

# БОЗОН ХИГГСА

От научной идеи до открытия «частицы Бога»

**Джим Бэгготт**

ПРЕДИСЛОВИЕ СТИВЕНА ВАЙНБЕРГА, ЛАУРЕАТА  
НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ

Джим Бэгготт

**Бозон Хиггса. От научной идеи  
до открытия «частицы Бога»**

«Центрполиграф»

2012

**Бэгготт Д.**

Бозон Хиггса. От научной идеи до открытия «частицы Бога» /  
Д. Бэгготт — «Центрполиграф», 2012

Джим Бэгготт, ученый, писатель, популяризатор науки, в своей книге подробно рассматривает процесс предсказания и открытия новой частицы – бозона Хиггса, попутно освещая такие вопросы фундаментальной физики, как строение материи, происхождение массы и энергии. Автор объясняет, что важность открытия частицы заключается еще и в том, что оно доказывает существование поля Хиггса, благодаря которому безмассовые частицы приобретают массу, что является необходимым условием для возникновения материи. Из книги вы узнаете о развитии физических теорий, начиная с античного понятия об атоме, и техническом прогрессе, позволившем их осуществить, а также историю обнаружения элементарных частиц.

# Содержание

От автора	6
Предисловие	8
Пролог	12
Часть первая	21
1	21
Конец ознакомительного фрагмента.	22

**Джим Бэгготт**  
**Бозон Хиггса. От научной идеи**  
**до открытия «частицы Бога»**

*Посвящается Эндж*

Jim Baggott

**Higgs**

The Invention and Discovery of the «God Particle»

«HIGGS: THE INVENTATION AND DISCOVERY OF THE 'GOD PARTICLE', FIRST EDITION»

Was originally published in English in 2012.

This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

Copyright © Jim Baggott 2012

## От автора

4 июля 2012 года мгновенно, словно чрезвычайно заразный электронный вирус, по всему миру распространилось известие о том, что в женеvском ЦЕРНе открыли нечто весьма напоминающее бозон Хиггса. Все заголовки кричали о новом триумфе физики высоких энергий. Открытие попало в газетные передовицы и вечерние выпуски новостей, о нем услышали миллиарды. Наконец-то, спустя 48 лет после того, как частица была впервые предположена или предсказана в 1964 году, ценой миллиардов долларов найдены признаки ее существования.

Из-за чего же поднялся такой шум? Что это за такая важная птица – бозон Хиггса? Если новая частица действительно тот самый бозон Хиггса, то что ее открытие говорит нам о материальном мире и ранней эволюции Вселенной? Стоила ли находка всех затраченных усилий?

Ответы на эти вопросы дает история так называемой Стандартной модели физики элементарных частиц. Как следует из ее названия, это теоретическая конструкция, при помощи которой физики описывают составные элементы материи и силы, которые удерживают ее или заставляют распадаться. Эта теория создавалась долгими десятилетиями тяжелейшего труда и представляет собой итог попыток интерпретировать окружающий нас физический мир.

Однако Стандартная модель – это еще не «теория всего». Она не учитывает гравитацию. В последние годы в физике появились новые экзотические теории, стремящиеся объединить в себе все фундаментальные взаимодействия, в том числе и гравитационное. Это, например, теории суперсимметрии и суперструн. Несмотря на усилия сотен занимающихся ими ученых-теоретиков, эти новые теории остаются чисто умозрительными и мало подтверждены, если подтверждены вообще, экспериментальными данными. Даже при своих недостатках, выявившихся с момента рождения Стандартной модели в конце 1970-х годов, она до сих пор находится на переднем крае научных исследований.

Бозон Хиггса играет важную роль в Стандартной модели, так как он свидетельствует о существовании поля Хиггса, невидимого энергетического поля, которое пронизывает всю Вселенную. Без поля Хиггса элементарные частицы, из которых состоите вы, я, вся видимая Вселенная, не имели бы массы. Без поля Хиггса масса не могла бы возникнуть и не было бы *ничего*.

Выходит, мы довольно многим обязаны существованию этого поля. Именно поэтому, среди других причин, бозон Хиггса, то есть частицу хиггсовского поля, в массовой прессе называют «частицей Бога». Ученые просто не выносят этого прозвища, поскольку оно слишком преувеличивает важность частицы и неприятно намекает на связь между физикой и теологией. Однако оно стало очень популярным среди пишущих о науке журналистов и писателей.

Многие предсказанные следствия существования поля Хиггса были подтверждены в экспериментах на коллайдерах еще в начале 1980-х. Но вывести логическое заключение о поле – не то же самое, что обнаружить свидетельствующую о нем частицу. Поэтому так отрадно знать, что поле весьма вероятно существует и здесь, и там, и повсюду. Бозон Хиггса вполне мог быть не обнаружен, и это имело бы катастрофические последствия для Стандартной модели.

Я взялся за эту книгу в июне 2010 года, за два года до открытия бозона. Незадолго до того я закончил рукопись другой книги, называвшейся «Квантовая история: рассказ в 40 мгновениях», где, как следует из названия, изложил историю квантовой физики с начала XX века до наших дней. Книга охватывала развитие Стандартной модели и предсказание поля и частицы Хиггса. За несколько месяцев до того Большой адронный коллайдер в ЦЕРНе вышел на рекордные показатели энергии протон-протонных столкновений в 7 триллионов электронвольт, и я решил, что открытие *может* быть сделано в ближайшие годы. И, к счастью, оказался прав.

«Квантовая история» вышла в феврале 2011 года. Книга, которую вы держите в руках, отчасти основана на ней.

Я хотел бы поблагодарить Латху Менон и представителей издательства Oxford University Press, которые не побоялись рискнуть и заказать книгу о еще неоткрытой частице. Я следил за событиями в ЦЕРНе по официальным каналам, но также обязан многим блогерам, пишущим о физике высоких энергий – это Филип Гиббс, Томмазо Дориго, Питер Войт, Адам Фалковски, Мэтт Стрэсслер и Джон Баттерворт. Также весьма признателен Джону Баттерворту, Софи Тесори, Джеймсу Гиллису, Лоретт Понс и Линдону Эвансу за их потраченное время и разделенное волнующее ожидание. Еще мне хотелось бы выразить благодарность профессорам Дэвиду Миллеру и Питеру Войту, которые прочли и прокомментировали черновую рукопись, и профессору Стивену Вайнбергу, который внимательно прочел предварительный вариант и любезно поделился своими взглядами во вступительном слове. Уверяю читателя, что все оставшиеся в тексте ошибки полностью лежат на моей совести.

