КОНСТАНТИН
ПАРФЕНОВ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

пособие
для абитуриентов
и первокурсников

ЗАКОНЫ ▸ ЗАДАЧИ ▸ РЕШЕНИЯ

БОМБОРА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
Москва

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение: методы, идеи и образы 5

I. Пространство и время **9**

От Евклида до Минковского. 11

ОТО, дополнительные измерения и суперпространства 28

Пространство и время в микромире. 39

II. Частицы, волны и кванты **45**

Меньше нанометра 47

Эра квантовых технолтогий. 76

Квантовая информатика 87

Математическое дополнение 1: Что такое комплексные числа? 91

Математическое дополнение 2: Возможные базисы и скалярное произведение 99

Квантовые компьютеры и квантовая криптография 112

III. Строение материи **123**

Поиск «первокирпичиков» и изучение фундаментальных взаимодействий 125

Взаимодействие, которого почти нет 135

Пустота или огонь? 144

Красота против Хаоса 158

Теории Великого Объединения: путь за пределы Стандартной Модели 171

Что нас ждет дальше? 182

IV. В поисках единой картины мира **193**

Теории Всего 201

Физика и Вселенная 206

Рождение, жизнь и смерть Вселенных. 220

Заключение. 232

ВВЕДЕНИЕ: МЕТОДЫ, ИДЕИ И ОБРАЗЫ

При установлении порядка появились имена. Когда возникли имена, возникла возможность ошибок. Чтобы избежать ошибок, нужно знать пределы употребления имен.

Лао Цзы, «Дао дэ Цзин»

Когда мы говорим о теоретической физике, то в первую очередь представляем себе ряды уравнений, понятных только специалистам. И это правильно: эта наука не бывает без формул, потому что они — ее смысл и основное содержание. Постановка любой теоретической задачи содержит формулы и числовые данные, результат ее решения записывается в виде формул и числовых ответов. Таким образом, операции с формулами — основной метод работы теоретической физики. Но физика не является «чистой» математикой — она должна описывать реальный мир и для этого использует экспериментальные данные. Результаты наблюдений и измерений не превращаются в формулы сами — эту работу выполняют теоретики.

Обычно все начинается с идеи, которая появляется в виде образа. Теоретик стремится перевести образ на язык формул, которые поначалу бывают довольно простыми. Так появляется гипотеза, и на ее базе строятся объяснения явлений. Если физики обнаружат, что гипотеза работает удачно, то подключатся другие теоретики и математики. Строится подходящий математический аппарат, формулируется система приближений, в рамках которых описание явлений сводится к решаемым математическим задачам, — так гипотеза становится моделью.

Главная практическая ценность модели — в способности не только объяснять известные факты, но и предсказывать неизвестное. Если нам удалось экспериментально проверить эти предсказания и они оказались правильными, то модель становится теорией — инструментом описания реального мира и основой для технологических применений науки. Из теорий складывается физическая картина мира. Как мы видим, она объединяет все наши идеи и результаты в сложную систему, для полного понимания которой нужно знать и экспериментальные данные, и математические формулы.

Например, в главе II мы познакомимся с идеей Макса Планка, что проблемы, возникшие у физиков в XIX веке с описанием излучения нагретых тел, можно решить, если допустить, что обмен энергией между веществом и излучением происходит определенными «порциями». Записав для величины этой порции совсем простую формулу, Планк сформулировал гипотезу кванта (собственно, именно так он и ввел термин «квант»).

Эту концепцию много критиковали, но она оказалась необычайно продуктивной. На ее базе с помощью простых вычислений удалось описать не только тепловое излучение, но и много других явлений, которые до этого не получалось «просчитать» даже в рамках сложных моделей.

Несколько позже Луи де Бройль пришел к идее, что молекулы, атомы, ядра и электроны, которые ранее считались «частицами», должны проявлять и волновые свойства. И он связал свою идею с той же гипотезой кванта, описав связь разных свойств еще одной простой формулой. И это еще увеличило продуктивность гипотезы.

