



Почему мы существуем?

Величайшая из когда-либо
рассказанных историй

Доуренс Краусс

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН


ТРАЕКТОРИЯ



Вы смогли скачать эту книгу бесплатно и легально благодаря проекту **«Дигитека»**. [Дигитека](#) — это цифровая коллекция лучших научно-популярных книг по самым важным темам — о том, как устроены мы сами и окружающий нас мир. Дигитека создается командой научно-просветительской программы [«Всенаука»](#). Чтобы сделать умные книги бесплатными, достойно вознаградив авторов и издателей, Всенаука организовала всенародный сбор средств.

Мы от всего сердца благодарим всех, кто помог освободить лучшие научно-популярные книги из оков рынка! Наша особая благодарность — тем, кто сделал самые значительные пожертвования (имена указаны в порядке поступления вкладов):

Дмитрий Зимин
Екатерина Васильева
Зинаида Стаина
Иван Пономарев
Александр Боев
Николай Кочкин
Сергей Вязьмин
Сергей Попов
Алина Федосова
Роберт Имангулов
Алексей Волков
Анонимный жертвователь
Кирилл Крохмалев
Руслан Кундельский
Андрей Савченко
Владимир Валентинасов
Павел Дорожкин
Евгений Шевелев
Павел Мерзляков
Александра Прутова
Лада Сычева

Максим Кузьмич
Анастасия Коростелева

Мы также от имени всех читателей благодарим за финансовую помощь Фонд поддержки культурных и образовательных проектов «Русский глобус».

Этот экземпляр книги предназначен только для личного использования. Его распространение, в том числе для извлечения коммерческой выгоды, не допускается.

**Отзывы на книгу «Почему мы существуем?
Величайшая из когда-либо рассказанных историй»**

В каждом споре, который мне приходилось вести с теологами и религиозными верующими, их сногшибательный последний аргумент всегда принимает форму двух вопросов: «Почему что-то существует, хотя могло не существовать ничего?» и «Почему мы существуем?» При этом подразумевается, что если наука не может дать ответа на эти вопросы, то существует Бог. Но Бог или не Бог, мы все равно хотим получить ответы. В книге «Вселенная из ничего» Лоуренс Краусс, один из крупнейших ученых нашего времени, с энтузиазмом подступает к первому из этих вопросов, а в книге «Почему мы существуем?» он с блеском разбирает второй вопрос. Обе книги следовало бы оставлять в номерах гостиниц по всей Америке, в ящике рядом с Библией ассоциации «Гедеон».

МАЙКЛ ШЕРМЕР,
издатель журнала Sceptic,
обозреватель Scientific American и автор книги «Скептик»

Это чудесный опыт — идти вслед за проводником по этой увлекательной истории, от Галилея до Стандартной модели, бозона Хиггса и дальше, с понятными подробностями и анализом, живо освещающими не только сами достижения, но и радость творческой мысли и открытия, обогащенными зарисовками о замечательных людях, которые проложили нам путь. Книга наглядно демонстрирует: открытие того, что «природа на самом деле следует простым и элегантным правилам, интуитивно открытым духовными наследниками Платоновых философов из XX и XXI веков», — одно из самых поразительных достижений человеческого интеллекта.

НОАМ ХОМСКИЙ,
профессор лингвистики
Массачусетского технологического института

Открытие фундаментальных основ физической реальности следует отнести к числу величайших коллективных достижений человечества. Эта книга представляет собой прекрасное изложение основных идей и истории их появления. Краусс сам близок к данной области

и может предложить нам инсайдерскую информацию о личностях, обеспечивших ключевые успехи. Ему, как опытному и умелому автору, удастся писать о физике «предельно просто, но не более того». Я не знаю книг на эту тему лучше этой.

МАРТИН РИС,
*астрофизик, космолог,
автор книги «Всего шесть чисел»*

Очаровательно... Текст Краусса с широтой и размахом показывает развитие наших идей об устройстве мира вокруг нас... Настоящая бомба.

УОЛТЕР ГИЛБЕРТ,
нобелевский лауреат по химии

Доступно, красочно и удивительно. «Почему мы существуем?» рисует широкое полотно от Галилея до Большого адронного коллайдера и дальше. Она доступна, красочна и удивительна — идеальный проводник для всякого, кто заинтересован в понимании нашей случайной Вселенной.

ЭЛИЗАБЕТ КОЛБЕРТ,
лауреат Пулитцеровской премии

Как бард Вселенной, физик Лоуренс Краусс, возможно, лучше всех остальных способен рассказать нам «Величайшую из когда-либо рассказанных историй» — мастерский сплав истории, современной физики и космического взгляда, который позволяет читателю не только принять наши представления о Вселенной, но и насладиться тем, что еще только предстоит открыть.

НИЛ ДЕГРАСС ТАЙСОН,
*астрофизик,
ученый и популяризатор науки*

Эпический рассказ о физике, истории и философии, помогающий понять, как нам удалось так много узнать о Вселенной и мельчайших ее частях.

ШЕЛДОН ГЛЭШОУ,
нобелевский лауреат по физике

Посвящается Нэнси

**THE GREATEST STORY EVER
TOLD — SO FAR**

WHY ARE WE HERE?

LAWRENCE M. KRAUSS

ATRIA BOOKS

NEW YORK • LONDON • TORONTO • SYDNEY • NEW DELHI

Почему мы существуем?

Величайшая из когда-либо
рассказанных историй

Лоуренс Краусс

Перевод с английского

АНО
АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Москва
2019

УДК 524.85
ББК 22.68
К78

Переводчик Наталья Лисова
Научный редактор Александр Сергеев
Редактор Игорь Лисов

Краусс Л.

К78 Почему мы существуем? Величайшая из когда-либо рассказанных историй / Лоуренс Краусс ; Пер. с англ. — М. : Альпина нон-фикшн, 2019. — 420 с.

ISBN 978-5-91671-948-2

Лоуренса Краусса иногда называют Ричардом Докинзом от точных наук. Он серьезный физик-исследователь и один из самых известных в мире популяризаторов науки, с работами которого российский читатель только начинает знакомиться. Уже подзаголовок его книги подчеркивает, что нарисованная наукой картина мира превзошла по величественности все религиозные эпосы. Это грандиозное повествование разворачивается у Краусса в двух планах: как эволюция Вселенной, которая в итоге привела к нашему существованию, и как эволюция нашего понимания устройства этой Вселенной. Через всю книгу проходит метафора Платоновой пещеры: шаг за шагом наука вскрывает иллюзии и движется к подлинной реальности, лежащей в основе нашего мира. Путеводной нитью у Краусса служит свет — не только свет разума, но и само излучение, свойства которого удивительным образом переосмысляются на всех этапах развития науки — от механики через теорию электромагнитных волн к теории относительности, квантовой электродинамике, физике элементарных частиц и современной космологии.

УДК 524.85
ББК 22.68

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжнова).



ТРАЕКТОРИЯ

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

Все права защищены. Никакая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети интернет и в корпоративных сетях, а также запись в память ЭВМ для частного или публичного использования, без письменного разрешения владельца авторских прав. По вопросу организации доступа к электронной библиотеке издательства обращайтесь по адресу nylib@alpina.ru

ISBN 978-5-91671-948-2 (рус.)
ISBN 978-1-4767-7761-0 (анг.)

© Lawrence Krauss, 2017
© Издание на русском языке, перевод, оформление.
ООО «Альпина нон-фикшн», 2019

*Слезы — в природе вещей, повсюду
трогает души смертных удел.*

Вергилий

Содержание

Пролог	II
--------------	----

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. БЫТИЕ

Глава 1	
Из платяного шкафа — в пещеру	21
Глава 2	
Видеть в темноте	33
Глава 3	
Свет сквозь стекло ясное	51
Глава 4	
Туда и обратно	65
Глава 5	
Скачок во времени	78
Глава 6	
Тени реальности	99
Глава 7	
Вселенная причудливее выдумки	114

Глава 8

Излом времени 133

Глава 9

Распад и обломки..... 154

Глава 10

Отсюда и до бесконечности: проливая свет на Солнце170

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ИСХОД

Глава 11

Отчаянные времена и отчаянные меры..... 191

Глава 12

Марш титанов..... 206

Глава 13

Из бесконечного возникает красивейшее:
симметрия наносит ответный удар 229

Глава 14

Холодная застывшая реальность: страшно или
красиво? 246

Глава 15

Жизнь внутри сверхпроводника 258

Глава 16

Носимая тяжесть бытия: симметрия нарушена,
физика отремонтирована..... 272

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. ОТКРОВЕНИЕ

Глава 17

Чужое место в нужное время..... 285

Глава 18	
Туман расходится	296
Глава 19	
Свободен наконец.....	311
Глава 20	
Побеждая вакуум.....	336
Глава 21	
Готические соборы XXI века.....	349
Глава 22	
Больше вопросов, чем ответов	371
Глава 23	
От пивной вечеринки к концу времен.....	391
Эпилог	
Космическая скромность	407
Благодарности	414
Об авторе.....	417

ПРОЛОГ

Трудней всего увидеть то, что правда есть вокруг.

Дж. Бейкер. Перегрин

В начале был свет.

Но еще была гравитация.

Тут-то все и завертелось...

Именно так следовало бы, вероятно, начать историю о величайшем интеллектуальном приключении в истории. Это история научного поиска скрытой реальности, лежащей в основе мира нашего опыта, для чего потребовалась беспрецедентная глобальная мобилизация творческих сил и интеллектуальной смелости человечества. Это было бы невозможно без готовности расстаться со всеми видами верований, предубеждений и догм, как научных, так и не имеющих отношения к науке. История эта полна драматических эффектов и неожиданных поворотов. Она охватывает, по существу, всю историю человечества и, что особенно замечательно, даже нынешняя ее версия вовсе не окончательна — это всего лишь очередной рабочий черновик.

Эта история заслуживает самого широкого распространения. В развитых странах ее элементы уже начинают

постепенно замещать мифы и суеверия, в которых менее сведущие общества находили утешение сотни или тысячи лет назад. Тем не менее, благодаря режиссерам Джорджу Стивенсу и Дэвиду Лину, «величайшей из когда-либо рассказанных историй» до сих пор иногда называют иудеохристианскую Библию. Такая характеристика изумляет, поскольку, даже с учетом часто встречающихся в ней секса и насилия, а также некоторой поэтичности Псалмов, Библия как литературное произведение, хотя и послужила образцом для множества последующих книг, пожалуй, не дотягивает до не менее колоритных, но не столь жестоких греческих и римских эпосов, скажем «Энеиды» или «Одиссеи». Так или иначе в качестве руководства к пониманию нашего мира Библия трогательно несостоятельна и к тому же устарела. Можно также с полным основанием утверждать, что в качестве руководства по поведению человека многое в ней граничит с непристойностью.

В науке само слово *священный* является оскверняющим. Никакие идеи, религиозные или иные, не принимаются в ней автоматически. Вот почему ни жертвенность пророка две тысячи лет назад, ни смерть другого пророка шестью столетиями позже не стали апофеозом человеческой истории. Рассказ о наших истоках и нашем будущем продолжается. И история эта становится со временем все интереснее, но не благодаря откровению, а в результате неуклонного поступательного движения науки.

Вопреки многим популярным представлениям, в этом научном повествовании есть и поэзия, и глубокая духовность. Но у этой духовности есть то преимущество, что она накрепко привязана к реальному миру, а не создана в основном для того, чтобы потакать нашим надеждам и мечтам.

Уроки, извлеченные из наших попыток проникнуть в неведомое не одним только желанием, но силой эксперимента, учат смирению. На протяжении пятисот лет наука, развиваясь, освобождает человечество от оков вынужденного невежества. С точки зрения этого опыта какое космическое высокомерие нужно, чтобы утверждать, будто вся наша Вселенная создана лишь для того, чтобы в ней могли существовать мы? Какая близорукость лежит в основе допущения о том, что вселенная нашего опыта позволяет судить о Вселенной всех времен и пространств?

История науки оставила на обочине антропоцентризм. Что идет ему на смену? Потеряли мы что-то в ходе этого процесса — или наоборот, как я попробую доказать, приобрели нечто более существенное?

Я однажды сказал в публичном выступлении, что задача науки — причинять людям дискомфорт. Какое-то время я сожалел о своем замечании, опасаясь, что оно может отпугнуть слушателей. Но испытывать дискомфорт — это преимущество, а не помеха. Вся эволюционная история настраивала наше сознание считать комфортным то, что способствует выживанию, вроде естественной телеологической склонности детей считать, будто все на свете существует, чтобы служить какой-то цели, и более широкой тенденции к очеловечиванию неживых объектов, приписыванию им субъектности, поскольку очевидно, что лучше по ошибке увидеть угрозу в пассивном объекте, чем, наоборот, принять угрозу за пассивный объект.

Эволюция не подготовила наше сознание к восприятию длинных и коротких промежутков времени, малых и громадных расстояний, с которыми мы не сталкиваемся в своем опыте. Поэтому не удивительно, что некоторые замечательные научные открытия, такие как эволюция или

квантовая механика, в лучшем случае контринтуитивны и могут почти любого из нас увести далеко за пределы нашей близорукой зоны комфорта.

Вот что делает таким ценным изложение этой величайшей из когда-либо рассказанных историй. Замечательные истории бросают нам вызов. Они позволяют нам взглянуть на себя другими глазами и пересмотреть представления о себе и своем месте в космосе. Это верно не только в отношении величайших произведений литературы, музыки и живописи. Это верно и в отношении науки.

В этом смысле жаль, что замена древних верований современным научным просвещением часто описывается как «утрата веры». Насколько величественнее будет история, которую смогут рассказать наши дети, сравнительно с той, которую удалось рассказать нам? Безусловно, самый значительный вклад науки в цивилизацию состоит в том, что благодаря ей величайшие книги принадлежат не прошлому, но будущему.

В каждом эпическом сюжете есть мораль. Мораль нашей истории в том, что, позволяя космосу вести наш ум по пути эмпирического познания, мы можем обрести великие богатства духа, раскрывающего лучшее, на что способно человечество. Это дает нам надежду на будущее, позволяя войти в него с открытыми глазами и с инструментами, необходимыми для активного участия в нем.



В моей предыдущей книге «Вселенная из ничего» описывалось, как революционные открытия последних ста лет изменили наши представления об эволюции Вселенной в самых крупных ее масштабах. Эти изменения привели к тому, что наука начала напрямую заниматься вопросом: «Почему в этом мире существует что-то, а не ничто?»

Прежде он находился на территории религии — и теперь его надо трансформировать в нечто не столь солипсихическое и более практически полезное.

Как и «Вселенная из ничего», эта история тоже родилась из лекции, которую я в свое время прочел, в данном случае в Смитсоновском институте в Вашингтоне; эта лекция вызвала тогда некоторый ажиотаж, и это привело меня к более подробной проработке затронутых в ней идей. В отличие от «Вселенной из ничего», в этой книге я исследую другой конец спектра наших знаний со столь же важными следствиями для разрешения вековых вопросов. Накопившиеся за последние сто лет глубокие изменения в наших представлениях о природе в самых малых ее масштабах позволяют также включить в рассмотрение и другой не менее фундаментальный вопрос: «Почему мы существуем?»

Мы с вами обнаружим, что реальность совершенно не такова, какой мы ее считаем. Под знакомой поверхностью кроются «сверхъестественные», контринтуитивные, невидимые внутренние механизмы, способные в не меньшей степени, чем Вселенная, возникающая из ничего, поставить под сомнение наши давно сложившиеся представления о том, что имеет смысл, а что нет.

И подобно выводу, сделанному мной в предыдущей книге, окончательный урок истории, которую я здесь расскажу, состоит в том, что у мира, в котором мы живем, нет ни очевидного плана, ни цели. Наше существование не было предопределено, но представляет собой удивительную случайность. Мы балансируем на узкой планке, равновесие которой определяется явлениями, лежащими глубоко под поверхностью нашего опыта, — явлениями, которые никоим образом не зависят от нашего существования. В этом смысле Эйнштейн ошибался: «Бог», по-видимому, все же

играет в кости со Вселенной — или со вселенными. До сих пор нам везло. Но, как в любой азартной игре, удача наша, возможно, продлится не вечно.



Человечество сделало серьезный шаг к современности, когда до сознания наших предков дошло, что Вселенная не ограничивается тем, что видно глазу. Понимание этого, вероятно, пришло к ним не случайно. Судя по всему, в нас жестко прошита потребность в объяснении, которое не ограничивается пределами нашего опыта и придает смысл нашему существованию, — потребность, вероятно тесно связанная с возникновением и развитием религиозных верований в ранних человеческих обществах.

Напротив, история подъема современной науки и ее ухода от суеверий — это история о том, как скрытая реальность природы раскрывалась посредством рассуждения и эксперимента в процессе, в котором на первый взгляд разрозненные, странные и порой опасные явления оказались в итоге связанными друг с другом под самой видимой поверхностью. В конечном счете эти обнаруженные связи распугали гоблинов и фей, которые во множестве окружали наших предков.

Открытие связей между разрозненными, казалось бы, явлениями более, чем какой-либо иной признак, указывает на прогресс в науке. Среди множества классических примеров и Ньютон, связавший орбиту Луны с падающим яблоком; и Галилей, сумевший понять, что наблюдаемое разнообразное поведение падающих предметов лишь маскирует тот факт, что на самом деле все они в равной мере притягиваются к земной поверхности; и Дарвин с его эпическим открытием, что все разнообразие жизни на Земле могло произойти от единственного прародителя в результате простого процесса естественного

отбора. Ни одна из перечисленных связей не была очевидной изначально. Однако после того, как связь выходит на свет и проявляется, она вызывает реакцию типа «Ага!», начинает восприниматься как понятная и знакомая. Так и хочется воскликнуть: «Да я и сам должен был догадаться!»

Современная картина природы на самом фундаментальном уровне — Стандартная модель, как ее обычно называют, — столь богата, что глаза разбегаются, она содержит множество связей, очень далеких от сферы повседневного опыта. Настолько далеких, что невозможно без некоторой подготовки сделать рывок и разом все их себе представить.

Неудивительно, что в истории такого рывка тоже не было. Многочисленные замечательные, неожиданные взаимосвязи, казалось бы не имеющие отношения друг к другу, постепенно складывались в ту согласованную картину, которая у нас сегодня имеется. В результате получилась такая хитросплетенная математическая структура, что она кажется почти произвольной. Непосвященным, как правило, меньше всего хочется воскликнуть: «Ага!», услышав про бозон Хиггса или Великое объединение фундаментальных сил природы.

Чтобы заглянуть под поверхностные слои реальности, нужен рассказ, соединяющий известный нам мир с самыми потайными закоулками окружающей нас невидимой реальности. Этот скрытый мир нельзя понять при помощи наших интуитивных представлений, основанных лишь на непосредственно воспринимаемом. Именно такую историю я и хочу здесь рассказать. Мы с вами совершим путешествие к сердцу тех загадок и тайн, что лежат на переднем крае наших представлений о пространстве, времени и действующих в них силах. Моя цель — не спровоцировать или потрясти вас, но подтолкнуть вас к новой реальности, одновременно

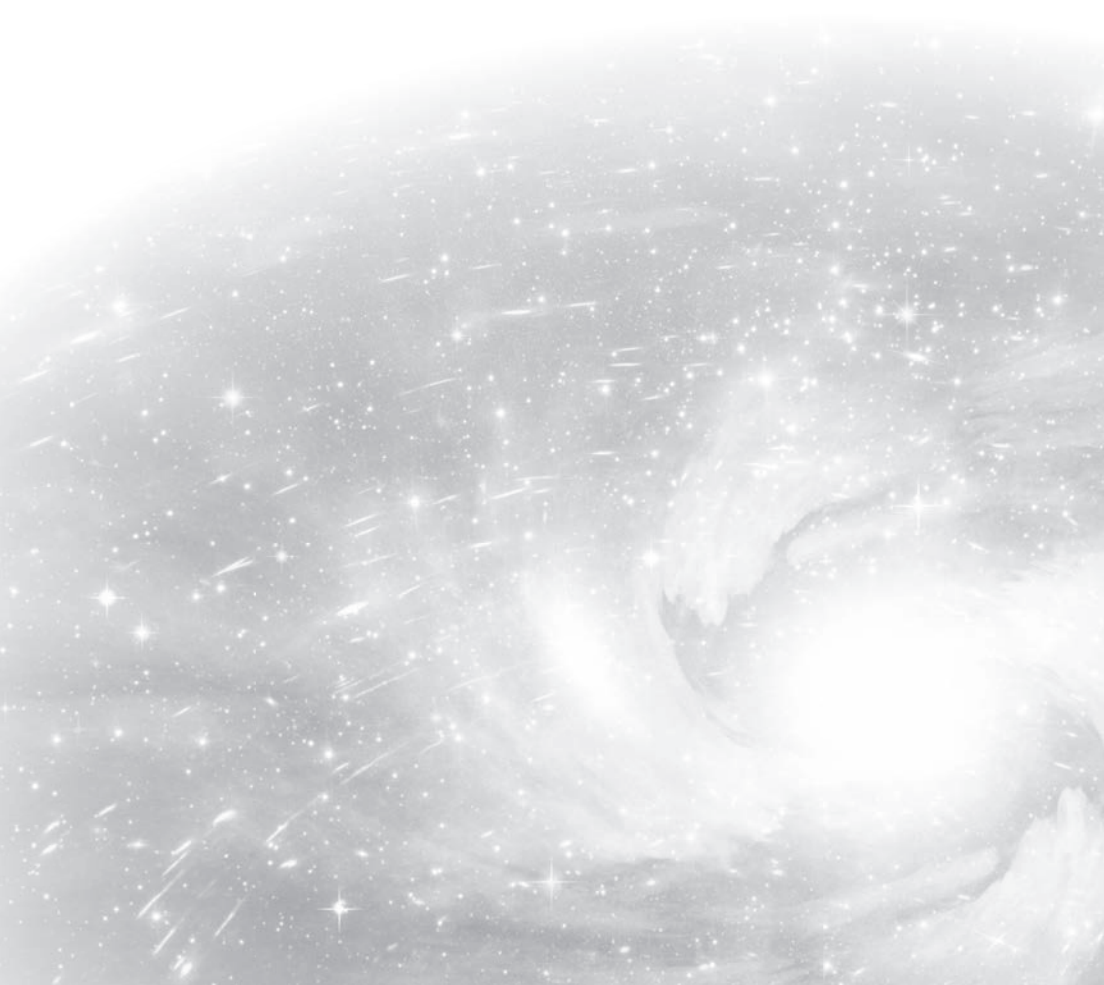
неудобной и возвышающей, подобно тому как научные открытия толкали и тянули к ней самих физиков.

Недавние открытия, касающиеся фундаментальных масштабов природы, пугающе изменили представления о неизбежности нашего присутствия во Вселенной. Кроме того, стало ясно, что будущее наверняка окажется радикально отличным от того, что мы представляли себе прежде, — и это еще сильнее умаляет нашу космическую значимость.