*Джим Бэгготт*

*Рединг,*

*6 июля 2012 г.*

## Предисловие

После многих важных открытий в науке выходили научно-популярные книги, которые объясняли обычным читателям, что это за открытия. Но я впервые вижу книгу, которая в основном написана в *предвосхищении* открытия. То, что эта книга была готова к публикации сразу же после объявления в июле 2012 года об открытии ЦЕРНом (при участии Фермилаба<sup>1</sup> новой частицы, по всей видимости частицы Хиггса, свидетельствует об удивительной находчивости и предприимчивости Джима Бэгготта и Oxford University Press.

Скорая публикация книги также говорит об интересе к этому открытию широкой публики. Поэтому, может быть, во вступительном слове мне следует прибавить несколько собственных замечаний о том, что же произошло. Часто приходится слышать, что в поисках частицы Хиггса речь идет о том, откуда взялась масса. Такое объяснение достаточно верно, но его требуется уточнить.

К 1980-м годам у нас сложилась хорошая всесторонняя теория, охватывающая все наблюдаемые элементарные частицы и их взаимодействия друг с другом (кроме гравитационного). Одним из основных элементов теории является симметрия, похожая на семейные отношения между двумя из этих взаимодействий: электромагнитным и слабым ядерным. Электромагнетизму мы обязаны светом; благодаря слабому ядерному взаимодействию частицы внутри ядер атомов меняют заряд в процессе радиоактивного распада. Симметрия объединяет оба взаимодействия в единой электрослабой структуре. Главные положения электрослабой теории прошли тщательную проверку; их истинность не стояла на кону в последних экспериментах ЦЕРНа и Фермилаба и не подверглась бы серьезным сомнениям, даже если бы частица Хиггса не была открыта.

Однако одно из следствий электрослабой симметрии заключается в том, что, если теорию ничем не дополнять, все элементарные частицы, включая электроны и кварки, должны не иметь массы, что, разумеется, не так. Значит, в теорию электрослабого взаимодействия нужно что-то добавить, какой-то новый вид материи или поля, еще не наблюдавшийся ни в природе, ни в лаборатории. Поиск частицы Хиггса – поиск ответа на вопрос: что же это за новая штука, которую нужно туда добавить?

Чтобы ее найти, требовалось не просто топтаться вокруг ускорителя высокой энергии, дожидаясь, не объявится ли что-нибудь. Электрослабая симметрия, точное свойство, лежащее в основе уравнений физики элементарных частиц, каким-то образом должна быть нарушена; она не должна применяться непосредственно к частицам и взаимодействиям, которые мы наблюдаем фактически. Еще с работы Ёитиро Намбу и Джеффри Голдстоуна в 1960–1961 годах известно, что подобное нарушение симметрии возможно в различных теориях, но считалось, что оно обязательно подразумевает существование новых безмассовых частиц, о которых тогда не было известно.

И только исследования, проделанные независимо Робертом Браутом и Франсуа Энгле-ром; Питером Хиггсом; Джеральдом Гуральником, Карлом Хейгеном и Томом Кибблом в 1964 году<sup>2</sup>, показали, что в некоторых теориях эти безмассовые частицы Намбу – Голдстоуна исчезают и служат только для того, чтобы придать массу частицам – переносчикам взаимодействия. Именно это происходит в теории слабого и электромагнитного взаимодействий, которую в 1967–1968 годах предложили Абдус Салам и я. Однако вопрос, какой же новый вид

---

<sup>1</sup> Фермилаб – сокращенное название Национальной ускорительной лаборатории имени Энрико Ферми, США. (Примеч. пер.)

<sup>2</sup> Для краткости я буду называть их работами 1964 года. (Примеч. Стивена Вайнберга.)

материи или поле в действительности нарушает электрослабую симметрию, все так же оставался без ответа.

Можно предположить две возможности. Одна возможность заключалась в том, что существуют не наблюдавшиеся до сих пор поля, которые пронизывают вакуум, и что, как у магнитного поля Земли север отличается от остальных направлений, у этих неизвестных полей слабое взаимодействие отличается от электромагнитного и частицы – переносчики слабого взаимодействия и другие – приобретают массу, но при этом фотоны (переносящие электромагнитное взаимодействие) остаются с нулевой массой. Такие поля называются скалярными, это значит, что, в отличие от магнитных полей, у них не различаются обычные направления в пространстве. Скалярные поля такого общего вида использованы в наглядных примерах нарушения симметрии у Голдстоуна и позднее в работах 1964 года.

Когда совместно с Саламом использовали нарушение симметрии, разрабатывая современную электрослабую теорию слабого и электромагнитного взаимодействий, мы предположили, что нарушение симметрии происходит благодаря полям такого скалярного типа, пронизывающим все пространство. (Подобную симметрию уже гипотетически предложили Шелдон Глэшоу, а также Салам и Джон Уорд, но не в качестве точного свойства уравнений теории, поэтому они не пошли дальше и не ввели скалярные поля.)

Одно из следствий теорий, в которых симметрию нарушают скалярные поля, в том числе моделей, рассмотренных Голдстоуном и в работах 1964 года, и нашей с Саламом теории электрослабого взаимодействия, состоит в том, что, хотя некоторые из этих полей служат только для придания массы частицам – переносчикам взаимодействий, другие скалярные поля будут проявляться в природе в виде новых физических частиц, которые можно будет получать и наблюдать в ускорителях и коллайдерах. Оказалось, что нам с Саламом нужно ввести в теорию электрослабого взаимодействия четыре скалярных поля. Три скалярных поля использованы для сообщения массы  $W^{+-}$ ,  $W^0$ -и  $Z^0$ -частицам – «тяжелым фотонам», – которые в нашей теории переносят слабое взаимодействие (эти частицы были открыты в ЦЕРНе в 1983–1984 годах и, как оказалось, имеют массы, предсказанные теорией электрослабого взаимодействия). Оставшееся скалярное поле должно проявляться в качестве физической частицы, сгустка энергии и импульса этого поля. Это и есть частица Хиггса, которую физики искали почти 30 лет.

