

# Предисловие

Оглядываясь на конец XX в., испытываешь потрясение от того, сколь сильно изменилось наше понимание физики за последние сто лет. Вне всякого сомнения, великими озарениями начала XX в. стали теория относительности и квантовая механика. Из специальной теории относительности Эйнштейна мы узнали о странном поведении быстро движущихся объектов, а с помощью его еще более удивительной общей теории относительности сумели переосмыслить гравитацию в терминах вызываемого массой искривления пространства и времени. Квантовая механика нам показала, что факт в мире атомов подчас гораздо удивительнее выдумки.

Специальная теория относительности и квантовая механика слились в квантовую теорию поля. Самое примечательное предсказание этой теории, которое было проверено экспериментально в 1930-х гг. с использованием космических лучей, это существование «антивещества».

Последние пятьдесят лет были восхитительным периодом экспериментальных открытий, в числе которых нейтрино и кварки, «странные частицы», нарушение симметрии между левым и правым, прошлым и будущим и пр. При помощи аппарата квантовой теории удалось построить Стандартную модель физики частиц, которая собирает под одну крышу большую часть наших знаний о фундаментальной физике и единым образом описывает электромагнетизм, слабое (ответственное среди прочего за ядерный бета-распад) и сильное взаимодействия.

Приближается ли это полное открытий путешествие к концу? Буквально в последние месяцы газеты были переполнены заметками о бесспорном открытии в лаборатории ЦЕРН, близ Женевы, частицы Хиггса. Это открытие значительно проясняет наше понимание физики частиц и помога-

ет объяснить, почему проявления двух фундаментальных взаимодействий в мире элементарных частиц — электромагнитного и слабого — столь различны в нашем повседневном опыте. Оно также предлагает доступный экспериментальной проверке прототип новых полей, необходимых для объединения взаимодействий и более ясного понимания ранней Вселенной в теории космической «инфляции».

Тем временем в экспериментах проверяются странные свойства нейтрино и подтверждается, что «маленькая нейтральная частица» Ферми обладает крошечной, но все же ненулевой массой. Астрономы обнаружили новые волнующие свидетельства того, что общая теория относительности, возможно, требует корректировки введением «космологической постоянной» Эйнштейна — энергии вакуума. В новых изобретательных поисках частиц темной материи уже ведется ощупывание невидимой части Вселенной. Изучение с помощью спутников флуктуаций излучения, испущенного в результате Большого взрыва, может в ближайшие годы изменить наше понимание ранней Вселенной.

Но одним из крупнейших приключений является поиск «суперсимметрии». Суперсимметрия это аппарат теоретической физики, при помощи которого ученые стремятся найти ответы на некоторые вопросы, остающиеся открытыми в рамках Стандартной модели физики частиц. Например, Стандартная модель не объясняет происхождения у частиц массы. Если бы частицы имели огромные массы, что допускает Стандартная модель, то Вселенная была бы совсем другой. В ней не было бы звезд, планет и людей, потому что объединение вместе более чем нескольких элементарных частиц тут же приводило бы к их коллапсу в черную дыру. Тонкие физические эффекты типа искривления пространства–времени, образования черных дыр и квантовой гравитации были бы обычным делом в повседневной жизни, за исключением того, что не было бы самой повседневной жизни.

Если в природе есть суперсимметрия, то она является частью квантовой структуры пространства и времени. В повседневной жизни мы характеризуем пространство и время числами: «Сейчас три часа дня, высота двести метров над

уровнем моря» и т. д. Число — это классическое понятие, известное людям задолго до создания в начале XX в. квантовой механики. Она изменила наше понимание почти всего в физике, но фундаментальный способ описания пространства и времени остался незатронутым.

Доказательство суперсимметрии природы изменило бы и его, открыв перед нами квантовое измерение пространства и времени, которое не описывается обычными числами. Это квантовое измерение ясно бы проявилось в существовании новых элементарных частиц, которые могли бы рождаться на ускорителях и чье поведение подчинялось бы законам суперсимметрии. Эксперименты указывают на то, что требуемая для рождения новых частиц энергия ненамного больше той, которая достигается сегодня на современных ускорителях. Если суперсимметрия играет в физике ту роль, которую мы от нее ожидаем, то очень вероятно, что эти частицы будут открыты на Большом адронном коллайдере (БАК) или его модификациях в ЦЕРНе (Женева).

Когда Эйнштейн в 1905 г. представил миру специальную, а в 1915 г. — общую теорию относительности, квантовая механика была еще далеко в будущем, и он полагал, что пространство и время можно характеризовать обычными числами. Эйнштейновская концепция пространства и времени была подходящей для тех открытий, которые делались до сих пор, но открытие суперсимметрии приведет к переработке идей Эйнштейна в свете квантовой механики.