Мы, возможно, предпочли бы отвергнуть эту неудобную и неприятную реальность, эту обезличенную и, по-видимому, случайную Вселенную, но дело в том, что, если взглянуть под другим углом, все это не обязательно покажется столь же печальным. Вселенная, не имеющая цели, — а дело обстоит именно так, насколько я могу судить, — намного интереснее Вселенной, придуманной и созданной исключительно для нас, ведь это означает, что возможности нашего существования намного шире и разнообразнее. Разве не потрясающе оказаться исследователями экзотической кунсткамеры, законы и явления в которой выйдут далеко за рамки того, что прежде казалось самыми дикими нашими фантазиями, и пытаться распутать клубок нашего противоречивого опыта, отыскивая в его основе какой-то здравый смысл и порядок. Разве не увлекательно открывать этот порядок, воссоздавая из фрагментов непротиворечивую картину Вселенной в масштабах, далеко превосходящих все доступное нашему непосредственному восприятию, — картину, сплетенную воедино нашей способностью предсказывать, что произойдет дальше, и благодаря этому управлять окружающей нас средой. Как же нам повезло обрести краткое мгновение жизни под Солнцем! Каждый день, когда мы открываем что-то новое и удивительное, наша история становится еще лучше.

Часть первая

БЫТИЕ



ИЗ ПЛАТЯНОГО ШКАФА — В ПЕЩЕРУ

Невежды получают в удел себе глупость,
а благоразумные увенчаются знанием.

Притчи 14:18

В моем начале был свет.

Конечно, в начале времен свет был, но, прежде чем мы отправимся к началу времен, нам потребуется разобраться в своих собственных началах, что означает также разобраться и в истоках науки. А это означает, что нужно вернуться к главному мотиву и науки, и религии — жажде *чего-то большего*. Чего-то превосходящего мир нашего опыта.

Для многих людей это жажда чего-то придающего смысл и цель Вселенной, переходящая в тоску по некоему скрытому месту, которое было бы *лучше* мира, где мы живем, по месту, где грехи прощены, боль исчезла, а смерти не существует. Другие, однако, тоскуют по тайному месту совершенно иного рода — по физическому миру, недоступному нашим чувствам, миру, помогающему нам понять, скорее как, нежели *почему* все происходит именно так, а не иначе.

Этот скрытый мир лежит в основе того, что мы воспринимаем, и его понимание дает нам силы менять свою жизнь, окружающую среду и наше будущее.

Контраст между двумя этими мирами отражен в двух очень разных литературных произведениях.

Первое из них — «Лев, колдунья и платяной шкаф» К. С. Льюиса — это написанное в XX веке детское фэнтези с отчетливыми религиозными мотивами. В нем описывается детский опыт, пережитый в свое время большинством из нас, — поиск под кроватью, в шкафу или на чердаке тайных сокровищ или свидетельств того, что в мире существует нечто помимо того, что мы обыкновенно видим и ощущаем. В этой книге несколько школьников, забравшись в большой платяной шкаф в сельском доме под Лондоном, куда их эвакуировали из города во время Второй мировой войны, открывают незнакомый новый мир — Нарнию. Дети помогают спасти Нарнию при содействии льва, который, чтобы победить зло в своем мире, отдает себя на поругание и, подобно Христу, жертвует собой: его приносят в жертву на алтаре.

Хотя религиозные аллюзии истории Льюиса очевидны, ее можно интерпретировать и иначе — как аллегорию, но не аллегорию существования Бога или дьявола, а, скорее, как аллегорию замечательных и потенциально ужасающих возможностей неведомого, возможностей, лежащих сразу за пределами наших чувств и только и ждущих, чтобы мы оказались достаточно храбрыми, чтобы отыскать их. Возможностей, которые, будучи раскрытыми, обогатят наши представления о самих себе и дадут тем, кто в этом нуждается, чувство собственной значимости и предназначения.

Портал в скрытый мир в платяном шкафу одновременно безопасен — ведь в шкафу так знакомо пахнет ношенными вещами — и загадочен. Он подразумевает необходимость

выйти за пределы классических представлений о пространстве и времени. Ибо если наблюдателю, находящемуся перед шкафом или позади него, ничего не открывается, а открывается только тому, кто находится внутри, то пространство, воспринятое чувствами внутри шкафа, должно быть намного больше пространства, видимого снаружи.

Подобные свойства присущи вселенной, в которой пространство и время динамичны, как в общей теории относительности, где, к примеру, снаружи «горизонта событий» — сферы, из которой нельзя вырваться, — черная дыра может выглядеть как объект небольшого объема, но для наблюдателя внутри (не раздавленного еще действующими там гравитационными силами) объем может выглядеть совершенно иначе. Не исключено даже, — хотя это и лежит вне той области, где наши теории надежны, — что пространство внутри черной дыры представляет собой портал в другую вселенную, не связанную с нашей.

Однако ключевой момент, к которому я хочу вернуться, состоит в том, что сама возможность существования вселенных за пределами нашего восприятия, похоже, связана — по крайней мере в литературном и философском представлении — с возможностью для самого пространства быть не тем, чем оно кажется.

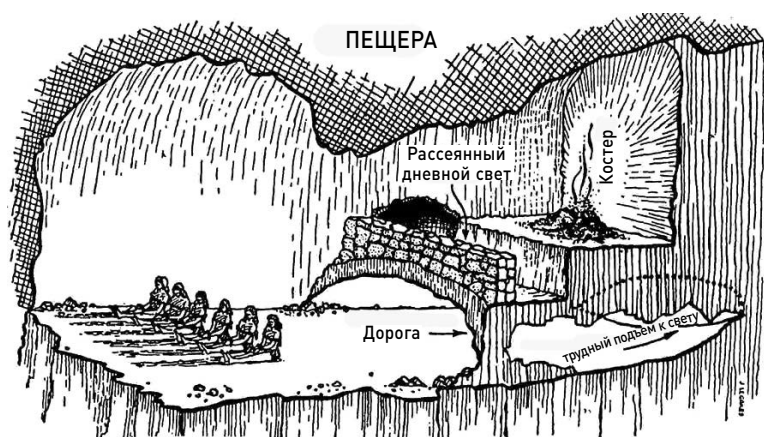
Прототип этого представления — первая, если угодно, подобная история была написана за двадцать три столетия до книги Льюиса. Я имею в виду «Государство» Платона, а точнее, мою любимую его часть — аллегорию пещеры. Несмотря на столь почтенный возраст, это произведение ясно и отчетливо демонстрирует как потенциальную необходимость, так и потенциальные опасности, которые несет поиск понимания за пределами того, что непосредственно доступно нашим органам чувств.

В своей аллегории Платон сравнивает наш опыт восприятия реальности с опытом людей, которых всю жизнь держали в пещере и заставляли смотреть на пустую стену, сидя спиной к выходу. Единственное представление о внешнем мире эти люди получают от стены, которая освещается горящим у выхода из пещеры костром и по которой движутся тени. Тени отбрасываются объектами, которые находятся за спинами людей.

Приведенный здесь рисунок взят из учебника 1961 года с переводами диалогов Платона, в котором я впервые прочел эту аллегорию.

Рисунок весьма забавен, поскольку отражает приметы времени его создания не менее ясно, чем устройство пещеры, описанное в диалоге. Почему, к примеру, все пленники здесь — женщины, причем довольно скудно одетые? Во времена Платона любые сексуальные аллюзии могли одинаково легко выражать как девушки, так и юноши.

Платон утверждает, что пленники в такой ситуации будут рассматривать тени как реальность и даже давать им имена.



Это довольно разумная точка зрения; кроме того, мы скоро увидим, что в определенном смысле это очень современный взгляд на реальность как на то, что мы можем измерить непосредственно. Моим любимым определением реальности по-прежнему остается: «Реальность — это то, что не пропадет, если ты перестанешь в это верить», — данное писателем-фантастом Филипом Диком. Пленники видят только тени. Кроме того, они, скорее всего, слышат лишь эхо тех звуков, которые возникают позади них и отражаются от стены.

Платон сравнивал философа с пленником, которого освобождают от уз и вынуждают, почти против его воли, не только посмотреть на огонь, но и пройти мимо него и выйти наружу, на свет. Поначалу бедняге будет плохо, сияние огня и солнечный свет за пределами пещеры окажутся слишком яркими для его глаз, смотреть будет больно. Все объекты покажутся ему совершенно незнакомыми; они ничем не будут напоминать свои тени. Платон утверждает, что только что освобожденный человек, возможно, будет по-прежнему считать, что тени на стене, к которым он привык, — это более правдивые представления объектов, чем сами объекты, отбрасывающие эти тени.

Если человека против его воли вытащить из пещеры на свет, ощущения замешательства и боли многократно усилятся. Но со временем он привыкнет к реальному миру, увидит звезды, луну и небо, и его душа и разум освободятся от иллюзий, управлявших прежде его жизнью.

Если же этот человек вернется в пещеру, рассуждает Платон, произойдут две вещи. Во-первых, поскольку его глаза уже не будут привычными к темноте, он хуже сможет различать тени и узнавать их, и другие пленники, просидевшие все это время в пещере, увидят в нем в лучшем случае калеку, а в худшем — просто глупца. Во-вторых, он

уже не сможет считать мелкие и близорукие интересы бывшего своего общества или почести, которые достаются тем, кто, возможно, лучше других распознает тени и умеет предсказывать их поведение, достойными уважения. Как поэтически говорит Платон, цитируя Гомера, лучше «как поденщик, работая в поле, службой у бедного пахаря хлеб добывать свой насущный* и скорее терпеть что угодно, только бы не разделять представлений узников и не жить так, как они»**.

Как же много тех, кто жил и живет целиком в иллюзиях! Платон считал, что это большая часть человечества.

Далее рассматриваемая аллегория сопоставляет движение вверх, к свету, с восхождением, которое совершает душа на пути в интеллектуальный мир.

Ясно, что в понимании Платона лишь погружение в сугубо «интеллектуальный мир» — путешествие, которое всегда останется уделом немногих, тех, кого и называют философами, — позволяет перейти от иллюзии к реальности. К счастью, сегодня это путешествие стало намного доступнее — ведь можно использовать научные методы, в которых рассуждения и рефлексия сочетаются с эмпирической проверкой. Тем не менее перед сегодняшними учеными стоит тот же вызов: увидеть, что скрывается за тенями, увидеть то, что не исчезает, когда отбрасываются предубеждения.

* Процитированные слова вложены Гомером в уста тени Ахиллеса, сравнивающего жизнь с пребыванием в царстве мертвых, которые для Платона соотносятся примерно так же, как восприятие реальных объектов и их теней: *Лучше б хотел я живой, как поденщик, работая в поле, / Службой у бедного пахаря хлеб добывать свой насущный, / Нежели здесь над бездушными мертвыми царствовать мертвым.* (Гомер, Одиссея, песнь 11-я. Пер. В. А. Жуковского). — Прим. ред.

** Платон, Государство, книга 7-я. Пер. А. Егунова. — Прим. ред.

Хотя Платон об этом не говорит прямым текстом, ясно, что остальные пленники не просто посчитают достойным сожаления беднягу, который осмелился выйти из пещеры, а затем вернуться назад, но и сочтут его безумцем, если он заговорит о чудесах, которые ему довелось увидеть: о солнце, луне, озерах, деревьях, о других людях и цивилизациях.

Эта мысль поразительно современна. По мере того как границы науки сдвигаются все дальше и дальше от знакомого нам мира, для здравого смысла, порождаемого непосредственным опытом, становится все труднее понять и принять картину реальности, лежащей в основе того, что мы воспринимаем. Некоторым оказывается проще обратиться за помощью к мифу и суеверию.

Но мы имеем все основания ожидать, что «здравый смысл», первоначально развившийся у нас как средство, способное помочь человеку справиться с хищниками в саваннах Африки, может завести в тупик, если попытаться думать о природе на совершенно иных масштабах. Эволюция не подготовила нас к тому, чтобы интуитивно понимать мир очень малых и очень больших размеров или очень больших скоростей. Не следует ожидать, что правила, на которые мы привыкли полагаться в своей повседневной жизни, окажутся универсальными. Хотя такая близорукость была полезна с эволюционной точки зрения, мы, как думающие существа, способны ее преодолеть.

В этом отношении я не могу удержаться и не процитировать последнее поучение из аллегии Платона: «В том, что познаваемо, идея блага — это предел, и она с трудом различима, но стоит только ее там различить, как отсюда напрашивается вывод, что именно она — причина всего правильного и прекрасного. В области видимого она порождает

свет, а в области умопостигаемого она сама — владычица, от которой зависят истина и разумение»*.

Далее Платон утверждает, что те, кто хочет поступать разумно, должны добиваться именно этого как в общественной, так и в частной жизни — стремиться к «благу», сосредоточившись на разуме и истине. Он предполагает, что мы можем делать это только путем исследования реальности, обуславливающей наш непосредственный опыт, а не изучая иллюзии реальности, с которыми нам, возможно, хотелось бы иметь дело. Только через рациональный анализ реального, а не через одну только веру можно прийти к рациональным, или благим, действиям.

Сегодня представления Платона о «чистой мысли» сменил научный метод, который, будучи основан одновременно на разуме и эксперименте, позволяет нам открывать подлинно реальное в основе окружающего мира. Рациональное действие в общественной и частной жизни должно теперь опираться как на рациональное суждение, так и на эмпирическое исследование, а это часто требует отхода от солипсического мира нашего непосредственного опыта. Этот принцип — источник большей части моей собственной общественной деятельности в оппозиции к политике правительства, которая основана скорее на идеологии, чем на объективных данных. Вероятно, именно поэтому я так негативно отзываюсь о концепции «священного», предполагающей, что некоторые идеи и принципы не должны быть предметом публичных сомнений, исследования, обсуждения, а иногда и насмешек.

Трудно изложить эту позицию более четко, чем я сделал это в статье в журнале *The New Yorker*: «Всякий раз, когда

* Там же. — Прим. ред.

научные утверждения представляются как точные и не допускающие сомнений, это подрывает науку. Аналогично, когда религиозные действия или утверждения о святости не встречают противодействия в нашем обществе, мы подрываем основу современной светской демократии. На нас лежит долг перед самими собой и нашими детьми: мы не должны позволять правительствам — тоталитарным, теократическим или демократическим — поддерживать, поощрять, внедрять или иными способами легитимизировать подавление открытых сомнений ради защиты идей, которые считаются “священными”. Пятьсот лет развития науки освободили человечество от оков принудительного невежества».

Но оставим в стороне философские рефлексии. Основная причина, по которой я рассказываю здесь о пещере Платона, состоит в том, что эта аллегория дает конкретный пример природы научных открытий, играющих центральную роль в той истории, которую я хочу вам рассказать.

Представьте, что наши пленники видят на стене следующую тень, которую демонстрирует им злой кукловод, стоящий на уступе перед костром:



У этой тени есть протяженность и направление — это два понятия, которые мы с вами, не запертые в пещере, воспринимаем как нечто само собой разумеющееся.

Однако далее пленники видят, как тень начинает меняться:



Затем она принимает следующий вид:



Потом такой:

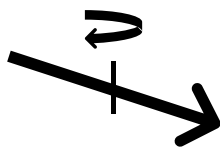


И наконец, такой:



Какой вывод сделают пленники на основании увиденного? По-видимому, для них такие концепции, как протяженность или направление, не имеют абсолютного значения. Объекты в их мире могут произвольно менять и длину, и направленность. В реальности их непосредственного опыта ни длина, ни направленность, похоже, не имеют большого значения.

А что обнаружит естествоиспытатель, сумевший выбраться из пещеры на поверхность, чтобы исследовать более богатый мир по ту сторону теней? Он увидит, что тень — это в первую очередь всего лишь тень: двумерный образ на стене, отбрасываемый реальным трехмерным объектом, расположенным позади пленников. Он увидит, что этот объект имеет фиксированную длину, которая никогда не меняется, и снабжен стрелкой, которая находится всегда на одной и той же стороне объекта. Посмотрев на объект немного сверху, он увидит, что приведенная серия изображений получается в результате проецирования на стену вращающегося флюгера:



Вернувшись в пещеру, чтобы присоединиться к бывшим коллегам, философ-ученый может объяснить, что абсолютная величина, называемая длиной, *не меняется* со временем и что направленность тоже может быть назначена некоторым объектам однозначно. Он скажет своим друзьям, что реальный мир трехмерен, а не двумерен и что стоит им это понять, как все сомнения по поводу произвольных на первый взгляд изменений исчезнут сами собой.

Но поверят ли ему остальные пленники? Ему очень трудно будет их переубедить, потому что они лишены интуитивного представления о том, что такое вращение (в конце концов, с интуицией, основанной исключительно на двумерном опыте, скорее всего, будет трудно «рисовать» мысленно любые вращения в третьем измерении). Что же ждет нашего философа? Непонимающие взгляды? Вероятно. Сумасшедший дом? Возможно. Однако он мог бы взять верх в споре и убедить сообщество, подчеркнув привлекательные качества, связанные с его утверждением: *можно показать, что поведение, которое поверхностному взгляду кажется сложным и произвольным, порождается гораздо более простой базовой картиной природы, а внешне разрозненные явления на самом деле связаны и могут представлять собой части единого целого.*

Что еще лучше, он мог бы сделать предсказания, которые его друзья способны проверить. Во-первых, он мог бы заявить, что если видимое изменение длины тени, измеряемое группой, действительно вызвано вращением объекта

в третьем измерении, то всякий раз, когда протяженность объекта на мгновение исчезает, она сразу же появится вновь, причем со стрелкой, указывающей в противоположном направлении. Во-вторых, он мог бы сказать, что если длина объекта колеблется, то максимальная длина тени со стрелкой, указывающей в одну сторону, всегда будет в точности равна максимальной длине тени со стрелкой, указывающей в другую сторону.

Таким образом, пещера Платона становится аллегорией в гораздо более широком смысле, чем он сам, может быть, предполагал. Освобожденный пленник Платона открывает для себя основные моменты замечательной подлинной истории наших собственных усилий по пониманию природы на самых фундаментальных масштабах пространства, времени и вещества. Нам тоже пришлось освободиться от оков прежнего опыта, чтобы открыть глубокие и красивые упрощения и предсказания, способные оказаться столь же ужасающими, сколь и чудесными.

Но, хотя свет за пределами Платоновой пещеры поначалу больно бьет по глазам, со временем он начинает завораживать. Тому, кто раз увидел его, уже нет пути назад.

Глава 2

ВИДЕТЬ В ТЕМНОТЕ

Да будет свет: и стал свет.

Бытие 1:3

В начале был свет.

Тот факт, что в Книге Бытия древние авторы объявили, что свет был создан в первый день, вовсе не случайность и не совпадение. Без света вряд ли можно было бы осознать, насколько обширная Вселенная нас окружает. Когда американец кивает и говорит приятелю, который пытается что-то ему объяснить: «Я вижу» (I see), он имеет в виду не зрительные впечатления, а скорее некое фундаментальное понимание.

Аллегория Платона, кстати говоря, тоже построена вокруг света — света костра, который нужен для того, чтобы отбрасывать тени на стену пещеры, и света снаружи, который на время ослепляет освобожденного пленника, а затем освещает для него реальный мир. Подобно пленникам в пещере, мы все являемся пленниками света — почти всё, что нам известно о мире, мы узнаём благодаря зрению.

Хотя самыми, возможно, значительными словами в западном религиозном каноне являются слова: «Да будет

свет!», в современном мире эта фраза приобрела совершенно иное значение, чем то, что в нее когда-то вкладывалось. Возможно, человеческие существа и правда являются пленниками света, но таким же пленником света является и Вселенная. То, что когда-то появилось по прихоти иудео-христианского Бога или других богов до него, мы сегодня рассматриваем как необходимость, обусловленную фундаментальными законами, которые делают возможным существование и небес, и, что еще важнее, тверди. Одно невозможно без другого. Твердь, или вещество, следует за светом.

Эта смена перспективы лежит в основе чуть ли не каждого шага в построении величественного здания современной науки. Я пишу эти слова на палубе судна возле одного из Галапагосских островов, которые прославил Чарльз Дарвин и которые, в свою очередь, прославили его, когда он изменил наше представление о жизни и ее разнообразии одним блестящим озарением: он понял, что все виды живых существ развились путем естественного отбора небольших наследуемых изменений, которые выжившие особи передают последующим поколениям. Как понимание эволюции бесповоротно изменило наши представления о биологии, так и проникновение в тайны света перевернуло представление о нашем месте во Вселенной с точки зрения физики. В качестве полезного побочного продукта это изменение принесло нам практически все технологические достижения, без которых немислим современный мир.

Понять, насколько непосредственное наблюдение внешнего мира поработает ум и в какие жесткие рамки оно загоняет наши представления о ткани Вселенной, удалось только через две с лишним тысячи лет после Платона. С того момента, как величайшие умы стали досконально исследовать скрытую природу Вселенной, им потребовалось

более четырех столетий, чтобы полностью разрешить вопрос о том, что представляет собой свет.

Возможно, самым значительным из современных мыслителей, хотя, конечно же, не первым из тех, кто задался этим вопросом, был один из самых знаменитых (и самых необычных) ученых в истории — Исаак Ньютон. Мы имеем полное право называть Ньютона современным мыслителем — в конце концов, его написанные в XVII веке «Математические начала натуральной философии» открыли для человечества классические законы движения и заложили основу для его же теории всемирного тяготения; то и другое вместе образует фундамент значительной части современной физики. Тем не менее, как указывал Джон Мейнард Кейнс,

Ньютон не был первым представителем века разума, он был последним из магов, последним из вавилонян и шумеров, последним великим мыслителем, смотревшим на видимый и мыслимый мир теми же глазами, какими смотрели те, кто тысячи лет назад начал выстраивать наше интеллектуальное достояние.

Истинность этого утверждения отражает революционную значимость работ Ньютона. После его «Начал» ни один разумный человек уже не мог видеть мир таким, каким его видели древние. Но она отражает также и характер самого Ньютона. Он тратил гораздо больше времени — и гораздо больше чернил — на труды по оккультным вопросам и алхимии, на поиск скрытых смыслов и шифров в Библии, чем на труды по физике. Особенно его интересовали Откровение Иоанна Богослова и загадки, связанные с древним храмом Соломона.

Ньютон был также представителем длинного ряда людей, — ряда, начавшегося задолго до Ньютона и продолжившегося после, — считавших, что они особо избраны Господом раскрыть человечеству подлинный смысл Писания. Неясно, насколько его физические исследования и изучение Вселенной были связаны с одержимостью Библией, но кажется разумным предположить, что первичным для Ньютона был интерес к теологии, а натуральная философия занимала в ряду его интересов место намного ниже теологии и, вероятно, даже алхимии.

Многие указывают на ньютоновское восхищение Богом как на доказательство совместимости науки и религии и пытаются с его помощью утверждать, что современная наука своим существованием обязана христианству. Утверждать так означает путать историю с причинностью. Невозможно отрицать, что многие ранние гиганты современной западной натуральной философии, начиная с Ньютона, были глубоко религиозными людьми, хотя Дарвин, к примеру, к концу жизни растерял большую часть своей религиозной веры, если не всю ее. Но не стоит забывать, что на протяжении значительной части этого периода существовало лишь два основных источника образования и богатства: Церковь и Корона. Именно Церковь была национальным научным фондом XV, XVI и XVII столетий. Все институты высшего образования были связаны с той или иной конфессией, и любому образованному человеку было немислимо полностью разорвать связь с Церковью. И, как убедились на собственном опыте Джордано Бруно и позже Галилей, противоречить церковной доктрине было как минимум неприятно. Для любого из ведущих научных мыслителей той эпохи нерелигиозность была бы чем-то из ряда вон выходящим.