Но была и вторая возможность. Быть может, напротив, нет никаких пронизывающих пространство скалярных полей, нет никакой частицы Хиггса. Наоборот, электрослабую симметрию могут нарушать сильные взаимодействия, которые называются техницветовыми и действуют на новый класс частиц, слишком тяжелых и потому до сих пор не наблюдавшихся. Нечто подобное имеет место в явлении сверхпроводимости. Подобную теорию элементарных частиц в конце 1970-х предложили независимо Леонард Сасскинд и я сам. Она повлекла бы за собой целую чашу новых частиц, связанных техницветовым взаимодействием. Таким образом, перед нами встала альтернатива: скалярные поля или техницвет?

Открытие новой частицы очень сильно склонило бы весы в пользу того, что электрослабую симметрию нарушают скалярные поля, а не техницветовое взаимодействие. Вот почему оно настолько важно.

Однако нужно ответить еще на множество вопросов, прежде чем все станет ясно. Теория электрослабого взаимодействия 1967–1968 годов предсказала все свойства частицы Хиггса, кроме ее массы. Сейчас, когда масса получена экспериментально, мы можем посчитать вероятность всех разных форм распада частиц Хиггса и провести дальнейшие эксперименты, которые подтвердят или опровергнут эти предсказания. На это потребуются некоторое время.

Открытие новой частицы, которая, по-видимому, является частицей Хиггса, ставит перед теоретиками еще одну сложную задачу – понять ее массу. Частица Хиггса – та самая элементарная частица, чья масса возникает не из-за нарушения электрослабой симметрии. С точки зрения фундаментальных принципов теории электрослабого взаимодействия масса частицы

Хигса может иметь какое угодно значение. Вот почему ни Салам, ни я не смогли ее предсказать.

На самом деле в массе частицы Хигса, которую теперь мы так наблюдаем, есть нечто непонятное. Чаще всего это называют проблемой иерархии. Поскольку именно масса частицы Хигса задает величину масс всех остальных известных элементарных частиц, можно предположить, что она должна быть аналогична другой массе, играющей фундаментальную роль в физике: так называемой планковской массе, которая представляет собой фундаментальную единицу массы в теории гравитации (это масса гипотетических частиц, у которых сила гравитационного притяжения друг к другу равна силе электрического взаимодействия между двумя электронами, находящимися на таком же расстоянии друг от друга). Но планковская масса примерно в 100 тысяч триллионов раз больше массы частицы Хигса. Следовательно, перед нами опять встает вопрос: хотя частица Хигса так массивна, что для ее обнаружения потребовался гигантский коллайдер, почему же ее масса настолько мала?

Джим Бэгготт предложил мне добавить что-нибудь об эволюции идей в этой области физики, исходя из моего личного опыта. Я расскажу только о двух моментах.

Как рассказывает Бэгготт в главе 4, Филип Андерсон еще до 1964 года утверждал, что безмассовые частицы Намбу – Голдстоуна не были обязательным следствием нарушения симметрии. Почему же доводы Андерсона не убедили ни меня, ни других теоретиков? Это ни в коей мере не значит, что Андерсона не следовало принимать всерьез. Среди всех теоретиков, занимавшихся физикой конденсированного состояния, Андерсон яснее всех понимал, насколько важны принципы симметрии, принципы, играющие важнейшую роль в физике элементарных частиц.

Думаю, доводы Андерсона были отвергнуты главным образом потому, что они основывались на аналогии с такими феноменами, как сверхпроводимость, которые являются нерелятивистскими (то есть это феномены, происходящие в областях, где можно безопасно пренебречь принципом относительности Эйнштейна). Однако Голдстоун, Салам и я строго научно показали неизбежность безмассовых частиц Намбу – Голдстоуна в доказательстве 1962 года, которое основывалось на бесспорной истинности теории относительности. Теоретики физики частиц были готовы согласиться, что Андерсон прав в нерелятивистском контексте сверхпроводимости, но только не в теории элементарных частиц, которая по необходимости включает в себя принцип относительности. Работы 1964 года ясно показали, что наше с Голдстоуном и Саламом доказательство неприменимо к квантовым теориям с частицами – переносчиками взаимодействий, поскольку, в отличие от физических явлений, которые удовлетворяют принципу относительности, математическая формулировка этих теорий в контексте квантовой механики ему не удовлетворяет.

Из-за этой же проблемы с принципом относительности я, как ни старался, не смог после 1967 года доказать, как придумали мы с Саламом, что бессмысленные бесконечности, возникавшие в теории электрослабого взаимодействия, сокращаются, как сокращаются аналогичные бесконечности в квантовой теории электромагнетизма, что уже было показано. Принцип относительности был важен для демонстрации того, как сокращаются бесконечности в теории электромагнетизма. В доказательстве Герарда 'т Хоофта 1971 года, о котором Бэгготт рассказывает в главе 5, использован метод, разработанный 'т Хоофтом совместно с Мартинусом Велтманом, в котором принципы квантовой механики расширяются, позволяя сформулировать теорию так, чтобы она согласовалась с принципом относительности.

Второй момент: в главе 4 Бэгготт предполагает, что я не включил кварки в свою статью 1967 года, излагавшую теорию электрослабого взаимодействия, поскольку меня заботил тот вопрос, что теория, возможно, предсказывает процессы с участием так называемых странных частиц, которые фактически не наблюдались. Если бы только мои рассуждения были настолько конкретными. Скорее я не включил кварки в теорию только потому, что в 1967 году попросту

в них не верил. Никто никогда не наблюдал кварков, и трудно было поверить, будто дело в том, что кварки гораздо тяжелее наблюдаемых частиц, например протонов и нейтронов, ведь эти наблюдаемые частицы, как предполагалось, состоят из кварков.