В самом деле, суперсимметрия это одно из основных требований «теории струн», которая является тем аппаратом, при помощи которого теоретики уже добились некоторого прогресса в объединении гравитации с другими фундаментальными взаимодействиями. Открытие суперсимметрии придаст невероятный импульс развитию теории струн. Поиск суперсимметрии это одно из величайших представлений на арене современной физики. Данная книга выносит на рассмотрение широкой публике это развертывающееся на наших глазах действо!

*Эдвард Уиттен*  
Принстон, 20 ноября 2012 г.

# Предисловие к русскому изданию

«...Мир остается вечным,  
может быть постижимым,  
но все-таки бесконечным.»

*Иосиф Бродский. Пилигримы*

Перед вами удивительная книга. Ее автору, известному американскому физику-теоретику Гордону Кейну, удалось доступно и просто рассказать о, возможно, самых сложных разделах современной теоретической и математической физики — суперсимметрии и теориях струн. Книга написана таким образом, что позволяет читателю почувствовать себя ученым, ищущим понимания мира природы. Без привлечения математики в ней рассказывается о том, что такое Стандартная модель физики частиц и вообще физическая теория, из чего состоит Вселенная, что такое симметрия законов природы.

Физическая картина мира на микроуровне формулируется сегодня при помощи Стандартной модели. Это обширная область знаний, в рамках которой описываются эффекты и особенности электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий элементарных частиц. Стандартная модель представляет удивительно изящное и многократно проверенное в экспериментах *описание* мира элементарных частиц, но она не говорит, *почему* мир устроен именно так. В поисках объединения взаимодействий физика стремится к созданию так называемой *окончательной теории*, которая вберет в себя Стандартную модель и все многообразие явлений для всех возможных энергий, расстояний и масс. Стандартная модель обязательно будет расширена. Теории струн и суперсимметрия представляют один из путей ее расширения.

К моменту написания этой книги в двух экспериментах *ATLAS* и *CMS* на Большом адронном коллайдере (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) был обнаружен бозон Хиггса — единственная фундаменталь-

ная частица Стандартной модели, которая до того момента времени существовала лишь «на бумаге». Это величайшее достижение физики высоких энергий утвердило так называемый механизм Хиггса в качестве инструмента, при помощи которого кварки, лептоны и  $W$ - и  $Z$ -бозоны приобретают массы. Уже после того, как вышла эта книга, было объявлено о присуждении Нобелевской премии по физике за 2013 г. Питеру Хиггсу и Франсуа Энглеру, которые внесли значительный вклад в развитие теории Стандартной модели в области хиггсовского сектора. В сообщении Нобелевского комитета отмечалось, что премия присуждается «за теоретическое открытие механизма, который вносит вклад в понимание происхождения масс субатомных частиц и который был недавно подтвержден благодаря открытию в экспериментах *ATLAS* и *CMS* на Большом адронном коллайдере предсказанной фундаментальной частицы».

Экспериментальное обнаружение бозона Хиггса знаменует собой окончание очередного этапа в построении описания мира природы. При помощи инструмента теорий струн масса бозона Хиггса была точно предсказана, однако распределение интенсивностей сигнала по различным каналам распада оказалось не таким, каким его ждали ученые. В настоящий момент в ЦЕРНе проводится модернизация БАК, так что энергии сталкивающихся пучков и светимость будут увеличены. Впереди большая работа и новые экспериментальные данные.

Выступая в ноябре 2013 г. в Лондоне на открытии выставки, посвященной БАК, известный астрофизик и популяризатор науки Стивен Хокинг рассказал о заключенном им и Гордоном Кейном пари, что бозон Хиггса не будет обнаружен. Стивен Хокинг проиграл пари, а вашему вниманию предлагается замечательная книга Гордона Кейна о бозоне Хиггса, суперсимметрии и новой физике за пределами Стандартной модели.

*Апрель 2014 г.*

*Е. А. Литвинович*

## Введение

«Так без большого труда ты все это можешь постигнуть,  
Ибо одно за другим выясняется все. Не сбиваясь  
Темною ночью с пути, ты узнаешь все тайны природы,  
И постоянно одно зажигать будет светоч другому.»