Религиозность ранних пионеров науки сегодня часто упоминается философами, которые защищают совместимость науки и религии, но при этом путают науку и ученых. Хотя внешне часто это выглядит иначе, ученые — тоже люди. И как все люди, они способны одновременно держать в голове множество потенциально противоречащих друг другу идей. Никакая корреляция между расходящимися представлениями, уживающимися в одном человеке, не говорит ни о чем, кроме человеческих слабостей.

Говорить о том, что некоторые ученые религиозны или были религиозны, — то же самое, что говорить, что некоторые ученые — сторонники республиканцев, или адепты теории плоской Земли, или креационисты. Все это не подразумевает ни причинно-следственной, ни логической связи. Мой друг Ричард Докинз рассказывал мне как-то о профессоре астрофизики, который днем пишет статьи, публикуемые в астрономических журналах и строящиеся на представлении о Вселенной, существующей более 13 млрд лет, а вечером возвращается домой и в частном порядке проповедует буквальное библейское утверждение о том, что Вселенная была создана всего шесть тысяч лет назад.

В науке интеллектуальная цельность или отсутствие таковой определяется сочетанием рациональных аргументов с полученными в дальнейшем данными и длительной проверкой. Вполне оправданно утверждать, что религия в Западном мире является, возможно, матерью науки. Но, как все мы знаем, дети редко вырастают копиями своих родителей.

Возможно, Ньютон, следуя традиции, заинтересовался светом именно потому, что считал его даром Божьим. Но мы помним его труды не благодаря такой мотивации, а благодаря результату, благодаря тому, что он открыл.

Ньютон был убежден, что свет состоит из частиц, которые он называл корпускулами, тогда как и Декарт, и постоянный соперник позднего Ньютона Роберт Гук, а еще позже голландский ученый Христиан Гюйгенс утверждали, что свет — это волны. Одним из ключевых наблюдений, подтверждавших, на первый взгляд, волновую теорию света, было то, что белый свет (к примеру, солнечный) расщепляется на все цвета радуги, если пропустить его через призму.

Как часто случалось в жизни Ньютона, он был убежден в собственной правоте и считал, что сразу несколько известнейших его современников (и соперников) ошибаются. Чтобы продемонстрировать это, он придумал хитроумный эксперимент с использованием призм: в первый раз Ньютон провел этот эксперимент дома, в Вулсторпе, где переживал свирепствовавшую в Кембридже бубонную чуму. Как он докладывал в Королевском обществе в 1672 г., на сорок четвертой попытке он пронаблюдал ровно то, что надеялся увидеть.

Сторонники волновой теории утверждали, что световые волны состоят из белого света и при прохождении сквозь призму свет расщепляется на цвета потому, что лучи «портятся» при прохождении сквозь стекло. Если это так, то чем больше стекла на пути света, тем сильнее он должен расщепляться.

Ньютон рассуждал иначе. Он считал, что свет состоит из разноцветных частиц, которые в совокупности кажутся белыми. (Отталкиваясь от своего увлечения оккультизмом, Ньютон классифицировал цветные частицы спектра — этот термин пустил в оборот именно он — по семи категориям: красные, оранжевые, желтые, зеленые, голубые, синие и фиолетовые. Ведь еще со времен древних греков считалось, что число семь обладает мистическими свойствами.)

Чтобы продемонстрировать ошибочность волновой теории, где свет портился при прохождении сквозь стекло, Ньютон пропустил луч белого света сквозь две призмы, установленные строго в противоположной ориентации. Первая призма расщепила свет с появлением спектра, а вторая вновь собрала его в единый белый луч. Если бы стекло портило свет, получить такой результат было бы невозможно. Вторая призма только ухудшила бы ситуацию и не смогла заставить свет вернуться в первоначальное состояние.

На самом деле этот результат вовсе не опровергает волновую теорию света (мало того, он скорее подтверждает ее, поскольку свет замедляется, меняя направление при входе в стекло, подобно тому как это делают и волны). Но, поскольку сторонники волновой теории утверждали (ошибочно), что спектральное расщепление обусловлено порчей света, демонстрация Ньютона, ясно показавшая, что это не так, нанесла сильный удар по волновой теории и укрепила позиции его собственной корпускулярной модели.

Ньютон продолжил работу со светом, открыв немало других его особенностей, на которых основывается наше сегодняшнее понимание волновой природы света. Он показал, что каждый цвет света при прохождении сквозь стеклянную призму имеет собственный уникальный угол преломления. Ньютон показал также, что при освещении объектов цветным лучом все они кажутся того же цвета, что и освещающий их луч. Еще он показал, что цветной свет не меняет свой цвет, сколько бы раз ни отражался или ни проходил через призму.

Все результаты Ньютона, включая и первоначальный, можно объяснить очень просто, если считать, что белый свет действительно представляет собой набор различных цветов, — это он понял верно. Но их невозможно

объяснить, если считать, что свет состоит из разноцветных частиц. На самом деле правильнее сказать, что свет состоит из волн разной длины.

Оппоненты Ньютона не собирались сдаваться, несмотря даже на растущую популярность Ньютона и смерть его главного соперника Гука. Они не сдались даже после избрания Ньютона президентом Королевского общества в 1703 г. — в том самом году, когда он опубликовал наконец результаты своих исследований по свету в грандиозном труде «Оптика». Более того, споры о природе света продолжали бушевать еще целый век.

Проблема волновой картины света отчасти заключалась в вопросе: «Волной *чего*, собственно, является свет?» И если свет — волна, то, поскольку все известные волны требуют для своего распространения какой-то среды, в какой именно среде распространяется световая волна? Эти вопросы ставили всех в тупик настолько, что сторонникам волновой теории пришлось вновь возродить идею некоей невидимой субстанции, пронизывающей все пространство, — идею эфира.

Решение этой головоломки, как часто бывает в подобных ситуациях, пришло из совершенно неожиданного уголка физического мира — уголка, полного искр и вращающихся колес.

Когда я стал молодым профессором Йельского университета, мне повезло получить в свое распоряжение громадный старинный кабинет, освободившийся после ухода в отставку столь же почтенного возраста коллеги, который оставил висящую на стене фотографию Майкла Фарадея, сделанную в 1861 г. С тех пор я бережно храню ее.

Меня не привлекает культ героев, но если бы привлекал, то Фарадей оказался бы в моем списке героев в числе

первых. Возможно, именно ему больше, чем любому другому ученому XIX века, мы обязаны технологиями, приводящими в движение нашу нынешнюю цивилизацию. При этом он не имел почти никакого формального образования и в четырнадцать лет стал учеником переплетчика. Много позже, получив уже всемирное признание за вклад в науку, он продолжал держаться своих скромных корней; Фарадей отказался от рыцарского звания и дважды — от поста президента Королевского общества. Позже он отказался консультировать британское правительство по вопросу производства химического оружия для использования в Крымской войне, сославшись на этические соображения. Кроме того, на протяжении более чем тридцати трех лет читал в Королевском институте серию рождественских лекций, призванных внушить молодым людям интерес к естественным наукам. Можно ли этим не восхищаться?

Хотя как человек Фарадей заслуживает всяческого уважения, для нашего рассказа важен ученый. Первый научный урок Фарадея, о котором я всегда рассказываю своим студентам, звучит так: всегда старайтесь угодить своим профессорам. В возрасте двадцати лет Фарадей, отработав семь лет подмастерьем переплетчика, стал посещать лекции знаменитого химика Хэмфри Дэви, тогдашнего главы Королевского института. После цикла лекций Фарадей преподнес Дэви красиво переплетенную книгу в триста страниц, содержащую сделанные Фарадеем конспекты лекций. Не прошло и года, как Фарадей стал секретарем Дэви, а вскоре после этого получил место ассистента-химика в Королевском институте. Позже Фарадей узнал, что бывает, если поступить противоположным образом. После серии ранних, но весьма значительных проведенных им экспериментов Фарадей сгоряча забыл, публикуя результаты,

отметить вклад Дэви. Именно этой случайной обидой объясняется, вероятно, то, что Дэви перевел Фарадея на другие работы и тем самым на несколько лет задержал его исследования, которым суждено было изменить мир.

До перевода на другой участок Фарадей работал в «горячей» области научных исследований: вдохновившись результатами датского физика Ханса Кристиана Эрстеда, он изучал новооткрытые связи между электричеством и магнетизмом. Эти две силы кажутся совершенно разными, но обладают странными сходными чертами. Электрические заряды могут притягиваться или отталкиваться. То же делают и магниты. Но при этом у магнитов, судя по всему, всегда имеется по два полюса — северный и южный, которые невозможно отделить друг от друга и изолировать, тогда как электрические заряды могут быть положительными или отрицательными по отдельности.

Ученые и философы уже некоторое время задумывались над тем, нет ли каких-то скрытых связей между этими двумя силами, и первое эмпирическое свидетельство этого обнаружил Эрстед, по существу случайно. В 1820 г., читая лекцию, он заметил, что стрелка компаса отклоняется от направления север — юг, когда рядом включается электрический ток от батареи. Через несколько месяцев Эрстед продолжил свои наблюдения и обнаружил, что поток движущихся электрических зарядов, который мы сегодня называем просто электрическим током, порождает магнитное притяжение, заставляющее стрелку компаса вставать по касательной к окружности, проведенной вокруг провода с током.

Так Эрстед проторил новую тропу. Среди ученых известия распространяются быстро; новость разошлась по континенту, затем перелетела Ла-Манш. Движущиеся

электрические заряды порождают магнитную силу. Может быть, есть и другие связи? Могут ли магниты, в свою очередь, оказывать влияние на электрические заряды?

Некоторое время ученые безуспешно занимались поисками такой возможности. Дэви и один из его коллег пытались построить электрический двигатель на основе обнаруженной Эрстедом связи, но не преуспели в этом. Фарадей же в конечном итоге заставил проводник с протекающим в нем током двигаться вокруг магнита, в результате чего действительно получил своего рода примитивный мотор. Именно об этом интереснейшем открытии он сообщил без упоминания имени Дэви.

Следует признать, что отчасти это «открытие» было просто забавным трюком. Фарадей не открыл здесь никаких новых фундаментальных явлений. Возможно, именно эта история послужила рациональной основой для одного из моих любимых исторических анекдотов о Фарадее (скорее всего, недостоверного). Рассказывают, что Уильям Глэдстоун, позже ставший премьер-министром Британии, услышал про лабораторию Фарадея, полную странных причудливых устройств, и задал в 1850 г. вопрос о том, какую практическую ценность имеют все эти исследования электричества. Фарадей, как утверждается, ответил на это: «Вполне возможно, сэр, что скоро вы сможете обложить это налогом».

Достоверна эта история или нет, в остроумном ответе экспериментатора содержится одновременно и великая ирония, и великая истина. Исследования, движимые человеческим любопытством, могут показаться занятием эгоистичным и далеким от сиюминутной общественной пользы. Однако, по существу, все наше нынешнее качество жизни (для тех, конечно, кто живет в так называемом первом

мире), включая и электричество, питающее чуть ли не все используемые нами устройства, представляет собой плоды именно таких исследований.

Через два года после смерти Дэви в 1829 г. и через шесть лет после того, как Фарадей стал директором лаборатории Королевского института, он сделал открытие, навсегда закрепившее за ним репутацию величайшего физика-экспериментатора XIX столетия, — он открыл магнитную индукцию. Начиная с 1824 г. он пытался понять, может ли магнетизм изменять ток, идущий по расположенному рядом проводнику, или иным способом порождать электродвижущую силу, действующую на заряженные частицы. В первую очередь он хотел понять, может ли магнетизм порождать электричество, подобно тому, как, согласно исследованиям Эрстеда, электричество (и, в частности, электрический ток) порождает магнетизм.

28 октября 1831 г. Фарадей записал в лабораторном журнале замечательное наблюдение. В момент щелчка тумблера, включающего ток в проводе, намотанном на железное кольцо, чтобы намагнитить железо, возникал короткий всплеск тока в другом проводнике, намотанном на то же самое железное кольцо. Было ясно, что простое присутствие поблизости магнита не могло вызвать электрический ток в проводнике, но вот включение и выключение этого магнита — могло. Немного позже Фарадей показал, что эффект наблюдается и в том случае, когда магнит движется вблизи проводника. Когда магнит приближается к проводу или удаляется от него, в проводе возникает ток. Точно так же, как движущийся заряд становится магнитом, движущимся магнитом — или магнитом переменной силы — каким-то образом порождает электродвижущую силу и ток в близлежащем проводнике.

Если глубокие теоретические следствия из этого простого и удивительного факта не очевидны вам с первого взгляда, можно это простить, поскольку следствия эти весьма тонкие и для их понимания потребовался величайший теоретический ум XIX столетия.

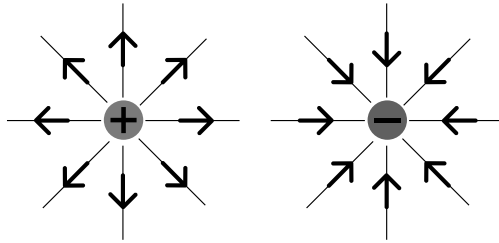
Чтобы как следует обозначить проблему, нам необходима концепция, которую ввел сам Фарадей. Он почти не имел формального образования и был практически самоучкой, а потому всегда испытывал трудности с математикой. В другом, также, вероятно, недостоверном анекдоте ученый даже хвастался тем, что во всех своих публикациях лишь однажды использовал математическое уравнение. Разумеется, он никогда не описывал свое важнейшее открытие магнитной индукции на математическом языке.

Из-за проблем с абстрактной математикой Фарадей вынужден был думать в картинках и воспринимать физические законы, стоящие за его наблюдениями, интуитивно. В результате он сформулировал идею, ставшую краеугольным камнем всей современной физической теории, и решил загадку, мучившую Ньютона до конца дней.

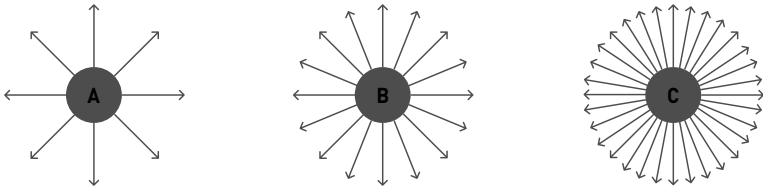
Фарадей спрашивал себя: как один электрический заряд «узнаёт» о присутствии на некотором расстоянии другого электрического заряда, чтобы на него отреагировать? Этим же вопросом в отношении гравитации задавался в свое время и Ньютон: как Земля «узнаёт», что надо именно так отзываться на гравитационное притяжение Солнца? Как гравитационная сила передается от одного тела к другому? На это Ньютон дал свой знаменитый ответ: «*Hypotheses non fingo*» («Гипотез не измышляю»), имея в виду, что он сформулировал закон, определяющий силу притяжения между телами, показал, что его предсказания соответствуют наблюдениям, и этого достаточно. Впоследствии многие из нас,

физиков, прибегали к подобной защите, когда нас просили объяснить различные странные физические результаты, особенно в квантовой механике, где математика работает, а вот физическая картина зачастую выглядит безумно.

Фарадей вообразил, что каждый электрический заряд может быть окружен электрическим «полем», которое вполне можно мысленно представить. Он видел это поле как пучок линий, радиально расходящихся от заряда. Линии поля, по идее, следовало снабдить стрелками, указывающими наружу, если заряд положителен, и внутрь, если отрицателен.

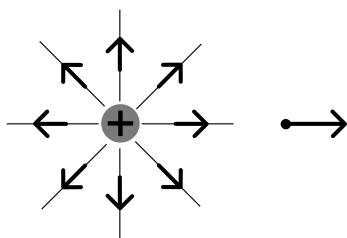


Далее он представил себе, что число линий поля увеличивается с ростом величины заряда.

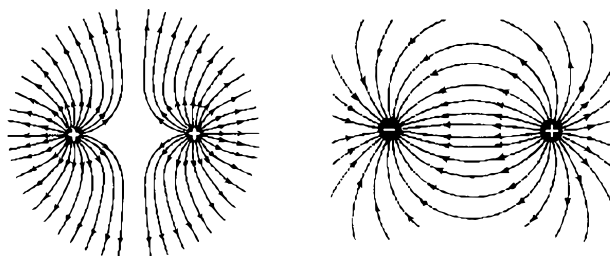


Теперь благодаря этим мысленным картинкам Фарадей мог интуитивно представить, что произойдет, если поднести к этому заряду другой заряд, пробный, и почему должно произойти именно это. (Всякий раз, когда я употребляю

разговорное вопросительное слово «почему», я на самом деле подразумеваю «каким образом».) Пробный заряд должен почувствовать «поле» первого заряда, где бы этот пробный заряд ни находился, причем величина силы взаимодействия будет пропорциональна числу линий поля в соответствующей области, а направлена эта сила будет вдоль линий поля. Так, к примеру, здесь тестовый заряд будет отталкиваться в указанном направлении.



С картинками Фарадея можно делать не только это. Представьте два заряда, помещенных рядом друг с другом. Поскольку линии поля начинаются на положительном заряде, а заканчиваются на отрицательном и к тому же никогда не пересекаются, интуитивно почти понятно, что линии поля между двумя положительными зарядами должны отталкивать друг друга и, соответственно, раздвигаться, тогда как между положительным и отрицательным зарядами они должны соединяться между собой.



Опять же, если где-то поблизости от этих двух зарядов поместить пробный заряд, на него будет действовать сила, направленная вдоль этих линий поля и пропорциональная по величине числу линий в соответствующей области.

Таким образом, Фарадей наглядно изображал природу электрических сил, действующих между частицами, что освобождало его от необходимости решать алгебраические уравнения, описывающие электрические силы. И что самое поразительное в этих картинках — математика в них отражена точно, а не приближенно.

Аналогичный графический способ отображения можно применить и к магнитам с магнитными полями, представляющими силы взаимодействия между магнитами (их экспериментально подтвердил Кулон), и к проводникам с током (законы взаимодействия для них вывел Андре-Мари Ампер). (До Фарадея все основные исследования законов электричества и магнетизма осуществлялись французами.)

Воспользовавшись этими ментальными костылями, мы можем попробовать заново описать открытое Фарадеем явление магнитной индукции следующим образом: возрастание или убывание числа линий магнитного поля, проходящих через проволочную рамку, вызовет в ней появление тока.

Фарадей быстро понял, что его открытие даст возможность преобразовывать механическую энергию в электрическую. Если прикрепить проволочную рамку к лопасти, которую заставляет вращаться, скажем, сила текущей воды, как в случае водяного колеса, и все это вместе окружить магнитом, то при повороте лопасти число линий магнитного поля, проходящих сквозь рамку, будет непрерывно меняться и в рамке станет постоянно возбуждаться ток.

Вуаля — дальше идут Ниагарский водопад, гидроэнергетика и современный мир!

Одного этого было бы вполне достаточно, чтобы закрепить репутацию Фарадея как величайшего физика-экспериментатора XIX века. Но Фарадея мотивировала не технология как таковая, что еще возвышает его в моих глазах; больше всего я уважаю его за глубокое благоговение перед тайнами природы и готовность делиться своими открытиями со всеми, кто пожелает. Я уверен, он согласился бы, что главная польза, приносимая наукой, — изменение наших фундаментальных представлений о месте человека в мироздании. И в конечном итоге именно в этом был результат деятельности Фарадея.

Не могу не вспомнить о другом великом физике-экспериментаторе, более близком к нам по времени, — о Роберте Уилсоне, который уже в возрасте двадцати девяти лет возглавил Исследовательский отдел в Лос-Аламосе, где в ходе Манхэттенского проекта разрабатывалась атомная бомба. Много лет спустя он стал первым директором Национальной ускорительной лаборатории имени Ферми в Батавии (штат Иллинойс). Когда Лаборатория Ферми еще строилась, в 1969 г. Уилсона вызвали в конгресс, чтобы он обосновал необходимость расходования значительных сумм на этот экзотический новый ускоритель, который должен был исследовать фундаментальные взаимодействия элементарных частиц. На вопрос о том, полезен ли будет этот ускоритель для национальной безопасности (что с легкостью оправдало бы расходование средств в глазах членов комитета конгресса), он храбро ответил: «Нет», — но:

Он имеет отношение всего лишь к тому уважению, с которым мы относимся друг к другу, к человеческому

достоинству, к нашей любви к культуре... Он имеет отношение к вопросу о том, являемся ли мы хорошими художниками, хорошими скульпторами, великими поэтами. Я имею в виду все то, что мы по-настоящему почитаем и перед чем преклоняемся в нашей стране, к чему чувствуем патриотизм. В этом смысле это новое знание тесно связано с честью и страной, но оно не имеет прямого отношения к защите нашей страны и только помогает сделать ее достойной защиты.

Открытия Фарадея позволили сформировать и обеспечить энергией нашу цивилизацию, осветить наши города и улицы, запитать наши электрические устройства. Трудно представить себе другое открытие, глубже укорененное в структуру современного общества. Но еще важнее и глубже — и, кстати говоря, именно это делает вклад Фарадея в нашу историю таким значительным — то, что он обнаружил недостающую деталь головоломки, изменившую наши представления буквально обо всем в физическом мире, начиная с самого света. Если Ньютон был последним магом, то Фарадей — это последний из современных ученых, живший во тьме, если говорить о природе света. После его работ ключ к пониманию истинной природы нашего главного окна в окружающий мир лежал у всех на виду и ждал только подходящего человека, который бы его поднял.



Не прошло и десяти лет, как молодой шотландский физик-теоретик, которому долго не везло, сделал следующий шаг.

СВЕТ СКВОЗЬ СТЕКЛО ЯСНОЕ

Не бывает ничего слишком чудесного, чтобы не быть правдой, если только это согласуется с законами природы; а в делах, подобных этим, эксперимент — лучшая проверка такого согласия.

Фарадей, запись № 10 040 в лабораторном журнале
(18 марта 1849 г.)

Величайший физик-теоретик XIX столетия Джеймс Кларк Максвелл, которого Эйнштейн позже сравнит с Ньютоном по степени влияния на физику, по случайному совпадению родился в тот самый год, когда Майкл Фарадей совершил великое экспериментальное открытие — обнаружил магнитную индукцию.

Подобно Ньютону, Максвелл тоже начал свою научную карьеру с острого интереса к цвету и свету. Ньютон исследовал спектр видимых цветов, на которые расщепляется белый свет, проходя сквозь призму, но Максвелл, будучи еще студентом, исследовал обратный вопрос: каков минимальный набор первичных цветов, способный воспроизвести для человеческого глаза все видимые цвета, содержащиеся в белом свете? При помощи набора цветных волчков он

показал, что, по существу, все воспринимаемые нами цвета можно получить из смеси красного, зеленого и синего — факт, известный всякому, кто хоть раз втыкал RGB-кабель в разъем цветного телевизора. Максвелл воспользовался этим, чтобы изготовить первую в мире, еще очень несовершенную, цветную фотографию. Позже он заинтересовался поляризованным светом, который получается из световых волн, электрическое и магнитное поля которых колеблются только в определенных направлениях. Он зажимал бруски желатина между поляризующими призмами и пропускал через них свет. Если две призмы были ориентированы таким образом, чтобы пропускать только свет, поляризованный в разных, взаимно перпендикулярных направлениях, то при размещении их друг за другом никакой свет через них не проходил. Однако если в желатине между призмами имелись напряжения, то плоскость поляризации света немного поворачивалась при прохождении через вещество, так что некоторое количество света проходило и сквозь вторую призму. Наблюдая эти остатки света, проходящие через вторую призму, Максвелл получил возможность исследовать напряжения в веществе. Сегодня этот метод стал полезным инструментом поиска возможных механических напряжений в сложных структурах.