Как и многие другие теоретики, я не вполне принимал существование кварков до 1973 года, до работы Дэвида Гросса, Фрэнка Вильчека и Дэвида Политцера. Они показали, что в теории кварков и сильных ядерных взаимодействий, называемой квантовой хромодинамикой, сильное взаимодействие становится слабее с уменьшением расстояния. Потом кому-то из нас пришло в голову, что в таком случае сильное взаимодействие между кварками должно, вопреки очевидному, усиливаться по мере удаления кварков друг от друга и, может быть, настолько, что кварки не способны разделиться. До сих пор это не доказано, но таково общепринятое мнение. Квантовая хромодинамика к настоящему времени была досконально проверена, и однако никто никогда не видел изолированного кварка.

Я был очень рад тому, что эта книга начинается с первых лет XX века и математика Эмми Нетер, которая раньше всех осознала важность принципов симметрии в природе. Это напоминает нам, что труд современных ученых – всего лишь новый шаг на великом извечном пути к пониманию того, как устроена природа, на котором каждая наша догадка подвергается проверке экспериментом. Книга Джима Бэгготта даст читателю возможность ощутить вкус этого исторического процесса.

*Стивен Вайнберг*

*6 июля 2012 г.*

## Пролог

### Форма и субстанция

Из чего сделан мир?

Подобные простые вопросы терзали человеческий разум с тех самых пор, как человек стал способен рационально мыслить. Конечно, сегодня этот вопрос стал гораздо сложнее и подробнее, а ответы на него – гораздо запутаннее и обходятся чрезвычайно дорого. Но уверяю вас, в самой своей основе вопрос остается очень простым.

Две с половиной тысячи лет назад древнегреческие философы могли опираться исключительно на свое понимание красоты и гармонии в природе и силу логического мышления и воображения применительно к вещам, которые они наблюдали невооруженным взглядом. Думая об этом сейчас, нельзя не поражаться тому, как много им удалось понять.

Греки тщательнейшим образом различали форму и субстанцию. По их понятиям, мир состоял из материальной субстанции, которая могла принимать самые разнообразные формы. Сицилийский философ V века до н. э. Эмпедокл предположил, что это разнообразие можно свести к четырем основным формам, которые сейчас мы называем элементами. Это были земля, воздух, огонь и вода. Элементы считались вечными и неуничтожимыми, соединенные в довольно романтических сочетаниях благодаря притягивающей силе Любви и разделенные отталкивающими силами Вражды, и все в мире состоит из них.

Другая школа, начало которой положил философ Левкипп также V века до н. э. (и которая теснее всего связана с его учеником Демокритом), утверждала, что мир состоит из крошечных неделимых и неуничтожимых частиц материи (атомов) и пустого пространства (пустоты). Атомы – элементы, составляющие всю физическую субстанцию, которая определяет всю материю. Как утверждал Левкипп, атомы необходимы принципиально, потому что субстанция, безусловно, не может делиться бесконечно. Если она могла делиться бесконечно, в итоге деления мы могли бы получить ничто, а это, очевидно, противоречит непоколебимому, как казалось, закону сохранения материи.

Примерно веком позже Платон развил теорию, описывавшую, как организованы атомы (субстанция), составляющие четыре элемента (формы). Он представил четыре элемента в виде геометрических (или платонических) тел и в трактате «Тимей» утверждал, что грани всех тел можно дальше разложить на системы треугольников, которые представляют собой атомы, составляющие элементы. Переставив треугольники – то есть переставив атомы, – можно превратить один элемент в другой и разными сочетаниями элементов получать новые формы<sup>3</sup>.

Мысль, что должны существовать какие-то конечные компоненты, какая-то бесспорная реальность, которая поддерживает окружающий мир и придает ему форму, кажется логичной. Если материя может делиться бесконечно, тогда мы достигнем точки, где сами компоненты становятся чем-то эфемерным – до такой степени, что перестают существовать. Тогда исчезнут составные части, и у нас останутся одни взаимодействия между неопределимыми, невещественными фантомами, которые лишь производят впечатление субстанции.

Может быть, это не слишком приятно, но в большой степени это именно то, что и доказала современная физика. Масса, по современным представлениям, не является неотъемлемым или «первосущим» свойством фундаментальных составных частей природы. На самом деле массы не существует. Масса полностью слагается из энергии взаимодействий между безмассовых от природы элементарных частиц.

---

<sup>3</sup> См. Платон, Тимей и Критий. По Платону, воздух, огонь и вода состоят из одного вида треугольников, а земля из другого. Поэтому, как утверждал Платон, землю невозможно преобразить в другие элементы.

Физики делили и делили и в итоге нашли ничто.

Только с развитием формальной экспериментальной философии в начале XVII века у человека появилась возможность выйти за рамки того рода умозрительных размышлений, которые были характерны для теорий древних греков. Древняя философия интуитивно пыталась понять природу материальной субстанции из наблюдений, искаженных предвзятыми представлениями о том, каким должен быть мир. Новые ученые взялись за саму природу, чтобы добыть у нее данные о том, каков мир на самом деле.

Форма и субстанция по-прежнему вызывали вопросы. Концепция массы – количество вещества, проявляющееся в динамических движениях физических объектов, – приобрела ключевую роль в нашем понимании субстанции. Спротивление объекта ускорению стало пониматься как инертная масса. При ударе с одинаковой силой небольшой объект ускоряется гораздо быстрее, чем крупный.