*Тит Лукреций Карр. О природе вещей  
(пер. Ф. Петровского)*

Даже не заглядывая внутрь старомодных часов с шестеренками, мы имеем вполне удовлетворительное представление о том, что происходит у них внутри. Немногие сегодня осознают, что у физиков есть ясное понимание того, как крутятся шестеренки субатомной Вселенной, заставляющие вертеться мир. Это понимание, или *описание*, дается на языке, который мы называем Стандартной моделью физики частиц. Человек, изучающий часовой механизм, может не только описать его работу, но и сказать, почему часы работают — почему один зубец шестерни, толкающий другой зубец, имитирует движение времени. Физики все глубже способны взглянуть в механизм работы Вселенной и не только дать его *описание*, но и сказать, *почему* те ее составляющие, которые они изучают, смогли образовать и поддерживать развитие того, что мы называем природой. Не слишком изящное название «Стандартная модель» закрепилось по мере того, как она создавалась и проверялась экспериментально, и изменить его уже невозможно.

Хороший способ больше узнать о часах состоит в том, чтобы понаблюдать за часовщиком, который их разбирает и снова собирает, а о природе — сходить на прогулку с натуралистом. Эта книга задумана как прогулка, совершая которую каждый, кто имеет достаточно уверенности и любопытства, может познакомиться с частицами и их поведе-

нием и получить удовольствие от этого знания. Мы будем странствовать не только по изведанной территории Стандартной модели, но и по новым районам, откуда могут произойти прорывы в еще более отдаленные области. Исходя из различных практических и теоретических соображений, многие физики думают, что следующим значимым открытием, возможно, будет прямое доказательство существования некоего свойства природы, которое мы называем «суперсимметрией». Эти соображения и выводы, следующие из существования суперсимметрии, составляют содержание этой книги.

Благодаря созданию и проверке Стандартной модели подошла к своему счастливому завершению «Первая книга» поисков понимания устройства физического мира. Стандартная модель (см. гл. 2) дает исчерпывающее описание фундаментальных частиц и взаимодействий, а также всех наблюдаемых в природе физических явлений. Стандартная модель содержит основополагающие принципы поведения протонов и нейтронов, ядер, атомов, молекул, конденсированного вещества, растений, звезд и объясняет большую часть того, что не удавалось понять прежде. Она сделала сотни успешных предсказаний, включая множество сенсационных, и на ее поле не существует явления (гл. 3), которое оставалось бы необъясненным (хотя необходимые для такого объяснения вычисления подчас слишком сложны). Последним кирпичиком, которого не хватало для завершения Стандартной модели, стало недавнее чудесное открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере (БАК) Европейской лаборатории в ЦЕРНе. Похоже, что открытая частица действительно имеет свойства бозона Хиггса, того самого, который искали больше 30 лет, хотя нужно провести еще много проверок относительно его свойств, прежде чем заявить это окончательно. Мы посмотрим на экспериментальные и теоретические достижения и физику, заключенную в открытии бозона Хиггса.

Если Стандартная модель успешно описывает природу, как может существовать физика за ее пределами, такая как суперсимметрия? Для этого есть две причины. Во-первых, Стандартная модель не в силах объяснить, почему Вселен-

ная состоит из вещества, а не из антивещества, а также не может сказать, что составляет темную материю Вселенной. Суперсимметрия дает объяснения обеих загадок. Вторых, в наше время изменяются сами границы физики. Сегодня ученые задают себе не только вопрос о том, *как* устроен мир (на этот вопрос отвечает Стандартная модель), но и *почему* он устроен именно так (вопрос, на который Стандартная модель не может ответить). Эйнштейн задавался вопросом «почему» еще в начале XX в., но только в последнее десятилетие этот вопрос стал предметом действительных научных исследований, а не просто философскими размышлениями.

Один из амбициозных подходов к вопросу «почему», расширяющих Стандартную модель, известен под названием «теории струн», которая формулируется для мира, состоящего из десяти или одиннадцати измерений. Основная работа над теорией струн до недавнего времени проводилась в направлении развития самой теории, а не в рамках плодотворного взаимодействия теории и эксперимента. Мы все будем восхищены, если такой подход приведет нас к цели. Как подчеркивает Эдвард Уиттен в предисловии к данной книге, теория струн предсказывает, что природа должна быть суперсимметричной. Чтобы теорию струн можно было проверить, ее необходимо «компактифицировать», так чтобы дополнительные измерения свернулись в крошечную область пространства, поскольку эксперименты проводятся в нашем четырехмерном мире. Хотя нельзя пройти по этим дополнительным, малым измерениям, их свойства влияют на видимые нами свойства частиц и взаимодействий, и здесь также наметился прогресс в направлении понимания вопроса «почему», который я буду обсуждать.