Даже эти хитроумные эксперименты не вполне отражают ненасытный интеллект Максвелла или его математические способности, проявившиеся удивительно рано. Печально, что Максвелл умер в возрасте всего сорока восьми лет, но и за такой короткий срок он успел сделать необычайно много. Его любознательная натура наглядно отражена в нескольких фразах, которые его мать добавила к письму его отца к свояченице, написанном, когда Максвеллу было всего три года:

Это очень счастливый человек, он многому научился с тех пор, как погода успокоилась; он обожает возиться с дверями, замками, ключами и тому подобное, то и дело от него слышится: «Покажи мне, как это делают». Кроме того, он исследует скрытые пути ручьев и проволоки от звонков и способ, каким вода попадает из пруда к нам через стенку.

После безвременной смерти матери (от рака желудка, жертвой которого станет позже и он сам, в том же возрасте) его обучение прервалось, но к тринадцати годам он нашел свой путь и учился в престижной Эдинбургской академии, где завоевал награду по математике, а также по английскому языку и поэзии. Именно тогда Максвелл опубликовал свою первую научную работу о свойствах математических кривых; она была представлена в Королевском обществе Эдинбурга, когда автору было всего четырнадцать лет.

В университете после этого раннего старта Максвелл буквально расцвел. Он получил диплом Кембриджа и менее чем через год — намного раньше, чем это происходит обычно, — стал членом совета своего колледжа. Вскоре после этого он ушел из университета* и вернулся в родную Шотландию, чтобы принять кафедру натуральной философии в Абердине.

Он возглавил ее в двадцать пять лет и преподавал по пятнадцать часов в неделю, а сверх того читал дополнительную бесплатную лекцию в соседнем колледже для работающих студентов (сегодня это было бы неслыханно для профессора, возглавляющего кафедру; мне вообще трудно представить, что при такой нагрузке у меня, к примеру, оставалась бы

* Члены совета Тринити-колледжа давали обет безбрачия. Максвелла исключили из совета после его женитьбы в 1858 г. — *Прим. ред.*

еще энергия на исследования). Тем не менее Максвелл на-шел время, чтобы решить задачу, над которой ученые бились больше двух столетий: как сохраняют устойчивость кольца Сатурна? Он пришел к выводу, что кольца должны состоять из мелких частиц, что принесло ему крупный приз, объявлен-ный с целью стимулирования исследований по этому вопросу. Через сто с лишним лет, когда «Вояджер» прислал на Землю первые снимки этой планеты с близкого расстояния, теория Максвелла полностью подтвердилась.

Можно было бы подумать, что столь замечательные ре-зультаты позволяли Максвеллу чувствовать свою профессор-скую позицию неуязвимой. Однако в 1860 г. — в том же году, когда Королевское общество удостоило его престижной ме-дали Румфорда за работы по цвету, — колледж, где он читал лекции, объединился с другим колледжем, и нужда в двух профессорах натуральной философии отпала. Максвелла бесцеремонно отправили в отставку, и это научно-админи-стративное решение может считаться одним из самых тупых в истории (а там, поверьте, есть из чего выбирать). Он попы-тался получить кафедру в Эдинбурге, но и это место доста-лось другому кандидату. В конце концов ему удалось найти место на юге страны, в лондонском Королевском колледже.

Можно было бы ожидать от Максвелла разочарования или подавленности таким ходом событий, но, если что-то такое и было, на его работе это никак не отражалось. Сле-дующие пять лет в Королевском колледже стали самым про-дуктивным периодом его жизни. За это время он успел из-менить мир, причем четырежды.

Первыми тремя достижениями были: создание цветной фотографии; разработка теории поведения частиц газа (что заложило фундамент такой научной области, как статисти-ческая физика, которая необходима для понимания свойств

вещества и излучения); наконец, разработка «метода размерностей» — инструмента, которым, наверное, чаще всего пользуются современные физики для установления глубоких связей между физическими величинами. Я сам использовал его в прошлом году вместе с коллегой Фрэнком Вильчеком, чтобы продемонстрировать одно фундаментальное свойство гравитации, важное для понимания происхождения Вселенной.

Каждого из этих достижений в отдельности было бы достаточно, чтобы надежно обеспечить Максвеллу место среди величайших физиков своего времени. Однако его четвертое достижение полностью изменило все, включая наши представления о пространстве и времени.

В период пребывания в Королевском колледже Максвелл часто бывал в Королевском институте. Там он познакомился с Майклом Фарадеем, который был на сорок лет старше, но по-прежнему полон идей. Возможно, эти встречи побудили Максвелла вновь перенести фокус своего внимания на интереснейшие новые открытия в области электричества и магнетизма, где он пятью годами ранее начинал исследования. Максвелл воспользовался своим немалым математическим талантом, чтобы описать открытые Фарадеем явления и разобраться в них. Он начал с того, что подвел под гипотетические силовые линии Фарадея более прочную математическую основу, что позволило ему глубже исследовать открытую Фарадеем индукцию. За двенадцать лет, с 1861 по 1873 г., Максвелл создал свою величайшую работу — полную теорию электричества и магнетизма.

Воспользовавшись открытием Фарадея как ключом, он показал, что отношения между электричеством и магнетизмом симметричны. Из экспериментов Эрстеда и Фарадея явствовало, что поток движущихся зарядов порождает

магнитное поле и что изменяющееся магнитное поле (при движении магнита или просто при включении электрического тока, что тоже проявляется как магнит) порождает электрическое поле.

Впервые Максвелл выразил эти результаты математически в 1861 г., но вскоре понял, что его уравнения неполны. Магнетизм в них выглядел иначе, чем электричество. Движущиеся заряды порождали магнитное поле, но магнитное поле могло порождать электрическое даже без движения — просто изменяясь. Вспомним, что обнаружил Фарадей: при включении и нарастании электрического тока появляется переменное магнитное поле, а оно порождает электродвижущую силу, которая вызывает ток в другом близко расположенном проводнике.

Максвелл понял, что для полноты и непротиворечивости системы уравнений, описывающих электричество и магнетизм, нужно добавить к уравнениям дополнительный член, представляющий нечто, названное им «током смещения». Он рассуждал так: движущиеся заряды, то есть ток, порождают магнитное поле, и движущиеся заряды — это способ получить переменное электрическое поле (поскольку поле от каждого заряда изменяется в пространстве при перемещении этого заряда). Быть может, переменное — то есть усиливающееся или ослабевающее — электрическое поле в области пространства, где нет никаких движущихся зарядов, тоже может породить магнитное поле.

Максвелл представил, что если подключить две параллельные пластины к противоположным полюсам батареи, то от батареи потечет ток и каждая из пластин будет набирать противоположный по отношению ко второй заряд. Это породит растущее электрическое поле между пластинами, а также магнитное поле вокруг подсоединенных

к ним проводников. Но Максвелл понял: чтобы его уравнения были совершенно корректны, растущее электрическое поле между пластинами должно также порождать магнитное поле в пустом пространстве между пластинами. И это поле должно быть точно таким же, как если бы оно порождалось реальным током, текущим через пространство между пластинами.

Поэтому Максвелл изменил свои уравнения, добавив новый член — ток смещения, чтобы добиться математической стройности. По существу, этот член проявлял себя как воображаемый ток, текущий между пластинами и порождающий переменное электрическое поле, точно соответствующее по величине реальному переменному электрическому полю в пустом пространстве между пластинами. Он также соответствовал магнитному полю, которое возбуждал бы реальный ток, если бы протекал между пластинами. Такое магнитное поле действительно возникает при проведении эксперимента с параллельными пластинами, в чем постоянно убеждаются студенты-физики в учебных лабораториях по всему миру.

Математическая стройность и здравая физическая интуиция в физике, как правило, себя оправдывают. Хотя это небольшое изменение в уравнениях кому-то может показаться пустяком, его физический смысл глубок, а значение огромно. Стоит убрать из картины реальные электрические заряды, как оказывается, что все в электричестве и магнетизме можно описать исключительно в терминах гипотетических «полей», которые Фарадей придумал себе в помощь и на которые опирался, как на своеобразный ментальный костыль. В результате связь между электричеством и магнетизмом можно сформулировать очень просто: переменное электрическое поле порождает магнитное

поле, а переменное магнитное поле порождает электрическое поле.

Внезапно поля появились в уравнениях как полноправные реальные физические объекты, а не просто как способ численно выразить силу между зарядами. Электричество и магнетизм стали единым неразделимым. Невозможно говорить только об электрических силах, поскольку, как я очень скоро покажу, то, что для одного наблюдателя выглядит как электрическая сила, другому представляется магнитной, в зависимости от условий наблюдения и от того, меняется ли поле в его системе отсчета.

Сегодня, описывая эти явления, мы говорим об *электромагнетизме*, и на то есть серьезная причина. После Максвелла электричество и магнетизм больше не рассматривались как отдельные силы природы. Это различные проявления одной и той же силы.

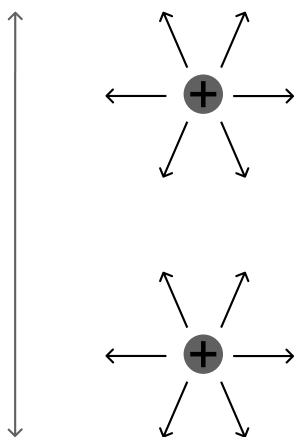
Максвелл опубликовал полную систему своих уравнений в 1865 г., а позже упростил их в учебнике 1873 г. Именно этот вариант получил известность как знаменитые четыре уравнения Максвелла, которые (переписанные, правда, на современном математическом языке) украшают футболки студентов-физиков по всему миру. Таким образом, мы можем считать 1873 г. годом второго великого объединения в физике — первым было признание Ньютоном того факта, что движением небесных тел управляет та же сила, что заставляет яблоки падать на землю. Это выдающееся достижение человеческого интеллекта, начатое экспериментальными открытиями Эрстеда и Фарадея, было завершено Максвеллом, скромным молодым физиком из Шотландии, которого превратности академической жизни вынудили перебраться в Англию.

Обретение нового взгляда на мироздание всегда доставляет — или должно доставлять — громадное удовлетворение. Однако наука прибавляет к этому еще одну огромную выгоду: новое понимание порождает также вполне осязаемые и проверяемые последствия, причем зачастую немедленно.

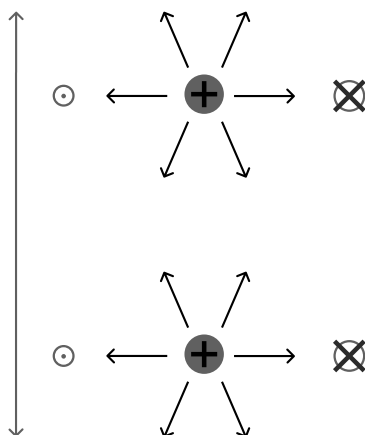
Именно так и произошло с объединением Максвелла, которое сделало Фарадеевы гипотетические поля буквально столь же реальными, как нос на вашем лице. *Буквально*, потому что без них, оказывается, нос на своем лице увидеть невозможно.

Гений Максвелла не успокоился на кодификации принципов электромагнетизма в элегантной математической форме. Используя математику, он раскрыл тайную природу самой фундаментальной из всех физических величин. Она ускользала от великих натурфилософов от Платона до Ньютона, хотя и связана с самой доступной для наблюдения вещью в природе — со светом.

Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Возьмем электрически заряженный предмет и станем его подбрасывать и ловить. Что произойдет?



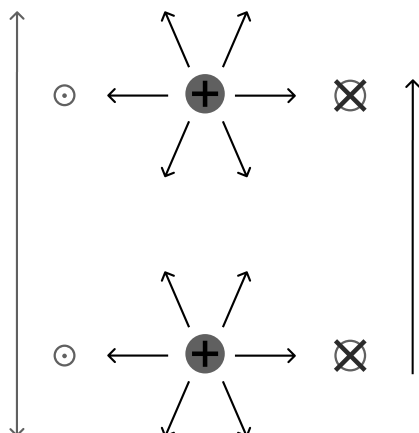
Поскольку заряд окружен электрическим полем, при движении положение линий поля меняется. Однако, согласно Максвеллу, такое переменное электрическое поле порождает магнитное поле, направленное к вам или от вас перпендикулярно к странице, как показано на рисунке.



Здесь линии поля, направленные от вас, обозначены крестиком (он символизирует оперение стрелы), а направленные к вам — точкой (острие стрелы). Это поле будет менять направление на противоположное одновременно со сменой направления движения заряда (вверх — вниз).

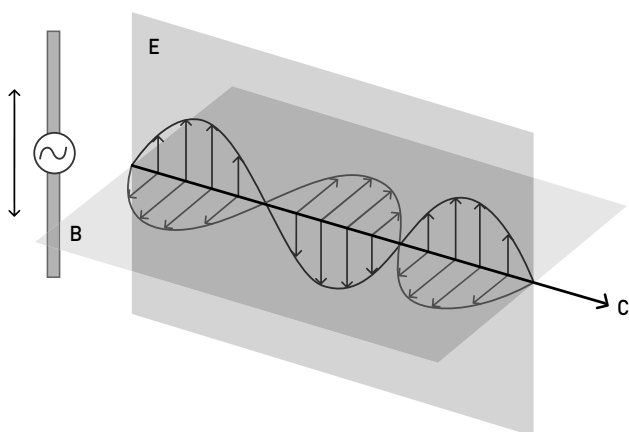
Но мы не должны остановиться на этом. Если я продолжу подбрасывать заряженный предмет, электрическое поле станет и дальше меняться, а с ним и индуцированное магнитное поле. Но переменное магнитное поле будет порождать электрическое поле. Таким образом, возникают новые линии индуцированного электрического поля, ориентированные вертикально и меняющие направление вверх — вниз со сменой знака магнитного поля. Из-за недостатка места я изображаю эту линию электрического поля

только справа, хотя слева будет индуцирована точно такая же линия, зеркально симметричная первой.



Но это переменное электрическое поле породит, в свою очередь, переменное магнитное поле, которое возникнет дальше вправо и влево от диаграммы, и т. д.

Жонглирование электрическим зарядом порождает последовательность возмущений как в электрическом, так



и в магнитном полях, которые распространяются вовне, причем изменения каждого поля служат источником другого поля, в соответствии с установленными Максвеллом законами электромагнетизма. Можно расширить эту картину до трехмерной, отражающей всю природу изменений.

Мы видим волну электрических и магнитных возмущений, иначе говоря, электромагнитную волну, которая уходит от заряда; при этом электрическое и магнитное поля колеблются в пространстве и во времени, причем поля перпендикулярны друг другу, а также направлению распространения волны.

Еще до того, как Максвелл придал окончательную форму своим уравнениям, он показал, что колеблющиеся заряды должны порождать электромагнитную волну. Но он также сделал и нечто намного более значительное. Он вычислил скорость этой волны с помощью простых и красивых выкладок; пожалуй, это мое любимое рассуждение, и я часто показываю его студентам. Смотрите!

Мы можем количественно определить электрическую силу, измерив ее для двух зарядов, величины которых известны заранее. Сила эта пропорциональна произведению зарядов. Обозначим коэффициент пропорциональности буквой A .

Аналогично мы можем количественно определить магнитную силу между двумя электромагнитами, в каждом из которых протекает ток известной величины. Эта сила пропорциональна произведению токов. Обозначим коэффициент пропорциональности в этом случае буквой B .

Максвелл показал, что скорость электромагнитного возмущения, исходящего от колеблющегося заряда, можно точно выразить через измеренные величины электрической и магнитной сил, которые определяются измеряемыми

в лаборатории значениями постоянных A и B . Воспользовавшись уже имеющимися данными количественных измерений силы электрического и магнитного взаимодействий, он получил:

*Скорость электромагнитной
волны $\approx 311\,000\,000$ метров в секунду*

Знаменитая легенда утверждает, что, когда Альберт Эйнштейн завершил работу над общей теорией относительности и сравнил ее предсказания для орбиты Меркурия с измеренными значениями, он ощутил сильное сердцебиение. Можно только представить себе, какое волнение, должно быть, испытал Максвелл, завершив свои вычисления. Ведь это число, которое могло оказаться каким угодно, было ему хорошо известно как скорость света. В 1849 г. французский физик Физо определил скорость света, проведя необычайно сложные по тем временам измерения, и получил:

Скорость света $\approx 313\,000\,000$ метров в секунду

Эти два числа совпадают в пределах доступной в те времена точности. (Сегодня мы знаем это число с гораздо большей точностью — 299 792 458 метров в секунду, и это значение является ключевым для современного определения метра.)

В характерном для него сдержанном (может быть, даже излишне сдержанном) тоне Максвелл заметил в 1862 г., когда впервые произвел этот расчет: «Мы едва ли можем избежать вывода о том, что свет состоит из поперечных колебаний той же среды, которая является источником электрических и магнитных явлений».

Иными словами, свет — это и есть электромагнитная волна.

Двумя годами позже, написав наконец классическую работу по электромагнетизму, Максвелл добавил несколько более уверенно: «Свет есть электромагнитное возмущение, передаваемое посредством поля в соответствии с законами электромагнетизма».

Казалось, этими словами Максвелл разрешил двухтысячелетнюю загадку природы и происхождения света. Его открытие явилось, как это часто случается с великими озарениями, непредвиденным побочным результатом других фундаментальных исследований. В данном случае это был побочный продукт одного из важнейших теоретических достижений в истории — объединения электричества и магнетизма в единой стройной математической теории.



До Максвелла главным источником мудрости была вера в Божественное, открываемое через Книгу Бытия. Даже Ньютон полагался на этот источник, когда пытался разобраться с происхождением света. Однако после 1862 г. все изменилось.

Джеймс Кларк Максвелл был глубоко религиозным человеком; иногда вера приводила его, как до того Ньютона, к странным утверждениям о природе. Тем не менее подобно мифическому герою Прометею, который похитил у богов огонь и подарил его людям, чтобы они могли с его помощью навсегда изменить свою цивилизацию, Максвелл похитил огонь из первых слов иудеохристианского Бога и навсегда изменил их смысл. Начиная с 1873 г. многие поколения студентов-физиков с гордостью заявляют:

«Максвелл записал свои четыре уравнения и объявил: “Да будет свет!”»

ТУДА И ОБРАТНО

Ты поставил землю на твердых основах:
не поколеблется она во веки и веки.

Псалтырь 103:5

Когда Галилео Галилея в 1633 г. судили по обвинению в ереси, упрекая его словами: «Считаешь за истину и распространяешь в народе лжеучение, по которому Солнце находится в центре мира»*, он будто бы пробормотал вполголоса в присутствии церковников-инквизиторов: «И все-таки она вертится!» В этих словах вновь проявила себя его бунтарская натура, хотя публично ему пришлось поклясться в приверженности архаичной теории о том, что Земля неподвижна и находится в центре мира.

Если Ватикан со временем капитулировал и признал движение Земли, то бедолага Бог, тот, что фигурирует в Псалтыри, об этом так и не узнал. Это несколько сбивает с толку, поскольку Галилей еще за год до суда показал, что состояние абсолютного покоя невозможно обнаружить экспериментально. Любой эксперимент, который

* Цит. по: Григулевич И. Р. Инквизиция. — Москва: Политиздат, 1976. — *Прим. науч. ред.*

вы проводите в покое, к примеру подкидываете в воздух мяч и вновь его ловите, даст точно такой же результат, если вы проведете его в движении с постоянной скоростью: так может случиться, если вы летите в самолете при отсутствии турбулентности. Ни один эксперимент, проводимый в самолете, если окна в салоне будут закрыты, не подскажет вам, движется самолет или стоит неподвижно.

Хотя Галилей еще в 1632 г. начал запускать пробные шары — и буквально, и метафорически, — потребовалось еще 273 года, чтобы разобраться в этом вопросе и оставить его в покое (вопросы, в отличие от предметов, *можно* оставлять в покое). И сделать это сумел только Альберт Эйнштейн.

Эйнштейн не был революционером в том смысле, в каком им был Галилей, — если понимать под этим термином человека, который рушит диктат авторитетов, живших до него, как Галилей рушил авторитет Аристотеля. Эйнштейн делал нечто противоположное. Он понимал, что законы, установленные экспериментально, нельзя просто так отбросить, и его гениальность как раз в том, что он не стал этого делать.

Это так важно, что я хочу все повторить и тем самым помочь людям, которые пишут мне почти каждую неделю, чтобы рассказать о новой открытой ими теории, наглядно демонстрирующей, будто все, что мы сегодня, как нам кажется, знаем о Вселенной, неверно, — и используют при этом Эйнштейна как иллюстрацию такой возможности. Мало того что ваша теория ошибочна, так вы еще и оказываете Эйнштейну медвежью услугу: *правила, установленные на основе эксперимента, невозможно так легко отбросить.*



Альберт Эйнштейн родился в 1879 г., и в том же году умер Джеймс Кларк Максвелл. Так и тянет сказать, что совместное сияние этих двух гениев было бы слишком ярким для одной небольшой планеты. Но, конечно же, это было просто совпадение, хотя и удачное. Если бы не предшествующая деятельность Максвелла, Эйнштейн не смог бы стать Эйнштейном. Он вышел из первого поколения молодых физиков, выросших на новых знаниях о свете и электромагнетизме — знаниях, добытых Фарадеем и Максвеллом. В конце XIX века это был подлинный передний край физики для радикальных реформаторов вроде Эйнштейна. Свет был у всех на уме.

Еще в подростковом возрасте Эйнштейн сумел понять, что блестящие выводы Максвелла относительно существования электромагнитных волн представляют собой фундаментальную проблему: они противоречат не менее красивым и давно общепризнанным результатам Галилея относительно основных свойств движения, полученным тремя столетиями ранее.

Еще до эпической битвы с католической церковью по поводу движения Земли Галилей утверждал, что не существует эксперимента, который можно было бы провести, чтобы отличить состояние покоя от равномерного движения. Вплоть до Галилея состояние абсолютного покоя считалось особым. Аристотель считал, что все объекты стремятся к состоянию покоя, а Церковь признавала покой настолько особым состоянием, что именно в нем должен находиться центр Вселенной, то есть та планета, на которую Бог поместил нас.

Как и многие другие утверждения Аристотеля (хотя, конечно, далеко не все), представление о том, что состояние покоя — особое, основывалось исключительно

на интуиции. (Тем, кто любит цитировать Аристотеля, упоминая о «перводвигателе» в качестве аргумента в пользу существования Бога, хочу напомнить, что Аристотель утверждал также, что у женщин и у мужчин разное количество зубов; вероятно, он не потрудился проверить этот факт.)

В повседневной жизни все предметы стремятся к покою. Точнее, все, кроме Луны и планет; вероятно, это одна из причин, по которой эти тела в древности считались особыми, находящимися под управлением ангелов или богов.