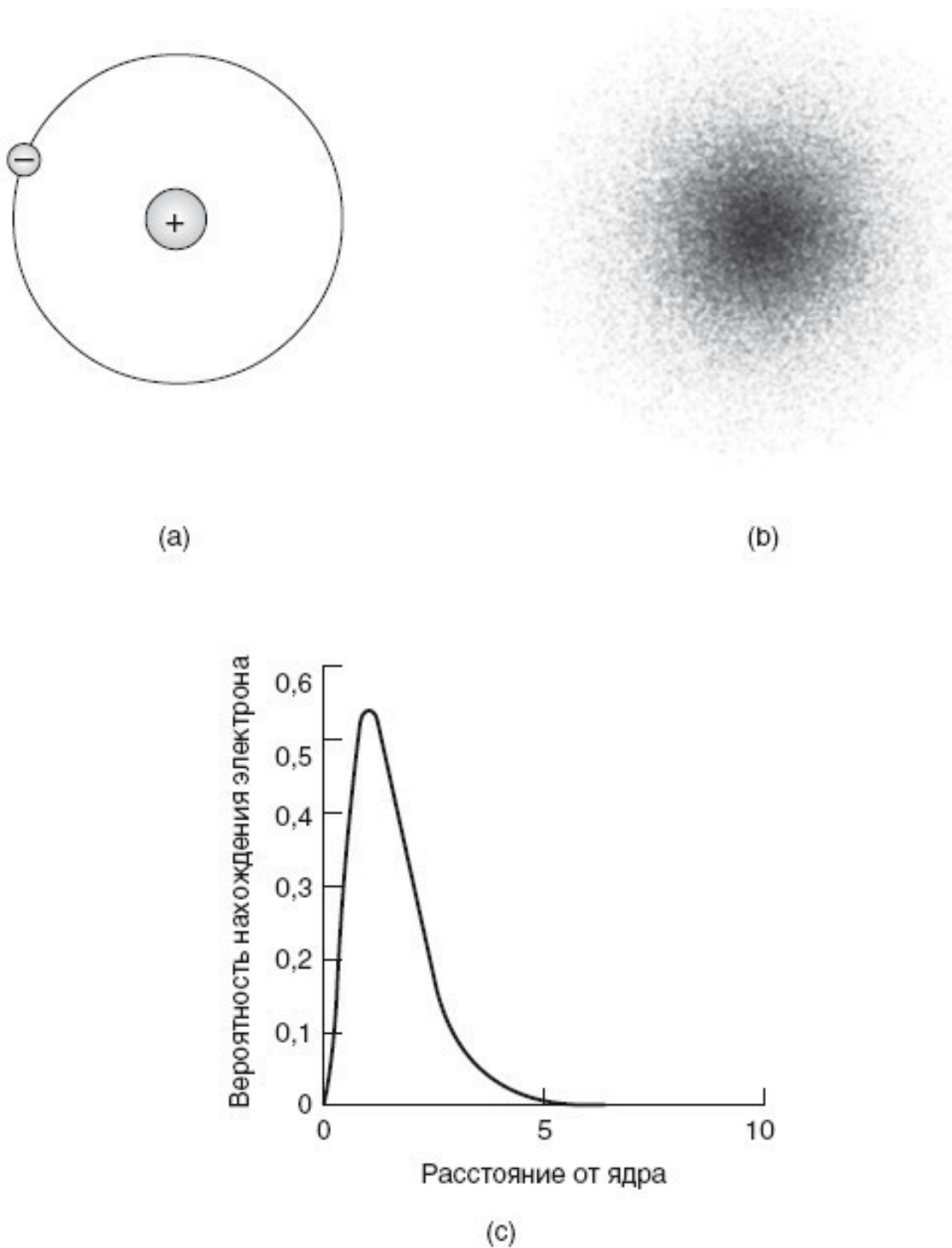
Способность объекта генерировать гравитационное поле понимается как гравитационная масса. Сила притяжения у Луны слабее, чем у Земли, потому что Луна меньше и, следовательно, обладает меньшей гравитационной массой. Инертная и гравитационная массы эмпирически тождественны, хотя убедительных теоретических причин, почему это должно быть именно так, не найдено.

Также ученые раскрыли тайну огромного разнообразия природных форм. Вода, фундаментальный элемент у греков, как оказалось, состоит не из геометрических тел и треугольников, как полагал Платон, а из молекул, которые складываются из атомов химических элементов водорода и кислорода, сочетание которых мы записываем в виде H<sub>2</sub>O.

Современное применение слова «атом» сначала имело отношение к тому смыслу, который вкладывали в него греки, то есть неделимой частицы материи. Но еще в то время, когда существование атомов вызывало горячие споры, в 1897 году, английский физик Джозеф Джон Томсон открыл отрицательно заряженный электрон. Оказалось, что атомы, в свою очередь, состоят из субатомных частиц.

За открытием Томсона в 1909–1911 годах последовали эксперименты новозеландца Эрнеста Резерфорда в его манчестерской лаборатории. Его эксперименты показали, что атомы в основном состоят из пустого пространства. В центре атома находится крошечное положительно заряженное ядро, вокруг которого обращаются отрицательно заряженные электроны, почти как планеты вокруг Солнца. Большая часть массы атомов, составляющих элементы материальной субстанции, сконцентрирована в ядре. Поэтому именно в ядре соединяются форма и субстанция.

Эта «планетарная» модель атома и по сей день остается наглядной визуальной метафорой. Но физикам уже в то время сразу же стало очевидно, что такая модель фактически не имеет смысла. Они считали, что планетарные атомы должны быть по сути нестабильны. В отличие от движущихся вокруг Солнца планет электрически заряженные частицы, движущиеся в электрическом поле, испускают энергию в виде электромагнитных волн. Такие планетарные электроны истощили бы свою энергию за долю секунды, и тогда внутренняя структура атома просто рухнула бы.



*Рис. 1*

(a) В предложенной Резерфордом «планетарной» модели атома водорода единственный отрицательно заряженный электрон движется по фиксированной орбите вокруг ядра, состоящего из единственного положительно заряженного протона. (b) Квантовая механика заменила орбиту электрона волновой функцией, которая в конфигурации с самой низкой энергией (1s) имеет симметричную сферическую форму. (c) Таким образом, электрон может «находиться» везде в пределах волновой функции, однако наиболее вероятно его нахождение на расстоянии, которое предсказывает старая планетарная модель

Решение этой загадки появилось в виде квантовой механики в начале 1920-х годов. Электрон – не просто частица, которую можно представить себе в виде крошечного шарика отрицательно заряженного вещества, он одновременно и волна, и частица. Он не «здесь» или «там», как можно сказать о локализованном фрагменте вещества, но буквально «езде» в пределах его призрачной, нелокализованной волновой функции. По существу, электроны не обращаются вокруг ядра. Напротив, их волновые функции создают в пространстве вокруг ядра характерные трехмерные формы, которые мы называем орбиталями. Математическая форма каждой орбитали описывает *вероятность* нахождения теперь уже совершенно загадочного электрона в конкретном месте – «здесь» или «там» – внутри атома (см. рис. 1).

