научу читателя, как делать с их помощью точные вычисления. Я упомяну, но не буду объяснять по существу некоторые достаточно сложные теоретические вопросы (наподобие квантовых аномалий). Я познакомлю читателя с понятием фейнмановского интеграла по траекториям, но это знакомство будет поверхностным.

Студент, который захочет всё это узнать, должен обратиться к более серьёзным книгам, прежде всего к блестящей книге Энтони Зи «Квантовая теория поля в двух словах» (М., 2009). Она написана на уровне, близком к профессиональному, но с множеством наглядных

педагогических объяснений. Ну и есть, конечно, очень хороший современный учебник: «Введение в квантовую теорию поля» Пескина и Шрёдера.

В качестве «Десертов» я предлагаю отведать сладкие спекуляции. Глава 14 посвящена суперсимметрии. Суперсимметрия — это симметрия между бозонами (частицами с целым спином) и фермионами (у которых спин полуцелый). Мы не знаем сейчас, реализуется эта симметрия в природе или нет, т. е. мы знаем, что она не реализуется *точно*, — у известных нам бозонов и фермионов совершенно разные массы, но суперсимметрия может быть *приближённой* и она может проявляться только на глубинном уровне — на малых расстояниях и соответственно при больших энергиях. Мы приводим аргументы в пользу этой гипотезы в конце главы 12 и в главе 14. Но даже если в конечном счёте окажется, что наш мир ни в каком смысле не суперсимметричен, идея этой симметрии настолько красива, что я не смог удержаться от того, чтобы вставить её в эту книгу.

Основная тема книги — квантовая теория поля. Но есть одна теория поля, которая известна сегодня только в своей классической ипостаси и которая холодно отвергает все наши попытки её проквантовать. Я имею в виду *гравитацию*. Мы обсудим классическую теорию гравитации, *общую теорию относительности*, в главе 15.

Последняя глава посвящена загадке квантовой гравитации, теории струн (наиболее популярный сегодня кандидат на роль гипотетической Единой теории всего) и моим собственным еретическим идеям на этот счёт. Эта глава и в меньшей степени глава 14 сложнее остальных. Они адресованы возможному читателю, который уже изучил Стандартную модель достаточно хорошо — по нашей книге или по другим книгам — и хочет поразмыслить вместе с автором о том, какая ещё более фундаментальная теория лежит в её основе.

У нашей книги есть одна черта, которую я хотел бы отметить. Это частые перекрёстные ссылки в обоих направлениях — на предыдущие и на последующие её разделы. Эти ссылки необходимы. В самом деле, книга содержит довольно много материала, и нельзя ожидать, что читатель удержит в голове всё, что он узнал, читая главу 5, к тому времени, когда он приступит к изучению одиннадцатой и двенадцатой глав. Напоминание необходимо. А имея в виду, что многие читатели не будут удовлетворены эвристичным размахиванием рук в главах 4 и 5, мы даём там ссылки на последующие части



Рис. 1.1. Кладка кирпичей ёлочкой в куполе флорентийского собора

книги, где те же вопросы обсуждаются с большей строгостью и доказательностью.

Мы берём в этом смысле пример с великого архитектора XV века Филиппо Брунеллески, который в кладке величественного собора Санта Мария дель Фьоре во Флоренции клал кирпичи «ёлочкой», так что многие кирпичи располагались вертикально (см. рис. 1.1). Эти вертикальные кирпичи обеспечивали опору стенам купола и не давали им обрушиться во время постройки. Мы надеемся, что наши перекрёстные ссылки сыграют похожую роль.

1.1. Благодарности

Оригинальная версия этой книги написана по-английски. Английский язык для меня не родной; он достаточно хорош, чтобы писать научные статьи, но мои английские тексты более общего плана с неизбежностью изобилуют ошибками, раздражающими англоязычного читателя. «Моя такого не хотела» и поэтому я долго не принимался за написание этой книги (а идея написать подобную полупопулярную книгу существовала у меня давно). Быть может, эта книга так никогда и не была бы написана (по крайней мере, по-английски), если бы Хью Джонс, профессор Imperial College в Лондоне, не взял бы на себя роль добровольного редактора, не предложил бы мне откорректировать мой английский стиль во всей

книге! Проф. Джонс сделал также много весьма ценных замечаний по содержанию книги. Я ему чрезвычайно благодарен.

Я также благодарен Жан-Полю Блезю, Аркадию Вайнштейну, Андрею Варламову, Игорю Клебанову, Хайнриху Лютвилеру, Алексею Морозову, Анке Туреану, Масуду Чайчану и Михаилу Шапошникову, которым я показывал рукопись книги, за ценные замечания. Я благодарю Татьяну Елецкую, которая нарисовала рисунки 4.2 и 15.1, Альбану Смилга за сотворение Вселенной (см. рис. 16.7) и Олега Канчели, переславшего мне фото на рис. 13.4 из своего архива.