Однако любое наше ощущение покоя иллюзорно. В приводившемся примере с подбрасыванием мячика в летящем самолете вы в конце концов сможете почувствовать, что ваш самолет движется, когда попадете в зону турбулентности. Но даже когда самолет стоит на поле аэродрома, он не находится в покое. Аэропорт вместе с Землей движется со скоростью около 30 км/с вокруг Солнца, а Солнце, в свою очередь, движется со скоростью около 200 км/с вокруг центра Галактики, и т. д.

Галилей закрепил это в своем знаменитом утверждении, что законы физики одинаковы для всех наблюдателей, находящихся в состоянии равномерного движения, то есть движущихся по прямой с постоянной скоростью. (Покоящиеся наблюдатели просто особый случай, когда скорость равна нулю.) Утверждая это, он имел в виду, что не существует эксперимента, который можно было бы провести над таким объектом, чтобы определить, что он не покоится. Когда вы поднимаете глаза к небу и видите там летящий самолет, несложно понять, что он движется относительно вас. Но не существует эксперимента, который можно было бы провести на земной поверхности или на самолете, чтобы с его помощью понять: земля, на которой вы стоите, движется относительно самолета или наоборот.

Хотя кажется странным, что для понимания этого фундаментального факта о нашем мире потребовалось так много времени, следует признать, что он противоречит большей части нашего опыта. Большой части, но не всему опыту целиком. На примере шаров, скатывающихся по наклонной плоскости, Галилей наглядно продемонстрировал, что сдерживающая сила трения, заставляющая все предметы в конце концов приходить в состояние покоя, которую философы прошлого считали фундаментальной для нашего мира, на самом деле вовсе не фундаментальна, а лишь маскирует собой подлинную реальность. Галилей заметил, что когда шар скатывается по одной поверхности, а затем поднимается по другой вверх, то он в конце достигает той же высоты, с которой начинал движение. Рассмотрев шары, закатывающиеся вверх по плоскостям разного наклона, он показал, что чем меньше наклон, тем дальше приходится катиться шару, чтобы достичь первоначальной высоты. Отсюда он заключил, что, если наклон уменьшить до нуля, шары будут вечно катиться с постоянной скоростью.

Осознание этого факта имело огромное значение; оно принципиально изменило многое в наших представлениях о мире. Нередко его называют просто законом инерции, на нем основан закон движения Ньютона, который связывает наблюдаемое ускорение объекта с величиной внешней силы. После того как Галилей понял, что для поддержания движения тела с постоянной скоростью не требуется никакой силы, Ньютон смог сделать естественный следующий шаг и сказать, что для изменения скорости тела необходима сила.

После этого между небесами и Землей не стало принципиальных различий. Скрытая реальность, лежащая в основе движения привычных повседневных предметов, сделала

очевидным, что в нескончаемом движении астрономических объектов нет ничего сверхъестественного, и подготовила сцену для Ньютонова закона всемирного тяготения, еще более снизив роль в космосе ангелов или других существ.

Таким образом, открытие Галилея сыграло принципиальную роль в становлении физики, в превращении ее в ту науку, которую мы знаем сегодня. Но не менее принципиальным было и блестящее объединение Максвеллом электрической и магнитной сил, создавшее математическую базу, на которой строится вся современная теоретическая физика.



Альберт Эйнштейн, начиная свой научный путь в этой богатой интеллектуальной обстановке, быстро распознал в окружающем ландшафте глубокую непроходимую пропасть: Галилей и Максвелл никак не могли быть правы одновременно.

Двадцать с лишним лет назад, когда моя дочка была совсем маленькой, я впервые задумался над разрешением парадокса, с которым пытался справиться молодой Эйнштейн, и хороший пример буквально свалился мне на голову, когда я вез малышку в машине.

Галилей показал, что, пока я веду машину безопасно и с постоянной скоростью, не допуская резких ускорений, законы физики в нашей машине должны быть неотличимы от тех же законов физики, измеренных в лабораториях физического института, куда я ехал на работу. Скажем, если у дочки на заднем сиденье была игрушка, то она могла подбросить ее в воздух и поймать без всяких неожиданностей. Интуитивные навыки, наработанные ее телом в играх дома, ничуть не хуже служили ей и в машине.

Однако поездка в машине не усыпляла девочку, как это происходит со многими маленькими детьми, а, напротив, возбуждала и тревожила ее. Во время той поездки ее затошнило и в конце концов вырвало, причем рвотные массы полетели по траектории, прекрасно описанной Ньютоном, с начальной скоростью, скажем, в пятнадцать миль в час; эта чудесная параболическая траектория закономерно завершилась на моем затылке.

Представим, что моя машина в тот момент подъезжала к светофору с относительно небольшой скоростью, скажем, в десять миль в час. Тогда наблюдатель на тротуаре, видевший все это, заметил, что рвотные массы ребенка летят со скоростью 25 миль в час: скорость машины относительно наблюдателя (10 миль в час) плюс скорость масс (15 миль в час), а их траектория при движении к моему (на этот раз движущемуся) затылку опять же хорошо описывалась бы Ньютоном уже при этой более высокой (25 миль в час) начальной скорости.

Пока все в порядке. Однако здесь есть проблема. Теперь, когда моя дочь стала старше, она обожает водить машину. Представим себе, что она едет следом за машиной приятеля, одновременно разговаривая с ним по сотовому телефону (при помощи гарнитуры, для безопасности), и хочет сказать ему, что нужно повернуть направо, чтобы попасть туда, куда они вместе едут. Она говорит по телефону, и электроны в нем скачут туда-сюда, порождая электромагнитную волну (в микроволновом радиодиапазоне). Волна проходит до сотового телефона ее приятеля со скоростью света (на самом деле она, быть может, успевает подняться до спутника, а затем ее излучают оттуда вниз, но забудем пока про эти сложности), и тот, вовремя получив информацию, успевает сделать нужный поворот.

Итак, что в этой ситуации измерит стоящий у дороги наблюдатель? Здравый смысл подсказывает, что радиосигнал должен двигаться от машины моей дочери до машины ее приятеля со скоростью света, которую можно было бы измерить прибором в машине моей дочери (обозначим эту скорость c), плюс скорость машины.

Но здравый смысл обманчив именно потому, что основывается на повседневном опыте. В обычной жизни мы не измеряем время, за которое свет, или микроволновое излучение, перемещается из одного угла комнаты в другой или из одного телефона в другой неподалеку. Если бы здравый смысл был здесь применим, то наблюдатель на обочине измерил бы (при помощи сложного оборудования), как прыгают туда-сюда электроны в телефоне моей дочери, и увидел бы, как излучается микроволновый сигнал; этот сигнал двигался бы со скоростью c плюс, скажем, 10 миль в час.

Однако великий триумф Максвелла заключался в том, что ему удалось показать: скорость электромагнитных волн, излученных колеблющимся зарядом, можно вычислить, просто измерив величину электрической и магнитной сил. Следовательно, если для наблюдателя на обочине дороги волны двигались бы со скоростью c плюс 10 миль в час, то значения электрической и магнитной сил для него отличались бы от значений, наблюдаемых моей дочерью, для которой волны двигались бы со скоростью c .

Но Галилей говорит нам, что это невозможно. Если бы измененные значения электрических и магнитных сил различались для двух наблюдателей, то можно было бы сказать, кто из них движется, а кто нет, поскольку законы физики — в данном случае электромагнетизма — содержали бы разные значения для каждого из наблюдателей.

Таким образом, прав мог быть либо Галилей, либо Максвелл, но не оба одновременно. Возможно потому, что Галилей работал во времена более примитивной науки, большинство физиков склонялось на сторону Максвелла. Они решили, что во Вселенной, должно быть, имеется некая абсолютная покоящаяся система отсчета и что расчеты Максвелла приложимы только к этой системе. А по отношению ко всем наблюдателям, движущимся по отношению к этой системе, электромагнитные волны должны иметь иную скорость, нежели вычисленная Максвеллом.

Давняя научная традиция обеспечила этой идее физическую поддержку. В конце концов, если свет представляет собой электромагнитное возмущение, то возмущением чего оно является? Тысячи лет философы рассуждали об «эфире» — некоем невидимом фоновом веществе, заполняющем все пространство, и естественно было заподозрить, что электромагнитные волны путешествуют именно в этой среде, как звуковые волны распространяются в воздухе или в воде. Электромагнитные волны должны были бы двигаться в такой среде с некоторой характерной фиксированной скоростью (рассчитанной Максвеллом), а для наблюдателя, движущегося по отношению к этому фоновому заполнителю, в зависимости от его скорости волны распространялись бы быстрее или медленнее.

Несмотря на интуитивную разумность, такое представление было бегством от действительности, поскольку если вспомнить аналитические выкладки Максвелла, то получится, что наблюдатели, движущиеся друг относительно друга, измерят различные значения электрической и магнитной сил. Быть может, такой вариант все же представлялся приемлемым, поскольку все скорости, которые реально можно было получить в то время, были так малы

в сравнении со скоростью света, что обсуждаемые различия оказались бы очень малы и обнаружить их наверняка не удалось бы.

Однажды актер Алан Алда в публичном выступлении, где присутствовал и я, заявил, что, вопреки расхожему мнению, искусство требует упорной работы, а наука невозможна без творческого начала. Понятно, что для того и другого нужны оба названных качества, но мне в его версии понравилось то, что в ней подчеркивается творческая, художественная сторона науки. Я бы добавил к этому, что оба занятия требуют интеллектуальной смелости. Творческое начало само по себе ни к чему не приводит, если его не использовать. Новые идеи, как правило, застаиваются и умирают, если у автора не находится храбрости применить их.

Я упоминаю об этом здесь потому, что, возможно, истинной мерой гения Эйнштейна была не его математическая подкованность (хотя, вопреки расхожему мнению, он был талантливым математиком), а скорее творческий потенциал и интеллектуальная уверенность, питавшие его упорство.

Вызов, стоявший перед Эйнштейном, заключался в том, чтобы примирить и совместить две противоречащие друг другу идеи. Отбросить одну из них — слишком простой путь. А вот чтобы найти способ устранить противоречие, необходим творческий подход.

Решение Эйнштейна не было сложным, но это не означает, что найти его было просто. Все это напоминает мне исторический анекдот про Христофора Колумба, который перед экспедицией в Новый Свет, чтобы получить бесплатную выпивку, держал пари на то, что сумеет поставить яйцо на острый конец на стойке бара. После того как владелец бара принимал пари, Колумб разбивал яйцо с острого

кончика и легко ставил его на стойку. В конце концов, он же не оговаривал, что яйцо при этом должно остаться целым.

Предложенное Эйнштейном разрешение парадокса Галилея — Максвелла было весьма похожим на фокус Колумба. Ведь если оба они — и Максвелл, и Галилей — правы, то где-то что-то нужно сломать, чтобы картинка сложилась.

Вопрос в том, что именно. Чтобы и Максвелл, и Галилей были правы, необходимо было нечто откровенно безумное: в приведенном мной примере оба наблюдателя должны получить при измерении одинаковую по отношению к ним (а не различающуюся на скорость машины) скорость микроволнового излучения от сотового телефона моей дочери.

Однако Эйнштейн задал себе интересный вопрос. В конце концов, что значит измерить скорость света? Скорость определяется путем измерения расстояния, которое объект проходит за определенное время. Так что Эйнштейн рассуждал следующим образом: два наблюдателя могут получить одинаковую величину скорости радиоволн относительно себя, если при измерениях они получают одинаковое расстояние, пройденное относительно каждого из них радиоволнами за фиксированный промежуток времени (скажем, к примеру, за одну секунду в его собственной системе отсчета).

Но согласитесь, это тоже звучит слегка безумно. Рассмотрим более простой пример летящих рвотных масс. Припомните, что в моей системе отсчета они пролетают от дочкиного рта на заднем сиденье автомобиля до моего затылка, скажем три фута, примерно за четверть секунды. Но для наблюдателя на тротуаре машина все это время едет со скоростью 10 миль в час, то есть примерно 14,5 футов в секунду. Таким образом, для наблюдателя на тротуаре

рвотные массы за четверть секунды пролетают примерно 3,6 фута плюс 3 фута, или всего 6,6 фута.

Следовательно, для этих двух наблюдателей расстояние, которое пролетают рвотные массы за одно и то же время, заметно различается. Как же может быть, чтобы для микроволнового излучения расстояния, измеренные обоими наблюдателями, оказались одинаковыми?

Первым намеком на то, что такое безумие хотя бы в принципе возможно, стало то, что электромагнитные волны путешествуют так быстро, что за время, за которое они доходят от одной машины до другой, обе машины практически не успевают переместиться. Так что любая возможная разница в измеренных двумя наблюдателями расстояниях, пройденных за это время, будет, по существу, неуловимой.

Но Эйнштейн повернул этот аргумент другой стороной. Он понял, что на самом деле ни один из наблюдателей не может измерить расстояние, пройденное радиоволнами в человеческом масштабе расстояний, потому что соответствующие отрезки времени, необходимые, чтобы свет прошел расстояния человеческого масштаба, столь малы, что никто не в состоянии непосредственно их определить. И аналогично в человеческом масштабе времени свет должен проходить такие большие расстояния, что их тоже никто не сможет измерить непосредственно. А раз так, то где гарантия, что такое безумное поведение в реальности невозможно?

Далее вопрос ставится так: а что нужно, чтобы это на самом деле произошло? Эйнштейн рассуждал: для того чтобы такой невозможный на первый взгляд результат стал возможен, два наблюдателя должны измерять расстояния и/или промежутки времени по-разному, причем таким образом,

чтобы — по меньшей мере — свет проходил бы одно и то же измеренное расстояние за одно и то же измеренное время для обоих наблюдателей. Так, к примеру, происходило бы, если бы наблюдатель на обочине в случае с дочкиной рвотой измерил, что массы проходят 6,6 фута, но при этом почему-то решил, что интервал времени, за который это происходит, на самом деле больше того, что я измерил внутри машины; тогда рассчитанная по его данным скорость полета рвотных масс относительно него оказалась бы такой же, как и у меня относительно себя.

Эйнштейн выдвинул дерзкое предположение, что подобное на самом деле происходит, что Максвелл и Галилей правы одновременно и что все наблюдатели, независимо от их относительного движения, получили бы при измерении одну и ту же скорость c для движения светового луча относительно себя.

Конечно, Эйнштейн был ученым, а не пророком, поэтому он не стал утверждать нечто настолько диковинное на основании одного только своего авторитета. Он разобрался в следствиях из своего заявления и сделал предсказания, которые можно было проверить, чтобы подтвердить его.

Этим он сместил сцену, на которой разворачивается наша история, из царства света в царство глубоко личного человеческого опыта. Он навсегда изменил смысл не только понятий пространства и времени, но и самих событий, управляющих нашими жизнями.

СКАЧОК ВО ВРЕМЕНИ

Он распростер север над пустотою, повесил землю
ни на чем.

Иов 26:7

Великолепные эпические сказания Древней Греции и Рима вращаются вокруг героев, таких как Одиссей или Эней, которые бросали вызов богам и зачастую умудрялись перехитрить их. И если говорить о более современных эпических героях, то обстоятельства изменились не слишком сильно.

Эйнштейн преодолел тысячелетние искажения человеческого восприятия, показав, что даже Бог Спинозы не мог бы подчинить своей абсолютной воле пространство и время и что каждый из нас вырывается из этих воображаемых оков всякий раз, когда оглядывается вокруг и видит новые чудеса среди звезд над головой. Эйнштейн встал наравне с такими художественными гениями, как Винсент Ван Гог, а рассуждения его по точности и лаконичности можно сравнить с произведениями Эрнеста Хемингуэя.

Ван Гог умер за пятнадцать лет до того, как Эйнштейн разработал свои идеи о пространстве и времени, но его

картины ясно дают понять, что наше восприятие мира субъективно. Пикассо хватало дерзости заявлять, что он рисует то, что видит, хотя на его полотнах люди могут состоять из несвязных кусков, а части тела у них зачастую смотрят в разные стороны, но именно шедевры Ван Гога наглядно демонстрируют, что мир в глазах людей может выглядеть очень по-разному.

Подобным же образом и Эйнштейн первым, насколько мне известно, в истории физики стал открыто утверждать, что «здесь» и «сейчас» представляют собой не универсальные, а зависящие от наблюдателя понятия.

Его рассуждение было простым и основывалось на не менее простом факте, что мы не можем находиться в двух местах одновременно.

Мы привыкли ощущать, что сосуществуем в одной реальности с окружающими, потому что, оглядываясь вокруг, мы, на первый взгляд, получаем ровно одни и те же впечатления. Но это иллюзия, обусловленная огромностью скорости света.

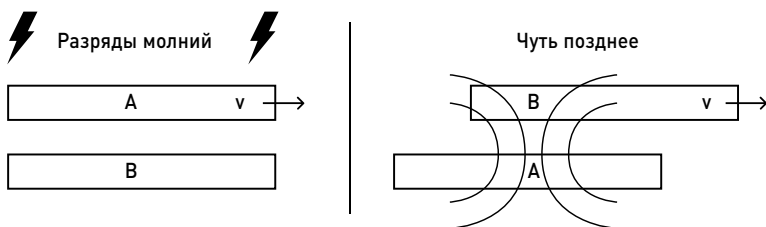
Когда я наблюдаю что-то, происходящее в данный момент, скажем аварию впереди на улице или влюбленных, целующихся на скамейке в парке, когда я прохожу мимо, ни одно из этих событий не происходит в буквальном смысле «сейчас»; скорее они происходят «тогда». Свет, который попадает в мой глаз, отразился от машины или от людей чуть-чуть раньше.

Аналогично, когда я фотографирую красивый вид, как я делал это в Северной Ирландии, когда начинал писать эту главу, запечатленная сцена — это сцена, распределенная не только в пространстве, но скорее в пространстве и времени. Свет от скал Дороги гигантов, находящихся примерно в километре от меня, покинул их значительно

раньше (где-то на одну тридцатимиллионную секунды), чем свет от карабкающихся на шестиугольные лавовые выступы людей на переднем плане, который достиг моей камеры одновременно с первым.

Понимая это, Эйнштейн задался вопросом о том, как два события, которые для одного наблюдателя выглядят происходящими одновременно в разных местах, выглядели бы для другого наблюдателя,двигающегося по отношению к первому в момент выполнения наблюдений. В примере, который он рассматривал, речь шла о поезде, поскольку жил он в Швейцарии в эпоху, когда из любого населенного пункта чуть не каждые пять минут отходил поезд еще куда-нибудь.

Представьте себе ситуацию, изображенную на рисунке: молния ударяет в две точки возле разных концов поезда, равноудаленные от наблюдателя А, который покоится относительно этих точек, и наблюдателя В в движущемся поезде, который проезжает мимо А в тот момент, который позже А определит как момент удара молний.



Немного позже А увидит вспышки обеих молний, которые дойдут до него в одно и то же время. Однако В за это время успеет продвинуться вместе с поездом. Следовательно, световая волна, несущая информацию о том, что справа произошла вспышка, к этому моменту уже минует В,

а свет, несущий информацию о вспышке слева, до него еще не дойдет.

Наблюдатель В видит свет, приходящий от обоих концов его поезда, и в самом деле для него вспышка у переднего конца поезда происходит раньше, чем вспышка у заднего его конца. Поскольку он выполнил измерения и убедился, что свет приходит к нему со скоростью c , а сам В при этом находится в середине поезда, он делает вывод, что вспышка справа, должно быть, произошла раньше вспышки слева.

Кто в данном случае прав? Эйнштейну хватило дерзости предположить, что правы оба наблюдателя. Если бы скорость света была подобна всем прочим скоростям, то В, конечно, увидел бы одну волну раньше другой, но он бы увидел также, что волны движутся к нему с разными скоростями (та, навстречу которой он движется сам, приближалась бы быстрее, а та, от которой уезжает, — медленнее), и поэтому он пришел бы к выводу, что события произошли одновременно. Но, поскольку, согласно измерениям В, оба световых луча движутся к нему с одинаковой скоростью c , реальность, о которой он делает выводы, выглядит совершенно иначе.

Как отмечал Эйнштейн, при определении того, что мы подразумеваем под различными физическими величинами, измерение — это все. Представить себе реальность, которая была бы независима от измерения, возможно, было бы интересным философским упражнением, но с научной точки зрения это бесплодный подход. Если наблюдатели А и В находятся в той же точке, где происходит событие, они определяют для него один и тот же момент, но если объектом интереса служат события в отдаленных точках, наблюдатели почти ни в чем не согласятся друг с другом. Любое измерение, которое может провести В, говорит ему, что событие у переднего

конца поезда произошло раньше второго события, тогда как любое измерение, проводимое А, говорит ему, что оба события произошли одновременно. *Поскольку ни А, ни В не могут находиться в обоих местах одновременно*, их определения моментов времени в отдаленных точках опираются на наблюдения, сделанные на расстоянии, а если эти наблюдения построены на интерпретации того, что сообщает дошедший от этих событий свет, наблюдатели придут к разным выводам относительно возможной одновременности отдаленных событий — и при этом оба будут правы.

Понятия «здесь» и «сейчас» универсальны только для здесь и сейчас, а не для там и тогда.



Я с умыслом написал, что наблюдатели не согласятся друг с другом *почти* ни в чем. Ибо каким бы странным ни казался приведенный мной только что пример, на самом деле он может быть еще более странным. Еще один наблюдатель С, едущий на поезде в противоположном направлении по отношению к направлению движения В, сделает вывод, что событие слева (возле передней части его поезда) произошло раньше, чем событие с правой стороны. Иными словами, порядок событий, увиденных глазами двух наблюдателей, В и С, окажется совершенно противоположным. То, что для одного из них было «до», для другого будет «после» и наоборот.

Это порождает серьезную и очевидную проблему. В мире, в котором мы, по убеждению большинства, живем, причины случаются *до* следствий. Но если «до» и «после» могут меняться местами в зависимости от наблюдателя, то что при этом происходит с причинами и следствиями?

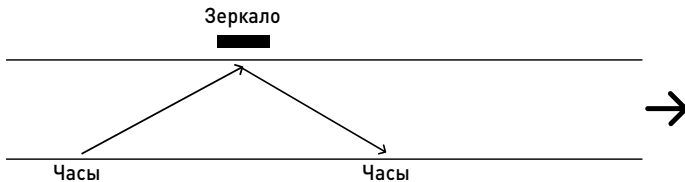
Примечательно, что для Вселенной характерна своего рода встроенная «уловка-22», благодаря которой

в конечном итоге мы хоть и должны держать свой разум открытым в отношении реальности, но, как любит говорить издатель *The New York Times*, не должны все же раскрывать его настолько, чтобы мозги выпали. В данном случае Эйнштейн продемонстрировал, что обращение временной последовательности отдаленных событий, вызванное постоянством скорости света, возможно лишь в том случае, когда эти события происходят достаточно далеко друг от друга — настолько, чтобы световой луч проходил расстояние между ними за время, превышающее определяемую разницу во времени между этими событиями. Тогда если ничто не может двигаться быстрее света (а этот вывод тоже возникает вследствие усилий Эйнштейна примирить и согласовать Галилея и Максвелла), то никакой сигнал от одного события не сможет дойти до точки второго события достаточно быстро, чтобы повлиять на его результат, так что ни одно из этих событий ни при каких обстоятельствах не может быть причиной другого.