Период квантовой революции оказался беспрецедентно плодотворным как для теоретической, так и для экспериментальной физики. Когда в 1927 году английский физик Поль Дирак объединил квантовую механику со специальной теорией относительности Эйнштейна, вдруг появилось совершенно новое свойство, названное *электронным спином*. Оно уже было известно экспериментаторам и приблизительно толковалось в смысле вращения электрона вокруг своей оси, подобно волчку, примерно так же, как Земля вращается вокруг своей оси, двигаясь вокруг Солнца (см. рис. 2).

Но это была очередная визуальная метафора, не имевшая, как быстро выяснилось, никаких оснований в действительности. Сегодня мы понимаем спин как чисто релятивистский квантовый эффект, в котором электроны могут принимать одну из двух возможных ориентаций, которые мы называем «спин вверх» и «спин вниз». Это не ориентация по известным направлениям в обычном трехмерном пространстве, но ориентация в так называемом спиновом пространстве, которое имеет только два измерения – вверх и вниз.

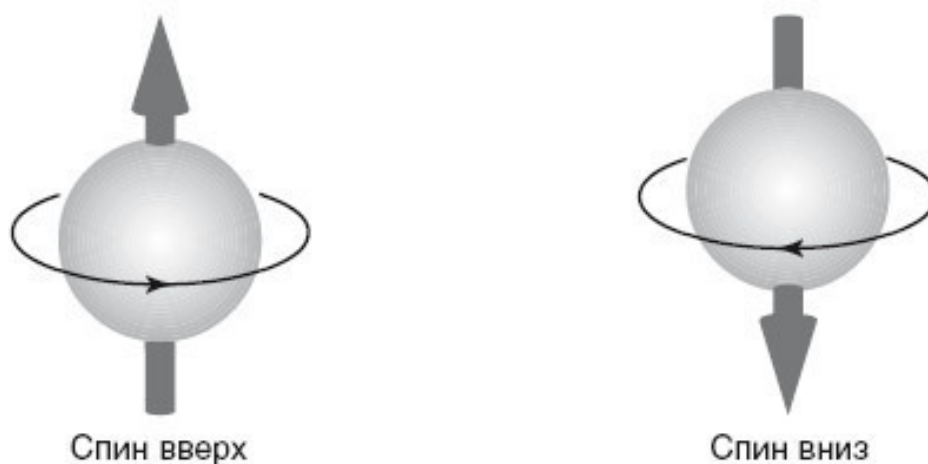


Рис. 2

В 1927 г. Дирак соединил квантовую механику и эйнштейновскую специальную теорию относительности, чтобы создать полностью релятивистскую квантовую теорию. При этом проявилось такое свойство, как спин электрона, представлявшееся в виде вращения отрицательно заряженного электрона вокруг своей оси, который тем самым генерирует небольшое локальное магнитное поле. Сегодня мы представляем спин электрона с точки зрения его возможной ориентации – вверх или вниз

Как оказалось, каждая атомная орбиталь содержит два – и только два – электрона. Это знаменитый *принцип запрета*, или *принцип Паули*, сформулированный австрийским физиком Вольфгангом Паули в 1925 году, который утверждает, что электроны не могут находиться одновременно в одном и том же квантовом состоянии. Принцип выводится из математического

выражения волновой функции для любого сложного состояния, включающего два электрона или более. Если сложное состояние включает два электрона с совершенно одинаковыми физическими свойствами, то у волновой функции нулевая амплитуда – такое состояние не может существовать. Чтобы волновая функция имела ненулевую амплитуду, два электрона должны так или иначе отличаться. Это значит, что на атомной орбитали один электрон должен иметь ориентацию спин вверх, а другой – спин вниз. Иными словами, электроны должны быть *спаренными*.

Есть искушение попытаться представить себе, как выглядят эти ориентации на самом деле, однако не стоит ему поддаваться. При этом их эффекты вполне реальны. Спин определяет величину момента импульса у электрона – момента, связанного с «вращательным» движением спина. Спин также управляет взаимодействием электрона с магнитным полем. Эти эффекты можно досконально исследовать в лаборатории. Но, говоря о квантовой механике, такое впечатление, что мы перешагнули грань между тем, что можно узнать о происхождении этих эффектов, и тем, чего нельзя.

Релятивистская квантовая теория электрона Дирака также дала вдвое больше решений, чем, по его мнению, было нужно. Два решения соответствуют двум ориентациям электронных спинов. Чему же соответствуют два «лишних» решения? У Дирака были кое-какие свои идеи, но в конце концов в 1931 году он был вынужден признать, что они представляют ориентации спина вверх и вниз неизвестного до тех пор положительно заряженного электрона. Дирак открыл антивещество. Античастица электрона, названная позитроном, впоследствии была обнаружена в экспериментах с космическими лучами, так как она образуется в околоземном пространстве при столкновениях высокоэнергетических частиц.

В 1932 году нашелся, как казалось, последний кусочек головоломки. Английский физик Джеймс Чедвик открыл нейтрон, электрически нейтральную частицу, которая уютно расположилась рядом с положительно заряженным протоном внутри атомного ядра. Физики как будто получили все нужные ингредиенты, чтобы сформулировать четкий ответ на вопрос, поставленный в начале главы.

Ответ вышел примерно таким. Все вещество в мире состоит из химических элементов. Химические элементы встречаются в природе в самых разнообразных видах и составляют периодическую таблицу от самого легкого – водорода – до самого тяжелого из известных природных элементов – урана<sup>4</sup>.