Эрвин Шредингер и Вернер Гайзенберг вывели математические уравнения, описывающие квантовые объекты, а Макс Борн предложил интерпретацию этих уравнений, связывающую их со свойствами реального мира. Это позволило построить квантовую теорию, которая обладала замечательной способностью предсказывать результаты измерений. И теперь она стала основой многих современных технологий.

Но этим дело не кончилось. Теория направляет наши исследования мира, стимулирует развитие экспериментальных установок. Расширяя область знания, т.е. «список» исследованных явлений, мы «удлиняем» границу этой области — границу, на которой сталкиваемся с неведомым. Поэтому у нас появляются новые вопросы, ответы на которые наша теория уже не знает. И тогда нам нужны новые идеи, новые образы и так далее — до появления новой теории. Например, квантовая теория тоже сильно изменилась со времен Шредингера, Гайзенберга и Борна, особенно при описании элементарных частиц. Изменилась не только по используемой математике, но и по образам.

Итак, для описания явлений теоретическая физика на базе эмпирических данных строит гипотезы, модели и теории — начиная от простых, переходя к более сложным, но зато все более подробно описывающим наблюдаемый мир. Не претендуя на построение абсолютных истин, она строит цепочку «относительных истин», в которой каждая следующая точнее и дает нам больше возможностей для практической деятельности. Это бесконечный путь, в ходе которого формулы все время изменяются, становятся сложнее.

Можно ли «уследить» за развитием науки человеку, не знакомому с ее математическими методами? На мой взгляд, да. И эта книга — попытка дать читателю такую возможность. Для этого **мы** (автор и читатель) проследим за развитием набора образов и качественных представлений науки. Их изучение, конечно, не даст нам полного представления о содержании моделей и теорий — это невозможно без использования математики. Но такое изучение само по себе интересно, и, кроме того, оно подготовит нас к восприятию этого содержания (если мы решимся шагнуть дальше).

Мы видим цель — обсудить на качественном уровне систему представлений современной теоретической физики об окружающем мире. Только для ее достижения мы не сможем использовать язык математики, и потому главным нашим оружием будет воображение.

Пространство и время

I

В ЭТОЙ ГЛАВЕ

- **Что мы знаем о пространстве и времени из повседневного опыта?**
- **Геометрия Евклида.**
- **Связь физики и геометрии.**
- **Специальная теория относительности и геометрия Минковского.**

От Евклида до Минковского

Я все больше убеждаюсь, что необходимость нашей геометрии не может быть доказана, по крайней мере, человеческим рассудком... Геометрию нужно относить не к арифметике, а к механике.

Карл Фридрих Гаусс

Давайте вместе пойдем в страну теоретической физики. Начать этот путь лучше всего с изучения образов, на которых построены понятия *пространства* и *времени*. Ведь если мы внимательно проанализируем методы экспериментального исследования или теоретического описания физических явлений, то заметим, что в их основе лежат представления о пространстве и времени. Мы вообще не можем построить в своем сознании образ реальных событий, не используя характеристик «где» и «когда». Поэтому для понимания принципов физики нам необходимо разобраться, как она описывает взаимное расположение тел и последовательность событий.

К сожалению, методы такого описания довольно сложны: они используют самую современную математику. А для некоторых теорий

адекватный математический язык вообще находится в стадии разработки, и поэтому изучать их без формул невозможно.

Но мы постараемся добраться до сути нужных идей, оперируя в основном лишь образами, пусть даже нам придется эти образы упрощать, ведь эти идеи действительно заслуживают внимания благодаря своей необычности, красоте и эффективности. Для этого проследим (соблюдая либо логическую, либо историческую последовательность), как происходило развитие представлений о пространстве и времени.

Эпиграфом к этому разделу послужили слова Карла Фридриха Гаусса, которого в XIX веке называли «королем математики». Как видим, ему уже тогда было ясно, что именно физика должна выбрать ту геометрию, которую необходимо использовать для описания реального мира. Но он так и не решился опубликовать многие свои труды по неевклидовым геометриям, поскольку справедливость существовавших до него представлений казалась очевидной. Этот пример указывает нам, как трудно человеку в рассуждениях о таких вещах, как пространство и время, выйти за пределы свидетельств своего повседневного опыта. Трудно, но вместе с тем необходимо. Постараемся и мы в наших рассуждениях помнить об этом.