Эта книга в основном о физике суперсимметрии — некоторой идее, состоящей в том, что выражающие основные законы природы уравнения не меняются при взаимной замене одних фигурирующих в уравнениях частиц другими. Точно так же, как нарисованный на листе бумаге квадрат смотрится одинаково при повороте листа на  $90^\circ$ , найденные описывающие природу уравнения часто не меняются, если проделать над ними определенные операции. Когда это



происходит, говорят, что уравнения обладают симметрией. Суперсимметрия это именно такая симметрия: приставка «супер» в названии означает, что симметрия, о которой идет речь, — более удивительная и более скрытая от повседневного опыта, чем любые другие симметрии. Оказывается, что из идеи суперсимметрии вытекают примечательные следствия для объяснения тех аспектов мира, которые не может объяснить Стандартная модель, и особенно это касается физики бозона Хиггса. Наиболее важным следствием суперсимметрии может быть то, что она откроет нам окно из реального мира в мир теории струн, так что эксперименты смогут помочь нам в формулировании этой теории, а ее предсказания тогда смогут быть проверены. Суперсимметрия это и есть первая часть «Второй книги».

Сейчас, в конце 2012 г., когда моя книга пишется, суперсимметрия еще остается идеей. Есть весомое косвенное доказательство того, что суперсимметрия является свойством законов природы, но прямое доказательство пока не получено. Это не служит аргументом против того, что природа суперсимметрична, поскольку способная это подтвердить или опровергнуть ускорительная техника (БАК) только начинает касаться той области, в которой могут присутствовать искомые сигналы. Я попытался написать книгу так, чтобы она осталась корректной и интересной в случае, если удастся обнаружить частицы-«суперпартнеры» (см. гл. 1) и предсказываемые суперсимметрией дополнительные бозоны Хиггса. Конечно, когда у нас появятся соответствующие положительные сигналы, многое можно будет заострить. Однако, надеюсь, объяснения, которые может дать суперсимметрия, пути ее понимания и проверки, способы, которыми она может быть связана с теорией струн, останутся близки представленным в книге.

В некоторых книгах по физике частиц говорится о различных путях расширения Стандартной модели. Я же решил сфокусироваться на одном из таких путей, — направлении суперсимметрии. В пользу этого подхода говорит множество теоретических и косвенных аргументов, включая само открытие бозона Хиггса. Вопрос не будет решен окончательно до тех пор, пока на БАК или в нацеленных

на поиск темной материи экспериментах не будут открыты суперпартнеры. Если суперсимметрия не есть решение проблемы, то на это должны указать эксперименты.

Эта книга призвана быть самодостаточной и доступной широкому кругу интересующихся читателей.

Я очень благодарен своему самому беспощадному редактору — моей жене Луис, Джеку Керни (*Jack Kearney*) и Бобу Жэнгу (*Bob Zheng*) за обстоятельное прочтение рукописи, и особенно Марии Спиропулу (*Maria Spiropulu*) за полезные дискуссии и мудрость.

# Глава 1

## К большим вопросам...

Поль Гоген озаглавил свою картину, которая, как он думал, должна была стать его последней работой (1897 г.), «Откуда мы пришли? Кто мы? Куда мы идем?». На картине изображены жители Таити, где жил Гоген, и их быт. Картина находится в Музее изящных искусств г. Бостона (шт. Массачусетс, США), ее можно посмотреть «онлайн» (достаточно набрать в поисковике «*Where Do We Come From? What Are We? Where Are We Going?*». — *Прим. ред.*). В своих письмах Гоген упоминал о «диких математических трудностях», с которыми он столкнулся в процессе работы, и о том, что «вся картина была создана из воображения». Его ощущения очень схожи с ощущениями ученого, стремящегося к лучшему и, как он надеется, более полному пониманию мироздания. Стараясь постигнуть, откуда мы пришли, кто мы и куда идем, ученый работает с математическими конструкциями и строит гипотезы в своем воображении. Выражаясь конкретнее, он пытается установить, почему существует Вселенная, как она работает, почему именно так, а не иначе, из чего мы сделаны и как из неживой материи появились осознающие, мыслящие люди.

Каждая цивилизация задавала эти вопросы в той или иной форме и шла тем или иным путем, пытаясь получить на них ответы. Путь, который мы называем *наукой*, привел к целому ряду блистательных результатов и ответов на некоторые из вопросов, потому что был разработан метод изучения мира природы. Научный метод берет свое начало на Ионических островах от греков, больше двадцати пяти столетий назад, но начал давать надежные знания о мироустройстве только в работах Галилея и Кеплера около че-

[ . . . ]