Все элементы состоят из атомов. Все атомы имеют ядра, состоящие из разного количества положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов. Свойства каждого элемента определяются количеством протонов в ядре его атома. У водорода один протон, у гелия два, у лития три, и так далее вплоть до урана, у которого их девяносто два.

Ядро окружают отрицательно заряженные электроны в количестве соответствующем числу протонов, таким образом, что в итоге атом остается электрически нейтрален. Каждый электрон может иметь ориентацию либо вверх, либо вниз, и каждую орбиталь могут занимать два электрона при условии, что они спаренные.

Ответ очень обстоятельный. Имея элементарные составные части в виде протонов, нейтронов и электронов и принцип Паули, можно объяснить, почему периодическая таблица имеет такую структуру, а не другую. Можно объяснить, почему материя имеет форму и плотность. Можно объяснить существование изотопов – атомов с таким же количеством протонов, но другим количеством нейтронов в ядре. При некотором старании можно объяснить всю химию, биохимию и материаловедение.

---

<sup>4</sup> Существуют элементы тяжелее урана, но они не встречаются в природе. Они нестабильны, поэтому их приходится искусственно производить в лаборатории или ядерном реакторе. Самый известный пример – это, пожалуй, плутоний.

В таком объяснении масса не представляет никакой загадки. Массу всего материального вещества можно проследить до составляющих ее протонов и нейтронов, на долю которых приходится около 99 процентов массы любого атома.

Представьте себе кубик льда, замороженной воды тройной дистилляции. Кубик с ребрами длиной 2,7 сантиметра, чуть больше дюйма. Возьмите его в руку. Он холодный и скользкий. Он не тяжелый, но ладонь ощущает его вес. Итак, из чего складывается масса кубика?

*Молекулярная масса* воды считается по суммарному количеству протонов и нейтронов в ядрах двух атомов водорода и одного атома кислорода, которые составляют молекулу H<sub>2</sub>O. Ядро каждого атома водорода состоит всего из одного протона, а ядро атома кислорода содержит 8 протонов и 8 нейтронов, что дает в сумме 18 нуклонов. Кубик чистого льда, который вы держите в руке, весит около 18 граммов<sup>5</sup>, это масса его молекул в граммах. Таким образом, кубик представляет собой стандартную единицу измерения воды в твердом состоянии, которая называется моле́м.

Нам известно, что моль вещества содержит установленное количество атомов или молекул, из которых состоит это вещество. Оно называется числом Авогадро, оно чуть больше 600 миллиардов триллионов ( $6 \times 10^{23}$ ). Здесь и содержится ответ. Вес ледяного кубика у вас в ладони – это сумма масс 600 миллиардов триллионов молекул H<sub>2</sub>O, или примерно 10 800 миллиардов триллионов протонов и нейтронов (см. рис. 3)<sup>6</sup>.

Пришлось признать, что атомы не являются неделимыми, как когда-то считали греки. Атомы можно преобразовывать, превращать из одной формы в другую. В 1905 году Эйнштейн использовал специальную теорию относительности, чтобы показать эквивалентность массы и энергии в том, что впоследствии стало самой знаменитой научной формулой  $E = mc^2$ : энергия равна произведению массы на квадрат скорости света. При этом мысль, что масса представляет собой хранилище энергии, отнюдь не подорвала ее концепцию, а каким-то образом сделала ее еще более значительной.

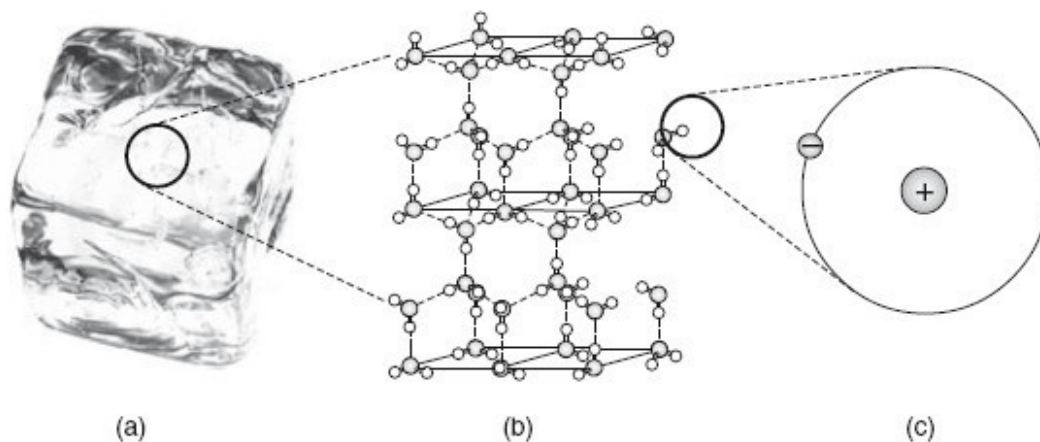


Рис. 3

Кубик льда с длиной ребра 2,7 см весит около 18 г (a). Он представляет собой кристаллическую решетку, содержащую чуть больше 600 миллиардов триллионов молекул воды H<sub>2</sub>O (b). Каждый атом кислорода содержит 8 протонов и 8 нейтронов, а каждый атом водорода содер-

<sup>5</sup> Плотность чистого льда при 0 °С равна 0,9167 грамма на кубический сантиметр. Объем кубика около 19,7 кубического сантиметра, таким образом, его масса чуть больше 18 граммов.

<sup>6</sup> Конечно, нельзя путать вес и массу. Кубик льда весит 18 граммов на Земле, гораздо меньше на Луне и вообще ничего на околоземной орбите. Однако его масса не меняется. Условно мы считаем массу равной его весу на Земле.

жит 1 протон ( $c$ ). Кубик льда, таким образом, содержит около 10 800 миллиардов триллионов протонов и нейтронов

Значительной, но не неизменной. Эйнштейн показал, что материя (масса) не сохраняется – она может превращаться в энергию. Когда атом урана-235 расщепляют бомбардировкой нейтронами, около пятой части массы одного протона превращается в энергию в результате ядерной реакции. Если взять 56-килограммовое ядро бомбы из урана-235 90-процентной чистоты, то высвобожденного количества энергии оказалось достаточно, чтобы стереть с лица земли японский город Хиросиму в августе 1945 года.