В первую очередь ответим на вопрос: откуда вообще нам известно о существовании пространства и времени? Разумеется, из опыта. Более того, эти понятия возникли в результате осмысления самых первых шагов нашего изучения окружающего мира. Еще до рождения у нас формируется поисково-ориентировочный рефлекс, основанный на *ощущении* протяженности и изменчивости предметов окружающего мира. При формировании нашего мышления на смену ощущениям приходит логика, которая приводит нас к понятиям *расстояния, направления* и *временного интервала*. В результате эти понятия вплетены в «конструкцию» человеческого мышления.

Иммануил Кант называл представления о пространстве и времени «очками», через которые человек смотрит на мир и не может их снять. Когда мы начинаем практическую деятельность, нам необходимо измерять расстояния, углы и временные интервалы. Для этого

Рис. 1. Метод декартовых координат использует уравнения для описания разных типов фигур

потребовалось определить *эталоны* (единицы измерения), которые мы считаем неизменными.

Первые эталоны длины связывались у разных народов с типичными размерами частей человеческого тела, а в качестве эталонных временных интервалов рассматривались периоды астрономических процессов (год, сутки и т.д.). Сейчас в качестве стандартов используются периоды атомных процессов. Это позволило улучшить точность, но сама суть измерения как сравнения с эталоном осталась неизменной.

На базе этих измерений и были сформированы «обычные» представления о пространстве и времени. Давайте внимательно разберем их свойства, установленные в нашем повседневном опыте.

Для описания свойств пространства была создана специальная наука — геометрия. Еще до нашей эры древнегреческий математик Евклид сформулировал систему *аксиом геометрии*, которая обобщала данные этого опыта. Именно *евклидова геометрия* в течение более двух тысяч лет рассматривалась науками — в том числе и физикой — как эталон строгости и последовательности.

Позже Рене Декарт предложил метод ***координат***, который позволил описывать геометрические объекты с помощью чисел и формул (рис. 1).

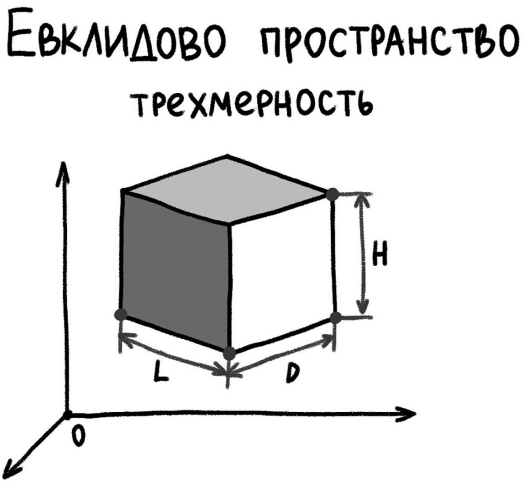

Рис. 2. Представления о пространстве с точки зрения евклидовой геометрии

И сегодня в школе изучают декартовы координаты и записывают с их помощью уравнения для прямых, окружностей, гипербол и других кривых. Даже если мы не собираемся использовать эти формулы, важно отметить для себя эту замечательную идею. Как мы увидим, существуют теории, в которых аналитическое описание работает даже тогда, когда нашего воображения уже не хватает для построения соответствующего геометрического образа.

Давайте разберем свойства пространства, которое соответствует аксиомам Евклида. Мы в дальнейшем будем назвать его *евклидовым пространством* (рис. 2). Отметим, что сейчас термин «геометрия» обозначает не только науку, изучающую свойства разных пространств, связанные с измерением расстояний и углов, но и саму совокупность этих свойств. Поэтому мы можем сказать, что сейчас приступаем к описанию *евклидовой геометрии*.

Аксиомы Евклида позволяют ввести понятие прямой и научиться строить перпендикулярные прямые. После этого мы установим, что наше пространство — *трехмерное*: через заданную точку можно провести не более трех взаимно перпендикулярных прямых. Или,