Но как насчет двух разных событий, происходящих с некоторой временной разницей в одном и том же месте? Будут ли они восприняты разными наблюдателями по-разному? Чтобы проанализировать эту ситуацию, Эйнштейн вообразил некие идеализированные часы на поезде. Эти часы тикают всякий раз, когда луч света, посланный ими от одного борта поезда, отражается от зеркала на другом борту и возвращается назад к часам (см. рисунок).



Допустим, каждый проход луча в двух направлениях (каждый тик) занимает одну миллионную долю секунды. Теперь рассмотрим движение луча с позиции наблюдателя, стоящего на земле возле путей. Поскольку поезд движется, траектория светового луча выглядит так, как показано на рисунке: в промежутке между испусканием света и его приемом и часы, и зеркало успевают сдвинуться.



Очевидно, этот световой луч проходит по отношению к наблюдателю на земле большее расстояние, чем по отношению к часам в поезде. Однако при измерении оказывается, что свет движется с одной и той же скоростью c . Таким образом, один цикл его движения занимает больше времени. В результате один тик часов в поезде длительностью в одну миллионную долю секунды при наблюдении с земли занимает, скажем, две миллионные доли секунды. Следовательно, часы в поезде тикают вдвое медленнее, чем такие же часы на земле. Для часов в поезде время замедлилось.

Что еще более странно — это полностью взаимный эффект. Если некто в поезде будет наблюдать за часами, стоящими на земле возле путей, он увидит, что часы эти тикают вдвое медленнее часов в поезде, поскольку для наблюдателя в поезде картина движения света между установленными на земле зеркалами будет точно такой же.

Поэтому может показаться, будто замедление часов всего лишь иллюзия, однако повторяю: измерения

эквивалентны реальности, хотя данный случай немного тоньше, чем случай с одновременностью. Чтобы позже сравнить часы двух наблюдателей и определить, которые из них на самом деле замедлились (если, конечно, это вообще произошло), по крайней мере одному из наблюдателей придется вернуться и присоединиться к другому. Этому наблюдателю придется изменить характер движения: он либо замедлится, остановится, а затем двинется в обратную сторону, либо ускорится из состояния (видимого) покоя и догонит второго наблюдателя.

В результате два наблюдателя перестанут быть равноправными. Оказывается, тот наблюдатель, который будет ускоряться или замедляться, обнаружит, вернувшись на стартовую позицию, что постарел намного меньше, чем второй наблюдатель, все это время двигавшийся равномерно и прямолинейно.

Все это сильно напоминает фантастический сюжет, да и в самом деле послужило питательной средой для огромного количества научной фантастики, как хорошей, так и плохой, поскольку в принципе именно этот сюжет открывает возможности для тех космических путешествий по Галактике, которые мы видим в многочисленных фильмах. Однако здесь есть несколько довольно существенных затруднений. Хотя в принципе такой сценарий дает возможность космическому кораблю облететь Галактику на протяжении одной человеческой жизни, чтобы Жан-Люк Пикар мог пережить все положенные ему приключения из «Звездного пути», штаб-квартира Звездного флота столкнулась бы с немалыми трудностями, пытаясь осуществлять командование и контроль над какой бы то ни было Федерацией. Полеты кораблей, подобных «Энтерпрайзу», могли бы, конечно, продолжаться лет по пять по корабельным часам,

но каждое путешествие с Земли до центра Галактики и обратно на корабле, летящем с околосветовой скоростью, для всех тех, кто остался дома, заняло бы шестьдесят тысяч лет или около того. Хуже того, на одно такое путешествие потребовалось бы больше топлива, чем существует вещества в Галактике, по крайней мере при использовании традиционных ракет того типа, какими мы пользуемся в настоящее время.

Тем не менее оставим в стороне научно-фантастические передраги, потому что «растяжение времени» — именно так называют релятивистское замедление хода часов на движущихся объектах — очень и очень реально и к тому же каждый день наблюдается здесь, на Земле. На мощных ускорителях частиц, таких как Большой адронный коллайдер к примеру, мы регулярно разгоняем элементарные частицы до скоростей, составляющих 99,9999% скорости света, и при исследовании происходящего на них просто обязаны учитывать релятивистские эффекты.

Однако релятивистское замедление времени проявляется и ближе к дому. Нас всех на Земле ежедневно бомбардируют космические лучами из глубин Галактики. Если встать в открытом поле со счетчиком Гейгера, он будет довольно регулярно — каждые несколько секунд — срабатывать, регистрируя энергичные частицы, именуемые мюонами. Эти частицы возникают там, где энергичные протоны космических лучей вторгаются в атмосферу, порождая целый ливень других, более легких частиц, включая мюоны, которые нестабильны, имеют время жизни, равное примерно одной миллионной доле секунды, и распадаются на электроны и мои любимые частицы — нейтрино.

Если бы не замедление времени, мы никогда бы не зарегистрировали мюоны космических лучей на поверхности Земли. Дело в том, что мюон, летящий с околосветовой

скоростью, за одну миллионную долю секунды прошел бы всего три сотни метров, прежде чем распасться. На самом же деле мюонные ливни проходят по 20 км из верхних слоев атмосферы, где они возникают, вниз, до нашего счетчика Гейгера. Это возможно только в том случае, если внутренние «часы» мюонов (которые побуждают их к распаду примерно через миллионную долю секунды) тикают медленно по отношению к нашим земным часам — в 10–100 раз медленнее, чем тикали бы, будь эти мюоны рождены в покое здесь, в земной лаборатории.



Последнее следствие вывода Эйнштейна о том, что скорость света должна быть постоянна и одинакова для всех наблюдателей, представляется еще более парадоксальным, чем остальные, — отчасти потому, что предполагает изменение физического поведения объектов, которые мы можем увидеть и потрогать. Но оно же поможет нам вернуться к началу и заглянуть в новый мир, лежащий за пределами нашего нормального, прикованного к земле воображения.

Результат этот формулируется очень просто, хотя на переваривание его следствий может потребоваться некоторое время. Если я несу некий протяженный объект, к примеру линейку, и двигаюсь быстро по сравнению с вами, моя линейка, если вы ее измерите, покажется вам короче, чем она видится мне. Скажем, я измерил свою линейку, и ее длина оказалась равной 10 см.



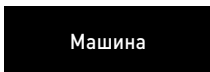
Но для вас при измерении ее длина может оказаться равной лишь 6 см.



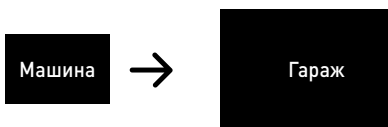
Конечно же, это иллюзия, скажете вы, потому что как может один и тот же объект иметь разную длину? Атомы не могут быть расположены компактнее для вас, чем для меня.

Здесь мы снова возвращаемся к вопросу о том, что «реально». Если любое измерение, которое вы можете проделать над моей линейкой, показывает вам, что ее длина составляет 6 см, то линейка действительно имеет длину 6 см. «Длина» вовсе не абстрактная величина, она требует измерения. А поскольку результат измерения зависит от наблюдателя, то и длина от него тоже зависит. Чтобы убедиться, что это возможно, и заодно осветить еще одну из скользких «уловок-22», связанных с теорией относительности, рассмотрим один из моих любимых примеров.

Предположим, у меня есть машина длиной 12 футов, а у вас — гараж длиной 8 футов. Ясно, что моя машина не поместится в ваш гараж.



Но теория относительности подразумевает, что если я еду быстро, то вы при измерении моей машины получите ее длину, равной, скажем, 6 футам, так что, по идее, она должна будет поместиться в вашем гараже, по крайней мере пока находится в движении.



Однако рассмотрим ситуацию с моей точки зрения. Для меня длина машины составляет 12 футов, а ваш гараж быстро движется мне навстречу, так что при измерении я получу для него глубину не 8, а скорее 4 фута.



Так что моя машина, очевидно, никак не может поместиться в ваш гараж.

Где же истина? Ясно, что моя машине не может одновременно находиться и внутри гаража, и не внутри. Или может?

Рассмотрим сначала вашу точку зрения и представим, что вы снабдили переднюю и заднюю стенки своего гаража тяжелыми прочными воротами. Поэтому, чтобы я не убился, въезжая в гараж, вы делаете следующее. Вы закрываете задние ворота гаража, но открываете передние, чтобы моя машина могла въехать внутрь. Когда она окажется внутри, вы закрываете передние ворота.



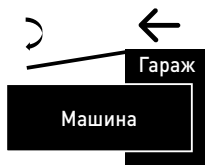
Однако затем вы быстро — так, чтобы мой автомобиль не успел в них врезаться, — открываете задние ворота, позволяя мне спокойно выехать из гаража сзади.



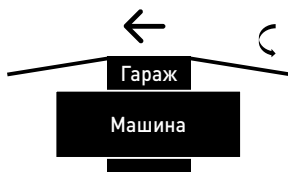
Таким образом, вы продемонстрировали, что моя машина была внутри вашего гаража, — и это, разумеется, правда, поскольку она достаточно мала, чтобы там поместиться.

Однако не забывайте, что для меня временной порядок отдаленных событий может быть иным. Вот что при этом увижу я.

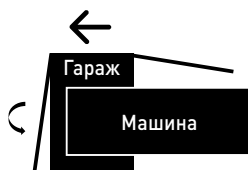
Я увижу, как ваш крохотный гаражик несется мне навстречу, и я увижу, как вы открываете передние ворота — как раз вовремя, чтобы нос моей машины прошел в них.



Затем я увижу, как вы благородно открываете задние ворота гаража, пока я не успел в них врезаться.



После этого — и после того, как багажник моей машины окажется внутри гаража, — я увижу, как вы закрываете передние ворота.



При этом мне будет очевидно, что моя машина ни в какой момент не находилась внутри вашего гаража при закрытых с обеих сторон воротах, потому что это попросту невозможно. Ваш гараж для этого слишком мал.

Все просто. «Реальность» для каждого из нас основана на том, что мы можем измерить. В моей системе отсчета машина *длиннее* гаража. В вашей системе отсчета гараж *длиннее* машины. И точка. Суть в том, что каждый из нас может в каждый момент времени находиться лишь в одной точке и реальность там, где мы находимся, совершенно однозначна. Но те выводы, которые мы делаем о реальном мире в других местах, основаны на дистанционных измерениях, результаты которых зависят от состояния наблюдателя.

Однако преимущества тщательных измерений этим не ограничиваются.

Новая реальность, которую вскрыл Эйнштейн, — а она основана на эмпирической обоснованности закона Галилея и замечательном максвелловском объединении электричества и магнетизма — на первый взгляд заменяет все остатки объективной реальности результатами субъективных измерений. Однако Платон напоминает нам, что задача естествоиспытателя — проникать глубже, в самую суть вещей.

Говорят, что Фортуна покровительствует тем, чей разум готов воспринять новое. В каком-то смысле Платонова пещера подготовила наш разум к эйнштейновской

относительности, хотя завершить эту задачу предстояло профессору Герману Минковскому, который когда-то преподавал Эйнштейну математику.

Минковский был блестящим математиком и в конечном итоге получил заслуженную кафедру в Гёттингенском университете. Но в Цюрихе, где он был одним из профессоров Эйнштейна, Минковский был просто блестящим математиком, занятия у которого Эйнштейн прогуливал, поскольку в студенческие времена, судя по всему, весьма пренебрежительно относился к чистой математике. Позже время изменило его взгляды.

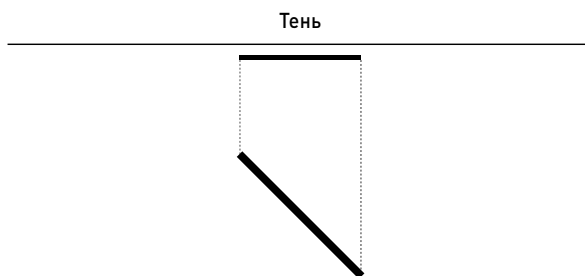
Вспомним, что пленники в Платоновой пещере также видели по теням на стене, что длина, судя по всему, не обладает объективным постоянством. Тень линейки могла бы в какой-то момент выглядеть так и иметь длину 10 см.



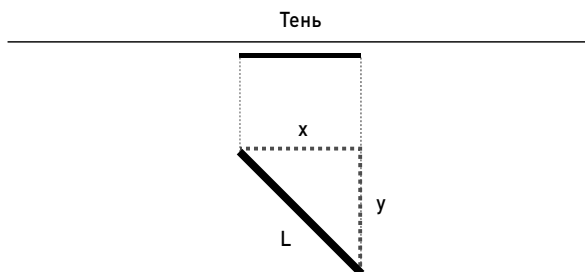
А в какой-то другой момент она могла выглядеть иначе и иметь длину 6 см.



Сходство с примером, представленным мной при обсуждении теории относительности, возникло преднамеренно. В случае с пленниками Платоновой пещеры, однако, мы понимаем, что сжатие по длине возникает потому, что обитатели пещеры видят лишь двумерные тени подлинных трехмерных предметов. Если взглянуть сверху, можно без труда увидеть, что более короткой тень становится, когда линейку поворачивают под углом к стене.



И, как учит нас другой греческий философ, Пифагор, длина линейки всегда одинакова, но проекции ее на стену и на линию, перпендикулярную стене, всегда комбинируются так, чтобы получалась одна и та же длина, как показано на рисунке.



Отсюда появляется знаменитая теорема Пифагора, $L^2 = x^2 + y^2$, которую школьники зубрят ровно с того момента, когда в школах начали преподавать геометрию. В трех измерениях это выражение приобретает вид $L^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Через два года после того, как Эйнштейн написал свою первую работу по теории относительности, Минковский осознал, что, возможно, неожиданные следствия постоянства скорости света и новые отношения между пространством и временем, вскрытые Эйнштейном, тоже отражают

более глубокую связь между тем и другим. Зная, что фотография, которую мы обычно считаем двумерным представлением трехмерного пространства, на самом деле являет собой образ, развернутый как в пространстве, так и во времени, Минковский рассудил, что наблюдатели, которые движутся друг относительно друга, видят перед собой, возможно, *разные* трехмерные срезы четырехмерной Вселенной, в которой пространство и время рассматриваются с единых позиций.

Если вернуться к примеру с линейкой в релятивистском случае, где линейка движущегося наблюдателя по измерениям другого наблюдателя оказывается короче, чем она была бы в системе отсчета, где она покоится, нам следует также помнить, что для этого наблюдателя линейка, помимо всего прочего, «размазана» во времени — события возле двух ее концов, одновременные для наблюдателя, который покоится по отношению к линейке, оказываются не одновременными для другого наблюдателя.

Минковский понял, что данный факт можно примирить со всеми остальными, если считать, что различные трехмерные картины, воспринимаемые каждым из наблюдателей, являются в определенном смысле по-разному «повернутыми» проекциями некоего четырехмерного «пространства-времени», в котором существует инвариантная четырехмерная пространственно-временная «длина», одинаковая для всех наблюдателей. Четырехмерное пространство, которое мы сегодня называем пространством Минковского, несколько отличается от своего трехмерного эквивалента: время как четвертое измерение требует немного иного обращения, чем три пространственных измерения x , y и z . Четырехмерная «пространственно-временная длина», которую мы обозначим S , вычисляется

не по аналогии с трехмерной длиной, которую мы выше обозначили L ,

$$S^2 = x^2 + y^2 + z^2 + t^2,$$

а следующим образом:

$$S^2 = x^2 + y^2 + z^2 - t^2.$$

Знак минус, который появляется перед t^2 в определении пространственно-временной длины S , придает пространству Минковского его особые свойства. Именно благодаря ему для разных наблюдателей, движущихся друг относительно друга, картины пространства и времени различаются не просто как результат поворота, по аналогии с тенями в Платоновой пещере, но чуть более сложным образом.

И вот в одночасье изменилась сама природа нашей Вселенной. Как поэтично сказал об этом Минковский в 1908 г., «отныне пространство само по себе и время само по себе обречены стать лишь тенями, и только своеобразный союз того и другого сохранится как независимая реальность».

Таким образом, специальная теория относительности Эйнштейна на первый взгляд делает физическую реальность субъективной и зависящей от наблюдателя, но *относительность* в этом смысле — название неудачное. Напротив, теория относительности — это теория абсолютов. Пространственные и временные измерения, возможно, субъективны, но «пространственно-временные» измерения универсальны и абсолютны. Скорость света универсальна и абсолютна. А четырехмерное пространство

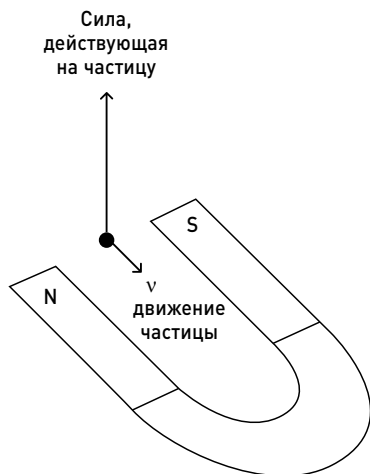
Минковского — это поле, на котором разворачивается игра природы.

Радикальность изменения картины мира в результате переосмысления Минковским теории Эйнштейна можно лучше всего, наверное, понять, ознакомившись с реакцией самого Эйнштейна на картину, нарисованную Минковским. Первоначально Эйнштейн назвал ее «поверхностной ученостью», подразумевая, что это всего лишь хитроумные математические упражнения, лишённые физического смысла. Чуть позже он дополнительно подчеркнул это свое мнение, сказав: «С тех пор как теорию относительности наводнили математики, я и сам перестал ее понимать». В конечном итоге, однако, — и так происходило несколько раз в его жизни — Эйнштейн изменил свое мнение и признал, что это озарение было необходимо для понимания истинной природы пространства и времени; позже именно на фундаменте, заложенном Минковским, Эйнштейн выстроил общую теорию относительности.

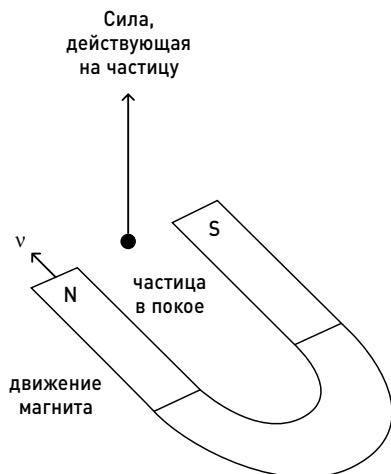
Было бы трудно, если вообще возможно, догадаться, что вращающиеся колеса и магниты Фарадея со временем приведут к такому глубокому пересмотру наших представлений о пространстве и времени. Тем не менее ретроспективно мы понимаем, что объединение электричества и магнетизма принципиально позволяло предвосхитить рождение мира, где движению суждено раскрыть новую фундаментальную реальность.

Возвращаясь к Фарадею и Максвеллу, заметим, что одним из важнейших открытий, стронувших лавину, было то, что магнит действует на движущийся электрический заряд какой-то странной силой. Вместо того чтобы толкать заряд вперед или назад, магнит прикладывает к нему силу, всегда направленную под прямым углом к направлению его движения.

Эту силу, называемую силой Лоренца, — в честь физика Хендрика Лоренца, который тоже подошел вплотную к созданию теории относительности, — можно изобразить так:



Заряд, пролетающий между полюсами магнита, получает толчок вверх.



А теперь представьте, как выглядит эта ситуация в системе отсчета, связанной с частицей. В этой системе частица покоится, а магнит движется относительно нее.

Но мы ведь договорились, что на покоящуюся заряженную частицу действуют только электрические силы. Тогда, поскольку частица в этой системе отсчета покоится, сила, толкающая ее вверх, на этом рисунке должна интерпретироваться как электрическая.

Выходит, то, что для одного — магнетизм, для другого — электричество, а объединяет их движение. Объединение электричества и магнетизма в своей основе отражает тот факт, что равномерное относительное движение открывает наблюдателям разные картины реальности.

Движение — явление, первоначально исследованное Галилеем, — в конечном итоге, через три столетия, дало человеку ключ к новой реальности — той, в которой едины не только электричество и магнетизм, но также пространство и время. Никто в самом начале не мог предвидеть, как будет разворачиваться эта сага.

Однако в этом-то и заключается прелесть величайшей из когда-либо рассказанных историй.

ТЕНИ РЕАЛЬНОСТИ

**И когда они шли по дороге и разговаривали,
внезапно появилась огненная боевая колесница
и огненные кони и разлучили их...**

II Цари 2:11

Можно было бы подумать, что в 1908 г., вскоре после шока от открытия неожиданной скрытой связи между пространством и временем, природа уже не могла стать еще более странной. Но космосу нет дела до наших чувств. И свет еще раз дал человеку ключ от двери в кроличью нору, ведущую в мир, по сравнению с которым приключения Алисы покажутся скучными.

Удивительно, но связи, вскрытые Эйнштейном и Минковским, можно понять интуитивно, если исходить из постоянства скорости света, и я попытался это продемонстрировать. Куда менее интуитивно понятным оказалось следующее открытие, суть которого состояла в том, что на очень малых масштабах природа ведет себя так, что человеческая интуиция не в состоянии полностью свыкнуться с таким поведением, потому что мы никогда не сталкиваемся с ним непосредственно. Как однажды сказал Ричард

Фейнман, никто не понимает квантовую механику, если под *пониманием* иметь в виду формирование четкой физической картины, которая интуитивно ощущается как совершенно ясная.

Даже спустя много лет после открытия законов квантовой механики эта дисциплина упорно продолжает приносить сюрпризы. К примеру, в 1952 г. астрофизик Хэнбери Браун построил аппарат для измерения углового размера крупных радиоисточников на небе. Инструмент работал так хорошо, что Браун вместе с коллегой Ричардом Твиссом попытался при помощи той же идеи проанализировать оптический свет отдельных звезд и определить их угловой размер. Многие физики утверждали, что их инструмент, названный амплитудным интерферометром, принципиально не сможет работать. Квантовая механика, утверждали они, исключает такую возможность.

Но прибор работал. Это был не первый случай, когда физики ошибались по поводу квантовой механики, и, надо полагать, не последний...

Близкое знакомство со странным поведением квантовой механики часто означает необходимость принять нечто на первый взгляд невозможное. Как иронично сформулировал сам Браун, когда пытался объяснить теорию своего амплитудного интерферометра, они с Твиссом занимались толкованием «парадоксальной природы света, или, если угодно, объяснением непостижимого — делом, которое неожиданным образом изрядно напоминало проповедь Афанасьевского символа веры». В самом деле, подобно многим странным эффектам в квантовой механике, Святая Троица — Отец, Сын и Дух Святой, воплощенные одновременно в едином существе, — тоже на первый взгляд невозможна. Сходство, однако, на этом заканчивается.

Здравый смысл говорит нам, что свет не может быть волной и частицей в одно и то же время. Однако, несмотря на суждения здравого смысла и на то, нравится нам это или нет, эксперименты утверждают, что дело обстоит именно так. В отличие от символа веры, созданного в V веке, этот факт не является ни вопросом семантики, ни вопросом выбора, ни даже вопросом веры. Нам нет нужды еженедельно декламировать квантово-механические символы веры, чтобы сделать их менее гротескными или более правдоподобными.