Но на самом деле Эйнштейна интересовал ответ на более глубокий вопрос. В его статье 1905 года есть намек: «Зависит ли инерция тела от содержания в нем энергии?» Эйнштейн понимал, что формула  $E = mc^2$  фактически означает, что  $m = E/c^2$ : вся инертная масса – это всего лишь иная форма энергии<sup>7</sup>. Далекие следствия этого наблюдения станут очевидны только через 60 лет.

В середине 1930-х годов казалось, что строительные кирпичики материи – протоны, нейтроны и электроны – дают исчерпывающий ответ на вопрос, поставленный в начале главы. Но оставалась одна проблема. Еще с конца XIX века было известно, что изотопы некоторых элементов нестабильны. Они радиоактивны: их ядра спонтанно распадаются, запуская цепную ядерную реакцию.

Есть разные виды радиоактивности. Один из них, который Резерфорд назвал бета-радиоактивностью в 1899 году, представляет собой преобразование нейтрона в ядре в протон, что сопровождается излучением высокоскоростного электрона (бета-частицы). Это естественная алхимия: изменение количества протонов в ядре неизбежно меняет его химические свойства<sup>8</sup>.

Бета-радиоактивность подразумевает, что нейтрон – нестабильная составная частица и потому совсем не является «фундаментальной». Кроме того, возник вопрос и относительно баланса энергии в этом процессе. Энергией излучаемого электрона нельзя было объяснить всю теоретическую энергию, высвобождаемую превращением протона внутри ядра. В 1930 году Паули решил, что у него нет иного выбора, кроме как предположить, что энергия, которой «не хватает» в реакции, уходит с еще ненаблюдавшейся электрически нейтральной частицей с небольшой массой, которую в конечном итоге назвали *нейтрино* («нейтрончик»). В то время считалось, что обнаружить такую частицу невозможно, однако впервые она была открыта в 1956 году.

Пора было подвести итог. Одно было ясно. Материя удерживается воедино благодаря *силе*. Помимо силы притяжения, действующей универсально на все материальные тела, наука пришла к выводу, что есть еще три рода сил, называемых *взаимодействиями*, которые действуют непосредственно внутри атома.

---

<sup>7</sup> На самом деле формула  $E = mc^2$  не встречается в таком виде в статье Эйнштейна.

<sup>8</sup> Это не является дешевым способом трансформировать благородные металлы в золото, так что мировым запасам золота ничто не угрожает.



Рис. 4

Схема взаимодействия двух электронов, как его описывает квантовая электродинамика. Электромагнитная сила отталкивания между двумя отрицательно заряженными электронами подразумевает обмен виртуальным фотоном в точке наибольшего приближения. Фотон назван виртуальным, так как его нельзя наблюдать во время взаимодействия

Взаимодействия между электрически заряженными частицами происходят благодаря электромагнетизму, хорошо известному из трудов физиков-первооткрывателей XIX века, которые, помимо многих других выдающихся достижений, заложили основы электроэнергетики. Полностью релятивистская квантовая теория электромагнитного поля, которая называется квантовой электродинамикой (КЭД), была разработана в 1948 году американскими физиками Ричардом Фейнманом и Джулианом Швингером и японским физиком Синъитиро Томонагой. В КЭД силы притяжения и отталкивания между электрически заряженными частицами переносят так называемые частицы – переносчики взаимодействий.

Например, когда два электрона сближаются друг с другом, они обмениваются частицей, которая заставляет их отталкиваться (см. рис. 4). Переносчики взаимодействия электромагнитного поля – это фотоны, квантовые частицы, из которых состоит всем известный свет. КЭД быстро добилась признания как теория, позволяющая делать беспрецедентно точные предсказания.

Осталось разобраться еще с двумя взаимодействиями. Электромагнетизм не мог объяснить, каким образом протоны и нейтроны связаны внутри атомного ядра, а также как происходит бета-распад. Эти процессы происходят в настолько разных энергетических масштабах, что никакое взаимодействие не способно учесть сразу оба. Ученые признали, что для этого требуются два разных взаимодействия – сильное ядерное, отвечающее за связь между составными частями атомного ядра, и слабое ядерное, управляющее некоторыми ядерными превращениями.

Так мы подходим к периоду в истории физики, о котором и пойдет речь в этой книге. Последующие 60 лет теоретической и экспериментальной физики элементарных частиц при-

вели нас к созданию Стандартной модели – собранию фундаментальных квантовых теорий поля, которые описывают всю материю и все взаимодействия между материальными частицами, за исключением гравитации. Проще всего понять, что такое Стандартная модель и что она значит для понимания материального мира, можно, совершив краткий экскурс в ее историю.

Наше путешествие начинается в 1915 году в Геттингене, тихом университетском городке в Германии.

# Часть первая

## Изобретение

### 1

#### Поэзия логических идей

*Глава, в которой немецкий математик Эмми Нетер открывает связи между законами сохранения и глубинной симметрией природы*

Пожалуй, мы можем согласиться, что одна из целей науки состоит в том, чтобы объяснить, из чего состоит мир и почему он таков, каков есть. Для этого она стремится пролить свет на базовые элементы материи и управляющие ею законы природы.

Если мы согласимся с этим, тогда придется признать, что не все «законы» одинаковы. В XVII веке Иоганн Кеплер долго корпел над астрономическими данными, которые добросовестно собрал Тихо Браге, и в конце концов вывел три закона, управляющие движением планет вокруг Солнца. Эти законы очень убедительны, но они не дают более глубокого объяснения, не сообщают причины, почему планеты обращаются вокруг Солнца именно таким образом. Это объяснил закон всемирного тяготения Исаака Ньютона. Закон всемирного тяготения простоял непоколебимо еще 200 лет, прежде чем в конечном итоге его не сменило взаимодействие материи и искривленного пространства-времени в общей теории относительности Эйнштейна.

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.