Об «интерпретациях квантовой механики» говорят не без серьезной причины. Дело в том, что «классическая» картина реальности, а именно картина мира, описываемая ньютоновскими законами классического движения и знакомая нам по опыту в человеческих масштабах, не способна отразить полную картину происходящего вокруг. Поверхностный мир наших восприятий скрывает ключевые аспекты процессов, лежащих в основе наблюдаемых нами явлений. Так и Платоновы философы не могли открыть биологические процессы, управляющие людьми, наблюдая только тени людей на стене. Никакой уровень анализа, скорее всего, не позволил бы им полностью разобраться в реальности, порождающей эти темные фигуры.

Квантовый мир бросает вызов нашим представлениям о разумном — или даже возможном. Это означает, что на малых пространственных масштабах и на коротких отрезках времени простое классическое поведение макроскопических объектов, к примеру бейсбольных мячей, летящих от подающего игрока к принимающему, попросту не работает. Вместо этого на малых масштабах объекты демонстрируют множество разных вариантов классического, а также

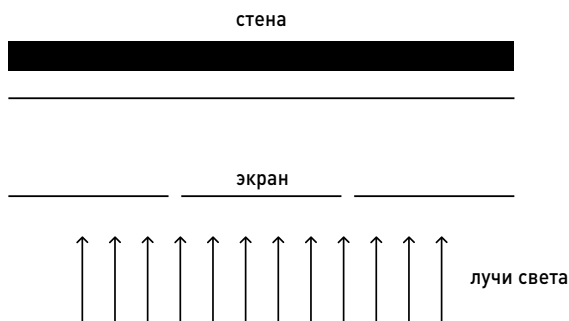
запрещенного классической теорией поведения — в одно и то же время.

Квантовая механика, как и почти вся физика со времен Платона, началась с размышлений ученых о свете. Поэтому вполне уместно начать разговор о квантовом безумии тоже со света; в данном случае уместно вернуться к важному эксперименту, о котором первым сообщил один из самых разносторонних британских профессоров, Томас Юнг, около 1800 г., — к знаменитому «эксперименту с двумя щелями».

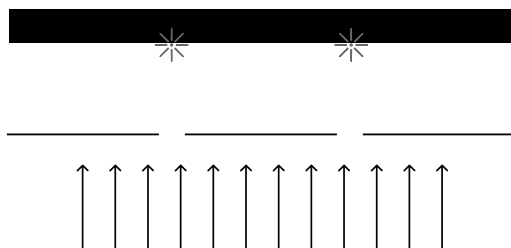
Юнг жил в эпоху, которую нам сегодня трудно даже представить; в то время талантливый и трудолюбивый человек мог совершить прорывные открытия во множестве различных областей науки. Но Юнг был не просто талантливым и трудолюбивым человеком. Он был настоящим вундеркиндом, который научился читать в два года, а к тринадцати успел прочесть все основные греческие и латинские эпические поэмы, построить микроскоп и телескоп и заняться сразу четырьмя иностранными языками. Позже, получив медицинское образование и став врачом, Юнг первым, в 1806 г., предложил современную концепцию энергии, сегодня пронизывающую все без исключения области научных исследований. Одно это обеспечило бы ему место в истории, но в свободное время он, помимо этого, одним из первых занялся расшифровкой иероглифов Розеттского камня. Он разрабатывал физику упругих материалов, ту самую, где мы сегодня пользуемся модулем Юнга, и участвовал в первых попытках прояснить физиологию цветного зрения. А его смелая демонстрация волновой природы света (которая стала возражением против почти общепринятого мнения Исаака Ньютона о том, что свет состоит из частиц) оказалась настолько убедительной, что легла

в основание последующего открытия Максвеллом электромагнитных волн.

Эксперимент Юнга очень прост. Вернемся в пещеру Платона и рассмотрим экран, помещенный перед задней стеной пещеры. Продедаем в этом экране две щели, как показано на рисунке (вид сверху).

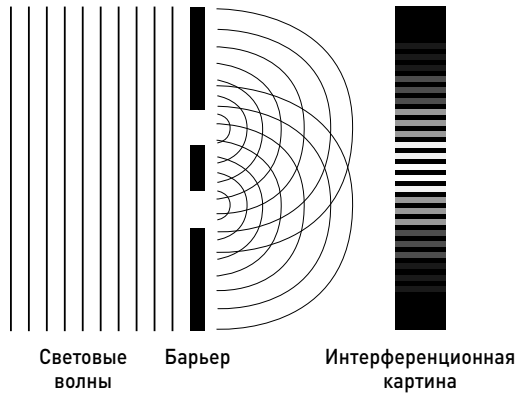


Если световые лучи состоят из частиц, то те из них, что проходят сквозь щели, образуют на стене две яркие линии ровно позади щелей.



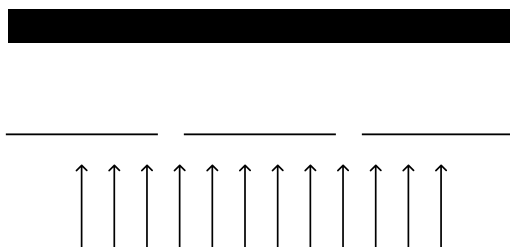
Однако было хорошо известно, что волны, в отличие от частиц, отклоняются возле препятствий и узких щелей и должны дать на стене совершенно иную картину. Если волны наталкиваются на барьер и если обе щели в нем

узкие, то от каждой щели распространяются кольцевые волны, а затем волны от двух щелей «интерферируют» друг с другом, в некоторых местах складываясь и, соответственно, усиливаясь, а в других — гася друг друга и, соответственно, ослабляясь. В результате на задней стене возникает рисунок из ярко освещенных и темных областей, как показано на рисунке.



Используя именно такой аппарат с узкими щелями, Юнг увидел на стене картину интерференции, характерную для волн, и таким образом наглядно продемонстрировал волновую природу света. Это событие, имевшее место в 1804 г., стало важной вехой в истории физики.

Можно проделать тот же эксперимент, что и Юнг, но не со светом, а с элементарными частицами, к примеру с электронами. Если направить пучок электронов на фосфоресцентный экран (скажем, экран старого электроннолучевого телевизора), мы увидим яркую точку в том месте, где пучок электронов попадает на экран. Теперь давайте поставим перед экраном две щели, как делал Юнг в эксперименте со светом, и направим на экран широкий пучок электронов.



Основываясь на тех же рассуждениях, которые я приводил для света, можно было бы ожидать появления двух ярких линий за каждой из щелей, через которые электроны проходят к экрану. Однако как вы, вероятно, уже догадались, на самом деле получится нечто иное, по крайней мере если щели достаточно узки и близки друг к другу. Вы увидите интерференционную картину, аналогичную тем, что наблюдал Юнг для световых волн. Получается, что электроны, представляющие собой частицы, в данном случае ведут себя в точности как световые волны. В квантовой механике частицы обладают волновыми свойствами.

Тот факт, что электронные «волны», исходящие из одной щели, могут интерферировать с электронными «волнами», исходящими из другой, конечно, является неожиданным и странным, но гораздо более странно то, что происходит, если мы посылаем электроны к экрану *по одному*. Даже в этом случае на экране возникает такая же интерференционная картина. Каким-то непонятным образом каждый электрон интерферирует сам с собой. Электроны определенно не похожи на бильярдные шары.

Интерпретировать это можно следующим образом. Вероятность попадания электрона в каждую точку экрана можно определить, если считать каждый электрон летящим не по одной-единственной траектории, а по множеству

различных траекторий *одновременно*, причем некоторые из этих траекторий проходят через одну щель, а некоторые — через другую. Затем те, что проходят через первую щель, интерферируют с теми, что проходят через вторую, — и формируют наблюдаемую на экране интерференционную картину.

Проще говоря, нельзя утверждать, что электрон проходит либо через одну, либо через другую щель, как бильярдный шар. Получается, что электрон проходит не через одну из щелей, а через обе щели одновременно.

Вздор, скажете вы и предложите вариант эксперимента, при помощи которого можно было бы это доказать. Установим регистраторы электронов возле каждой из щелей: они должны щелкать, когда через соответствующую щель пролетит электрон.

И действительно, когда электроны по одному летят к экрану, каждый раз срабатывает лишь одно устройство. Так что каждый электрон, судя по всему, все же проходит только через одну щель, а не через обе одновременно.

Однако если вы теперь *посмотрите* на рисунок, образованный электронами на экране позади щелей, то окажется, что он изменился и теперь вместо первоначальной интерференционной картины там наблюдается то, что мы ожидали увидеть с самого начала: яркая область за каждой из двух щелей, как если бы экран обстреливали не волнами, а миллиардами шариков или пуль.

Иными словами, пытаясь проверить нашу классическую интуицию, мы изменили поведение электронов. Или, как чаще говорят в квантовой механике, измерение состояния системы может изменить ее поведение.

Один из многих невозможных на первый взгляд аспектов квантовой механики заключается в том, что не существует

такого эксперимента, который позволяет продемонстрировать, что в отсутствие измерений электроны ведут себя доброязычным, классическим образом.

Странная волноподобная природа объектов, таких как электроны, которые вместе с тем могут рассматриваться и как частицы, математически выражается приписыванием каждому электрону так называемой *волновой функции*, которая описывает вероятность нахождения этого электрона в любой заданной точке. Если волновая функция принимает ненулевые значения во множестве различных точек, то это означает, что положение электрона не может быть определено заранее, до точного измерения его местонахождения. Иначе говоря, есть ненулевая вероятность, что электрон вовсе не находится в некоторой конкретной точке пространства до того, как он обнаружен там измерением.

Можно подумать, что все здесь сводится к простой проблеме отсутствия у нас доступа к информации о местоположении частицы до тех пор, пока мы не проведем измерение. Однако эксперимент Юнга с двойной щелью, проведенный над электронами, ясно показывает, что в действительности дело обстоит совершенно не так. Любая «здоровая» классическая картина того, что происходит в промежутке между измерениями, расходится с имеющимися данными.



Странное поведение электронов было не первым свидетельством того, что микроскопический мир невозможно понять при помощи интуитивной классической логики. И вновь, в продолжение идущей со времен Платона традиции революционных перемен в наших представлениях о природе, открытие квантовой механики началось с рассмотрения света.

Вспомним, что, выполняя эксперимент Юнга со световыми лучами и двумя щелями в Платоновой пещере, мы получаем на стене обнаруженную Юнгом интерференционную картину, наглядно демонстрирующую, что свет на самом деле волна. Пока все в порядке. Однако, если источник света достаточно слаб, а мы пытаемся определить, через какую из двух щелей проходит свет, происходит нечто странное. Мы видим, что световой луч проходит либо через одну щель, либо через другую, но не через обе сразу. И, как в случае с электронами, картина на стене меняется и будет выглядеть так, как выглядела бы, если бы свет представлял собой не волну, а поток частиц.

На самом деле свет тоже ведет себя и как частица, и как волна, в зависимости от обстоятельств, при которых вы его измеряете. Отдельные частицы света, которые мы сегодня называем фотонами, впервые назвал *квантами* немецкий физик-теоретик Макс Планк. В 1900 г. он предположил, что свет может приниматься или поглощаться только мельчайшими порциями (хотя идею о том, что свет, возможно, существует в виде дискретных пакетов, еще раньше, в 1877 г., пустил в ход великий Людвиг Больцман).

Я еще больше заужавал Планка, когда узнал подробности его жизни. Подобно Эйнштейну, он читал лекции без оплаты, и после завершения работы над диссертацией ему не предложили академической должности. Все свое время в этот период он посвящал попыткам разобраться в природе теплоты, результатом чего стали несколько значительных работ по термодинамике. Через пять лет после защиты диссертации Планку наконец предложили пост в университете, а затем он быстро поднялся по служебной лестнице и в 1892 г. стал штатным профессором престижного Берлинского университета.

В 1894 г. Планк обратился к вопросу о природе света, излучаемого нагретыми телами, причем отчасти он руководствовался при этом коммерческими соображениями (это первый известный мне пример, когда фундаментальная физика мотивировалась материальными соображениями). Ему поручили разобраться, как получить максимальное количество света от новоизобретенных лампочек, используя минимальное количество энергии.

Мы все знаем, что при включении нагревательный элемент в электрической печке сперва светится красным, а затем, раскаляясь все сильнее, начинает светиться голубым. Но почему? Как ни удивительно, ни один традиционный подход к этой проблеме не мог объяснить эти наблюдения. После шести лет упорных исследований Планк представил миру революционную теорию излучения, вполне соответствовавшую наблюдениям.

Первоначально ничего революционного в его выводах не было, но не прошло и двух месяцев, как он пересмотрел свой анализ с включением в него идей о том, что происходит на фундаментальном уровне. Рассказ Планка о своей работе расположил меня к нему сразу же, после первого же прочтения; он писал, что его новый подход возник как «акт отчаяния... Я готов был пожертвовать любыми прежними своими убеждениями в физике».

Для меня это заявление отражает то фундаментальное качество, которое делает научный процесс таким эффективным и которое так ясно представлено в картине рождения квантовой механики. «Прежние убеждения» — это всего лишь убеждения, ждущие своего ниспровержения — эмпирическими данными, если необходимо. Мы отбрасываем прежние взлелеянные представления, как вчерашнюю газету, если они не работают. А в деле объяснения природы

излучения, испускаемого веществом, они откровенно не работали.

Планк вывел свой закон излучения из фундаментального предположения о том, что свет, представляющий собой волну, тем не менее испускается только «пакетами» некоторой минимальной энергии, пропорциональной частоте излучения, о котором идет речь. Он назвал константу, связывающую энергию с частотой, квантом действия; сегодня мы называем эту величину постоянной Планка.

Возможно, это звучит не слишком революционно, и Планк, подобно Фарадею с его электрическими полями, рассматривал свою гипотезу всего лишь как формальный математический костыль, призванный помочь в анализе явления. Позже он писал: «На самом деле я не слишком много об этом думал». Тем не менее предположение Планка о том, что свет излучается частицеподобными пакетами, откровенно трудно примирить с классической картиной света как волны. Энергия, переносимая волной, непосредственно связана с размахом ее колебаний, который может меняться непрерывно, начиная с нуля. Однако, согласно Планку, количество энергии, которое может быть испущено в виде световой волны заданной частоты, имеет абсолютный минимум. Этот минимум получил название кванта энергии.

Впоследствии Планк попытался развить классическое физическое представление об этих квантах энергии, но потерпел неудачу, что причинило ему, как он выразился, «большое огорчение». И все же, в отличие от многих коллег, он сумел признать: Вселенная существует не для того, чтобы облегчать ему жизнь. Имея в виду физика и астронома сэра Джеймса Джинса, не желавшего отказываться от классических представлений даже перед лицом верных

доказательств, представляемых излучением, Планк сказал: «Я не в состоянии понять упрямство Джинса — он служит примером теоретика, какого и существовать-то не должно, как Гегеля в философии. Тем хуже для фактов, если они не укладываются в теорию». (Для пояснения замечу — на случай, если у читателей возникнет желание написать мне: эту хулу на Гегеля возвел Планк, а не я!)

Позже Планк подружился еще с одним физиком, который позволил фактам навести себя на революционную идею, — с Альбертом Эйнштейном. В 1914 г., когда Планк стал ректором Берлинского университета, он организовал в нем для Эйнштейна новую профессорскую должность. Поначалу Планк не мог принять замечательную гипотезу Эйнштейна, выдвинутую в том же 1905 г., когда была создана специальная теория относительности, о том, что не только вещество излучает свет квантовыми пакетами, но и сами световые лучи существуют как пучки этих квантов, то есть что свет как таковой состоит из частицеподобных объектов, которые мы сегодня называем фотонами.

Эйнштейн пришел к этой гипотезе в попытке объяснить явление, известное как фотоэлектрический эффект, или просто фотоэффект; явление это открыл в 1902 г. Филипп Ленард — физик, чей антисемитизм сыграл ключевую роль в том, что присуждение Нобелевской премии Эйнштейну так долго откладывалось, и в том, что странным образом он в конечном итоге получил ее не за работы по теории относительности, а за объяснение фотоэффекта. Суть фотоэффекта заключается в том, что свет, падающий на металлическую поверхность, может выбивать электроны из атомов и порождать электрический ток. Однако, каким бы интенсивным ни был свет, если частота его окажется ниже некоторого порогового значения, электроны испускаться

не будут. Фотоэлектрический ток возникнет только тогда, когда частота поднимается выше порогового значения.

Эйнштейн понял и оказался совершенно прав, что этот факт можно объяснить, если свет состоит из минимальных энергетических порций, причем энергия такой порции соразмерна частоте света, как допустил Планк в отношении света, излучаемого веществом. В этом случае только свет с частотами, превышающими некоторую пороговую частоту, мог содержать кванты достаточно энергичные, чтобы выбивать из атомов электроны.

Планк мог еще принять квантованность испускания света, необходимую для объяснения его закона излучения, но предположение о том, что свет в принципе квантован (то есть разбит на частицеподобные порции) было настолько чуждо общепринятым представлениям о свете как электромагнитной волне, что Планк уперся. Только через шесть лет, на конференции в Бельгии — на ставшем знаменитым Сольвеевском конгрессе, Эйнштейн смог наконец убедить Планка в том, что от классической картины света придется отказаться, а кванты — или, иначе, фотоны — реальны.

Эйнштейн также был первым, кто использовал тот факт, который позже он сам отверг в своем знаменитом афоризме, высмеивающем вероятностную суть квантовой механики и реальности: «Бог не играет в кости со Вселенной». Эйнштейн показал, что если атомы *спонтанно* (то есть *без непосредственной причины*) поглощают и испускают конечные порции излучения, когда электроны в них прыгают между дискретными энергетическими уровнями, то из этого можно вывести планковский закон излучения.

Эйнштейн начал квантовую революцию, но по иронии судьбы сам к ней так и не присоединился. Забавно, но при

этом он был, возможно, первым, кто использовал вероятностные рассуждения для описания природы вещества — стратегию, которую последующие физики, превратившие квантовую механику в полноценную теорию, помещают на передний план. В результате Эйнштейн одним из первых физиков продемонстрировал, что Бог все же *играет* в кости со Вселенной.

Продолжая эту аналогию чуть дальше, заметим, что Эйнштейн одним из первых физиков продемонстрировал, что классическое представление о причинности в квантовом царстве начинает сбоить. Многие возражают против моего предположения о том, что Вселенная не нуждалась в причине и просто возникла из ничего. Но ведь именно это происходит со светом, которым вы пользуетесь при чтении этой страницы. Электроны в нагретых атомах испускают фотоны — фотоны, которых не существовало до момента, когда они были испущены; фотоны испускаются спонтанно и без конкретной причины. Почему же мы привыкли, по крайней мере в какой-то степени, к идее о том, что из ничего без причины могут возникать фотоны, но не признаём, что то же самое может случаться с целыми вселенными?

Осознание того, что электромагнитные волны одновременно представляют собой частицы, послужило началом квантовой революции, изменившей все наши взгляды на природу. Быть частицей и волной в одно и то же время в классике невозможно — это должно быть очевидно из рассказанного в данной главе, — но это возможно в квантовом мире. Должно быть очевидно также, что это было только начало.

ВСЕЛЕННАЯ ПРИЧУДЛИВЕЕ ВЫДУМКИ

Итак, не оставляйте упования вашего, которому
предстоит великое воздаяние.

Евр. 10:35

Народная мудрость гласит, что физики обожают изобретать безумную эзотерику для объяснения окружающего нас мира — либо потому, что нам делать больше нечего, либо потому, что мы испорчены от природы. Однако, как показывает открытие квантового мира, чаще бывает наоборот: это природа тащит нас, ученых, прочь от знакомых безопасных знаний, а мы брыкаемся и вопим изо всех сил.

Тем не менее сказать, что пионерам, начавшим толкать нас вперед, в квантовый мир, недоставало смелости, было бы глубочайшей неправдой. Путешествие, в которое они пускались, было беспрецедентным, и никто не мог указать им дорогу. Мир, в который они входили, бросал вызов здравому смыслу и классической логике, в нем на каждом шагу требовалась готовность к внезапной смене правил игры.

Представьте себе, что вы едете в другую страну, где все жители говорят на незнакомом языке, а законы не основываются на опыте, сколько-нибудь сравнимым с опытом, полученным вами на протяжении жизни. Более того, представьте, что дорожные знаки там спрятаны и к тому же могут меняться от места к месту. Если вам удастся все это представить, вы сможете отчасти понять, куда направлялись бунтари, перевернувшие наши представления о природе в первой половине XX века.

Аналогия между исследованием странных и новых квантовых миров и путешествием по незнакомой местности может показаться натянутой, но именно такие взаимоотношения того и другого нашли себе параллель в жизни не кого иного, как Вернера Гейзенберга, одного из основателей квантовой механики, вспомнившего однажды летний вечер 1925 г. на острове Гельголанд, чудесном оазисе в Северном море, где он вдруг понял, что открыл теорию:

Было... уже три часа ночи, когда передо мной лежал окончательный результат расчетов. Закон сохранения энергии сохранял силу для всех членов... я уже не мог более сомневаться в математической непротиворечивости и согласованности наметившейся тут квантовой механики. В первый момент я до глубины души испугался. У меня было ощущение, что я гляжу сквозь поверхность атомных явлений на лежащее глубоко под нею основание поразительной внутренней красоты, и у меня почти кружилась голова от мысли, что я могу теперь проследить всю полноту математических структур, которые там, в глубине, развернула передо мной природа. Я был так взволнован, что не мог и думать о сне. Поэтому я вышел в уже начинавшихся рассветных

сумерках из дома и направился к южной оконечности острова, где одиноко выступавшая в море скала-башня всегда дразнила во мне охоту взобраться на нее. Мне удалось это сделать без особых трудностей, и я дождался на ее вершине восхода солнца.*

В свое время Гейзенберг, только-только получив степень доктора философии, перебрался в известный немецкий университет в Гёттингене, чтобы работать с Максом Борном и попытаться предложить непротиворечивую теорию квантовой механики (термин этот впервые был использован в 1924 г. в статье Борна «О квантовой механике»). Однако Гейзенберга свалила сенная лихорадка, и ему пришлось бежать из живописных зеленых мест к морю. Там он отшлифовал свои идеи о квантовом поведении атомов и отослал работу Борну, который рекомендовал ее к публикации.

Возможно, вы знакомы с именем Гейзенберга не в последнюю очередь благодаря знаменитому принципу, названному его именем. Принцип неопределенности Гейзенберга приобрел своеобразную нью-эйджевскую ауру, дающую хлеб множеству шарлатанов, которые внушают людям, будто квантовая механика предлагает надежду на мир, в котором осуществима любая мечта, какой бы необычайной она ни была.

Есть и другие знакомые имена: Бор, Шрёдингер, Дирак, а позже Фейнман и Дайсон. Каждый из этих людей совершил большой скачок в неизвестность. Но они были не одиноки. Физика — коллективная дисциплина. Слишком часто о науке рассказывают так, будто герой истории испытал

* Цит. по: Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. — М.: Наука, 1989. С. 190. — *Прим. науч. ред.*

внезапное озарение ночью и в полном одиночестве. Между тем Гейзенберг несколько лет работал над квантовой механикой вместе со своим научным руководителем, блестящим немецким ученым Арнольдом Зоммерфельдом (его студенты удостоились суммарно четырех Нобелевских премий, а постдоки-ассистенты — трех), а позже — с Борном (который в конце концов, почти тридцать лет спустя, тоже получил признание в виде Нобелевской премии), а также с одним из молодых коллег — Паскуалем Йорданом. В любом крупном открытии, которое мы награждаем именем и какой-нибудь премией, участвует целый легион трудолюбивых, хотя, как правило, менее известных людей, каждый из которых понемногу продвигает вперед линию атаки. Крохотные шажки и медленное продвижение в науке — норма, а не исключение.

Самые замечательные прыжки в неизвестность часто далеко не сразу оцениваются по достоинству, в том числе и авторами. Эйнштейн, к примеру, не доверял своей красивой общей теории относительности в достаточной мере, чтобы поверить в ее предсказание о том, что Вселенная не может быть статичной, но должна расширяться или сжиматься, пока наблюдения не продемонстрировали наглядно расширение Вселенной. И мир не перевернулся, когда вышла статья Гейзенберга. Друг и современник Гейзенберга, блестящий и вспыльчивый физик Вольфганг Паули (еще один будущий нобелевский лауреат из числа ассистентов Зоммерфельда), счел эту работу по существу математической мастурбацией; Гейзенберг ответил на это высказывание в шутливой форме:

Ты вынужден будешь признать, что, в всяком случае, мы не собираемся разрушить физику из злых умыслов

намерений. Когда ты бранишь нас, что мы такие ослы, что не придумали ничего физически нового, то это вполне может быть правдой. Но тогда ты такой же болван, потому что ты тоже не даешь нового... Не думай обо мне дурно, и многожды кланяюсь.*

Физика никогда не развивается линейно, как это описывают в учебниках. В реальной жизни, как и во многих хороших детективах, имеются и ложные следы, и недопонимания, а ошибки и неверные повороты попадают буквально на каждом шагу. История развития квантовой механики полна ими. Но я собираюсь перейти сразу к сути, поэтому пропущу в своем рассказе Нильса Бора, чьи идеи заложили первые фундаментальные правила квантового мира для атомов и стали основой значительной части современной химии. Мы пропустим также Эрвина Шрёдингера, который был весьма колоритной личностью и имел по крайней мере троих детей от разных любовниц, а его волновое уравнение стало самым знаменитым образом квантовой механики.

Вместо этого я сосредоточусь сначала на рассказе о Гейзенберге или даже скорее не о самом Гейзенберге, но о полученном им результате, прославившем его имя, — о принципе неопределенности Гейзенберга. Его часто интерпретируют как утверждение о том, что наблюдение за квантовыми системами влияет на их свойства, что проявилось в нашей дискуссии об электронах и фотонах, проходящих через две щели и попадающих на экран позади них.

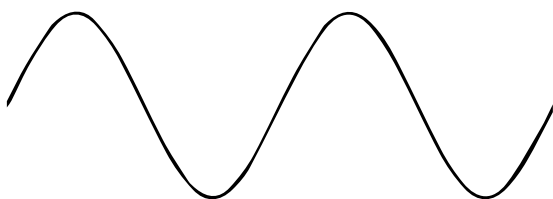
К сожалению, это ведет к неверному пониманию, будто каким-то образом наблюдатели, в особенности

* Цит. (кроме последней фразы) по: Мехра Дж. Рождение квантовой механики // УФН т. 122 (1977), вып. 4, с. 732. — *Прим. науч. ред.*

наблюдатели-люди, играют ключевую роль в квантовой механике. Этим недопониманием, в частности, давно пользуется мой твиттер-противник Дипак Чопра, который, судя по высказываемой чепухе, считает, кажется, что Вселенной не существовало бы, если бы не было нашего сознания, которое и формирует ее свойства. К счастью, Вселенная появилась несколько раньше, чем сознание Чопры, и неплохо развивалась задолго до появления жизни на Земле.

В действительности принцип неопределенности Гейзенберга как таковой не имеет вообще никакого отношения к наблюдателям, хотя и ограничивает — это правда — их способность проводить измерения. На самом же деле этот принцип представляет собой фундаментальное свойство квантовых систем, и его можно вывести относительно прямолинейно и математически, отталкиваясь от их волновых свойств.

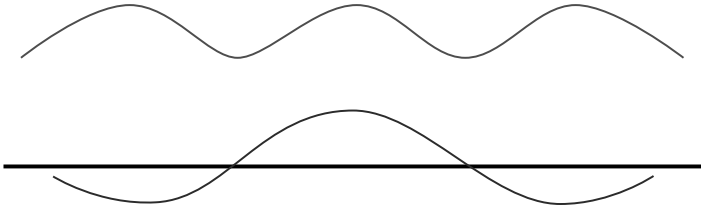
Рассмотрим, к примеру, простое волноподобное возмущение с единственной частотой (и длиной волны), которое распространяется, колеблясь, вдоль направления x .



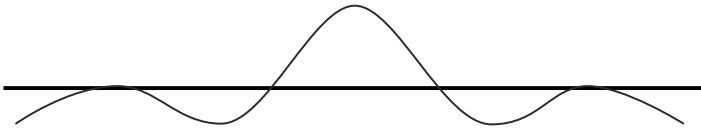
Как я уже отмечал, в квантовой механике частицы имеют волноподобный характер. Благодаря Максу Борну мы знаем, что для любой точки квадрат амплитуды, связанной с частицей волны — той, что мы сегодня вслед за Шрёдингером называем волновой функцией частицы, — определяет

вероятность нахождения частицы в данной точке. Поскольку амплитуда изображенной на рисунке колеблющейся волны более или менее постоянна во всех пиках, такая волна, если она соответствует амплитуде вероятности обнаружения электрона, подразумевала бы более или менее равномерную вероятность его появления в любой точке вдоль траектории.

А теперь рассмотрим, как выглядело бы возмущение, если бы представляло собой сумму двух движущихся вдоль оси x волн с немного разными частотами (длинами):

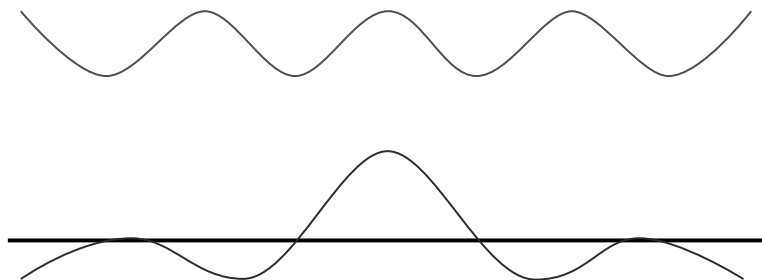


Складывая две волны, получим в результате следующее возмущение:

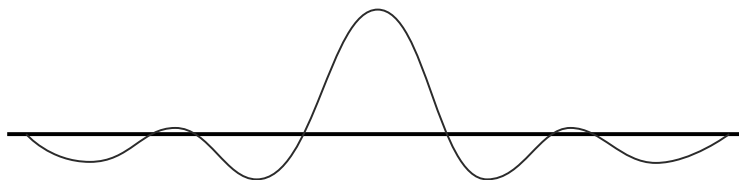


Из-за небольшого различия в длинах этих двух волн их пики и впадины будут в основном гасить друг друга, или «отрицательно интерферировать» всюду, за исключением редких участков, где совпадут два пика (одно из таких мест показано на рисунке). Это напоминает нам феномен волновой интерференции в эксперименте Юнга с двумя щелями, который я описывал выше.

Если мы добавим к этой комбинации еще одну волну с немного другой длиной,

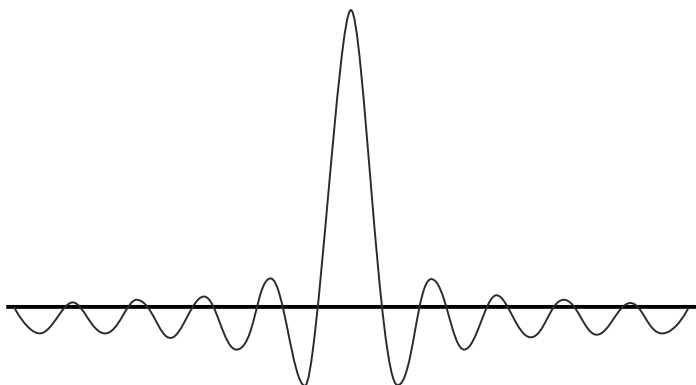


то результирующая волна будет выглядеть так:



Интерференция размывает колебания еще сильнее, за исключением тех мест, где пики двух волн складываются, делая суммарную пиковую амплитуду волны намного выше, чем во всех остальных местах.

Можете сами представить, что произойдет, если я буду продолжать этот процесс, добавляя к первоначальной достаточно много других волн со слегка отличающимися частотами. Чем дальше, тем больше амплитуды волн будут гасить друг друга во всех точках, кроме некоторой небольшой области в центре рисунка и других отдаленных областей, где все пики могли бы вновь сойтись вместе.



Чем больше число слегка различающихся частот, которые я складываю вместе, тем уже окажется получившийся в итоге самый высокий центральный пик. А теперь представьте, что все это являет собой волновую функцию некой частицы. Чем больше амплитуда центрального пика, тем выше вероятность обнаружить частицу где-то в пределах ширины этого пика. Но ширина этого центрального пика все же никогда не становится совсем нулевой, так что возмущение остается распределенным по некоторой небольшой и все более сужающейся области.

Теперь вспомните: Планк и Эйнштейн рассказали нам, что, по крайней мере для световых волн, энергия каждого кванта излучения, то есть каждого фотона, прямо связана с его частотой. Неудивительно, что аналогичное соотношение действует и для волн вероятности, связанных с массивными частицами, но в этом случае с частотой, отвечающей частице волны, оказывается связан импульс частицы.

Отсюда и соотношение неопределенностей Гейзенберга: если мы хотим локализовать частицу в небольшой области, то есть получить как можно более узкий высочайший пик на ее волновой функции, то должны считать, что волновая

функция получается сложением множества различных волн с чуть различающимися частотами. Но это означает, что импульс частицы, связанный с частотой ее волновой функции, должен быть несколько «размазан». Чем уже доминантный пик волновой функции частицы, тем выше число различных частот (то есть импульсов), которые необходимо сложить, чтобы получить итоговую волновую функцию. Выражаясь более привычным языком, чем точнее мы хотим определить конкретное положение частицы, тем выше окажется неопределенность ее импульса.

Как видите, здесь нет никакого ограничения, связанного с реальными наблюдениями, или с сознанием, или с конкретными технологиями проведения наблюдений. Это свойство, неразрывно связанное с тем фактом, что в квантовом мире каждой частице соответствует волновая функция, а у частиц с фиксированным конкретным импульсом волновая функция характеризуется одной конкретной частотой.

Открыв это соотношение, Гейзенберг первым дал эвристичное объяснение его причин в форме мысленного эксперимента. Чтобы измерить положение частицы, вам нужно, чтобы от нее отразился свет, а чтобы узнать положение с высокой точностью, нужен свет с достаточно короткой длиной волны. Но чем меньше длина волны, тем больше частота и выше энергия, связанная с квантом данного излучения. Отражение света все более высоких энергий от частицы, очевидно, меняет ее энергию и импульс. Таким образом, после измерения вы сможете узнать положение частицы в данный момент, но при этом диапазон возможных энергий и импульсов, которые вы передали частице, рассеивая на ней свет, окажется довольно большим.

По этой причине многие путают соотношение неопределенностей Гейзенберга с так называемым «эффектом наблюдателя» в квантовой механике. Но, как видно из приведенного мной примера, по своей сути принцип неопределенности Гейзенберга не имеет никакого отношения к наблюдениям. Перефразируя слова одного моего друга, можно сказать, что если бы сознание играло роль в определении результатов квантово-физических экспериментов, то нам бы пришлось при публикации этих результатов обсуждать, о чем думал экспериментатор (к примеру, о сексе), проводя эксперимент. Но мы этого не делаем. Ведь очевидно, что взрывы сверхновых, породившие атомы, из которых состоит ваше и мое тело, вполне успешно произошли задолго до того, как возникло наше сознание.

Принцип неопределенности Гейзенберга во многих отношениях подводит черту под классической картиной мира. Вне зависимости от любых технологий, которые нам, возможно, когда-нибудь удастся создать, природа кладет абсолютный предел нашей способности одновременно и со сколько угодно высокой степенью точности знать импульс и положение любой частицы.

Но вопрос стоит даже более категорично, чем подразумевает это утверждение. *Знание* также не имеет к нему никакого отношения! Как я рассказывал, описывая эксперимент с двумя щелями, не существует смысла, в котором частица в произвольный момент обладает одновременно точным положением в пространстве и точным значением импульса. Она обладает тем и другим в широком диапазоне *в одно и то же время* — до тех пор, пока мы не провели измерение и тем самым не зафиксировали по крайней мере один из этих параметров в узком диапазоне, определяемом качеством нашего измерительного оборудования.



Следующий после Гейзенберга шаг в раскрытии квантового безумия реальности сделал исследователь, от которого трудно было этого ожидать, — Поль Адриен Морис Дирак. Хотя в определенном смысле Дирак был идеальным кандидатом для этой работы. Говорят, Эйнштейн позже высказался о нем так: «Это постоянное балансирование на головокружительном пути между гениальностью и безумием ужасно».

Когда я думаю о Дираке, на ум приходит старый анекдот. Маленький ребенок не разговаривает, его родители бегают по врачам в поисках помощи, но ничто не помогает. И вот на свой четвертый день рождения он спускается к завтраку, поднимает глаза на родителей и говорит: «Тост остыл!» Родители прыгают от радости, обнимаются, а потом спрашивают ребенка, почему он никогда не говорил раньше. Он отвечает: «До сих пор все было в порядке».

Дирак славился своей лаконичностью, и существует немало историй о том, как он чурался всякого остроумия и вообще, кажется, воспринимал все сказанное ему буквально. Рассказывают, что однажды, когда Дирак во время лекции писал на доске, кто-то в аудитории поднял руку и сказал: «Я не понимаю вот этот шаг, который вы только что записали». Дирак очень долго стоял молча, пока тот человек в аудитории не спросил, собирается ли он отвечать на вопрос. На что Дирак ответил: «Никакого вопроса не было».

Мне довелось однажды говорить с Дираком по телефону — и я был в ужасе. Я был тогда студентом и хотел пригласить его на встречу, которую организовывал для студентов со всей страны. Я совершил ошибку и позвонил ему сразу после занятия по квантовой механике, только усилившего мой ужас. Когда я, запинаясь, проговорил приглашение, он

немного помолчал, а потом ответил одной фразой: «Нет, думаю, что мне нечего сказать студентам».

Но оставим в стороне личные качества. Дирак ни в коем случае не был робок в своей погоне за новым святым Граалем — математической формулировкой, которая могла бы объединить два новых революционных достижения XX века — квантовую механику и теорию относительности. Несмотря на многочисленные попытки, после Шрёдингера (который вывел свое знаменитое волновое уравнение во время двухнедельного загула в горах с несколькими приятельницами) и Гейзенберга, раскрывшего самые основания квантовой механики, никому не удалось полностью объяснить поведение электронов, связанных глубоко в недрах атома.

Эти электроны обладают (в среднем) скоростями, составляющими заметную часть скорости света, и для их описания необходимо использовать специальную теорию относительности. Уравнение Шрёдингера хорошо описывало энергетические уровни электронов во внешних частях простых атомов, таких как атомы водорода, где оно служило квантовым расширением ньютоновской физики. Но там, где требовалось учитывать релятивистские эффекты, оно уже не было корректным описанием.

В конечном итоге Дирак добился успеха там, где все остальные потерпели неудачу, и открытое им уравнение — одно из важнейших в современной физике элементарных частиц — называется, что неудивительно, уравнением Дирака. (Несколькими годами позже, когда Дирак впервые встретился с физиком Ричардом Фейнманом, к которому мы вскоре перейдем, Дирак произнес после обычной для него неловкой паузы: «У меня есть уравнение. А у вас?»)

Уравнение Дирака было красиво и, как полагается первому релятивистскому описанию электрона, позволяло верно и точно предсказать энергетические уровни всех электронов в атоме и частоты излучаемого ими света, описывая, таким образом, природу атомного спектра как такового. Но у этого уравнения была одна фундаментальная проблема. Казалось, что оно предсказывало новые частицы, которых не существовало.

Чтобы сформировать математический аппарат, необходимый для описания электрона, движущегося на релятивистских скоростях, Дираку пришлось ввести совершенно новый формализм, в котором для описания электронов использовались четыре различные величины.

Насколько мы, физики, можем судить, электроны представляют собой микроскопические точечные частицы нулевого, по существу, радиуса. Тем не менее в квантовой механике они ведут себя как вращающиеся волчки и поэтому обладают тем, что физики называют угловым моментом, или моментом импульса, а для краткости — спином. Момент импульса выражает тот факт, что объект, если уж он начал вращаться, не остановится, пока вы не приложите к нему некоторую силу, тормозящую вращение. Чем быстрее объект вращается или чем он массивнее, тем больше у него момент импульса.

Как ни печально, не существует классического способа представить, как точечный объект, подобный электрону, может вращаться вокруг своей оси. Поэтому спин — одна из тех областей, где квантовая механика попросту не имеет интуитивно понятного классического аналога. В предложенном Дираком релятивистском расширении уравнения Шрёдингера электроны могут обладать только двумя возможными значениями момента импульса, который мы

называем просто спином электрона. Можно считать, что электроны вращаются либо вокруг одного направления (можно назвать его «вверх»), либо вокруг противоположного ему (можно назвать его «вниз»). Поэтому для описания различных конфигураций электронов требуется две величины: одна для электронов с положительным спином (условно направленным вверх), другая для электронов с отрицательным спином (условно направленным вниз).

После некоторой первоначальной путаницы стало ясно, что еще две величины, необходимые Дираку для описания электронов в релятивистском варианте квантовой механики, описывают, на первый взгляд, что-то безумное — *другую* версию электрона с той же массой и спином, но с противоположным электрическим зарядом. Если электроны, по соглашению физиков, имеют отрицательный заряд, то эти новые частицы должны были иметь положительный заряд.

Дирак был в замешательстве. Подобных частиц никто никогда не наблюдал. В момент отчаяния Дирак даже предположил, что, может быть, эта положительно заряженная частица на самом деле является протоном, однако масса протона, как известно, почти в две тысячи раз превосходит массу электрона. Он даже привел кое-какие не слишком убедительные аргументы, пытаясь объяснить, почему эта положительно заряженная частица может обладать большей массой. Так, он предполагал, что большой вес вызван различными возможными электромагнитными взаимодействиями частицы с пустым вроде бы пространством, которое, как он считал, может быть населено потенциально бесконечным морем ненаблюдаемых частиц. На самом деле это утверждение не так безумно, как кажется, но попытка объяснить почему, завела бы нас в те

самые дебри, которых мы хотим здесь избежать. В любом случае удалось быстро показать, что эта идея не работает. Во-первых, потому, что математика этого не подтверждает и новые частицы все же должны иметь ту же массу, что и электроны. Во-вторых, если бы протон и электрон были в некотором смысле зеркальными частицами, они бы аннигилировали друг с другом — и тогда обычное нейтральное вещество не могло быть стабильным. Дирак вынужден был признать, что если его теория верна, то где-то в природе должна существовать новая положительная версия электрона.

К счастью для Дирака, менее чем через год после его вынужденной капитуляции Карл Андерсон обнаружил в космических лучах частицы, идентичные электронам, но с противоположным зарядом. Так появился на свет позитрон, и люди слышали, как Дирак сказал в ответ на замечание по поводу его нежелания сделать выводы, прямо следующие из его же собственных математических выкладок: «Мое уравнение оказалось умнее меня!» Много позже он, говорят, дал другое объяснение тому, что не признал в свое время возможность существования новой частицы: «Чистая трусость».

«Предсказание» Дирака, хоть и сделанное практически против его воли, стало замечательной вехой. Впервые на базе чисто теоретических представлений и математических выкладок была предсказана новая частица. Подумайте об этом.

Максвелл в свое время в результате проведенного им объединения электричества и магнетизма «предсказал» задним числом существование света. Лавуазье предсказал существование Нептуна на базе наблюдений за аномалиями орбиты Урана. Но теперь перед нами было предсказание

нового фундаментального свойства Вселенной на базе чисто теоретических рассуждений об устройстве природы на ее фундаментальнейших масштабах, без всякой предварительной прямой экспериментальной мотивации. В принципе могло показаться, что это достижение — вопрос веры, но на самом деле ни о какой вере здесь речи не шло — в конце концов, сам предсказатель в это не поверил, — и хотя, подобно вере, оно предсказывало некую ненаблюдаемую реальность, в отличие от веры, эту предсказанную реальность можно было экспериментально проверить; по идее, предсказание легко могло оказаться ошибочным.

Открытие Эйнштейном теории относительности совершило настоящую революцию в наших представлениях о пространстве и времени, а открытия Шрёдингера и Гейзенберга, связанные с законами квантовой механики, революционно изменили наши представления об атоме. Дирак первым сумел совместить то и другое и получил новое окно в скрытую природу вещества на куда меньших масштабах. Его успех ознаменовал собой начало современной эпохи в физике элементарных частиц и задал тренд, продолжавшийся почти столетие.

Во-первых, если уравнение Дирака считать применимым в более общем случае и к другим частицам, — а оснований считать, что это не так, не было никаких, — то «античастицы» (как их позже стали называть) должны иметься не только у электронов, но и у всех остальных известных в природе частиц.

Антивещество стало популярной темой научной фантастики. Звездные корабли, такие как «Энтерпрайз» в «Звездном пути», неизменно использовали антивещество в качестве топлива, а возможность создания бомб из антивещества стала самой глупой составляющей сюжета

мистического триллера «Ангелы и демоны». Но само по себе антивещество реально. В космических лучах были обнаружены не только позитроны, но позже и антипротоны, и антинейтроны.

На фундаментальном уровне антивещество не представляет собой ничего особенно странного. В конце концов, позитроны точно такие же, как электроны, только заряд имеют противоположный. Они не «падают вверх» в гравитационном поле, как многие думают. Вещество и антивещество действительно могут взаимодействовать и полностью аннигилировать в чистое излучение, что выглядит как-то зловеще. Но аннигиляция по схеме частица-античастица всего лишь один из множества новых возможных видов взаимодействия элементарных частиц, которые могут иметь место, если уж мы проникаем в субатомное царство. Более того, потребовалось бы немало антивещества, чтобы энергия, полученная при его аннигиляции с веществом, хотя бы зажгла лампочку.

Однако именно в этой обычности как раз и кроется реальная странность антивещества. Его можно уверенно назвать странным, потому что Вселенная, в которой мы живем, наполнена веществом, но не антивеществом. Вселенная из антивещества выглядела бы точно так же, как наша. А вселенная, состоящая из вещества и антивещества в равных долях, что на первый взгляд, конечно, представляется самым разумным ее устройством, довольно скоро (если в промежутке не произошло бы ничего необычного) стала бы весьма скучным местом, поскольку вещество и антивещество быстро аннигилировали бы друг с другом и в такой вселенной не осталось бы ничего, кроме излучения.

Вопрос о том, почему в нашем мире много вещества, но мало антивещества, остается одним из интереснейших

в современной физике. Но признание странности антивещества на том основании, что мы нигде его не встречаем, когда-то побудило меня предложить следующую аналогию. Антивещество можно назвать странным в том же смысле, в каком странными можно назвать... ну, скажем, бельгийцев. По своей природе они, конечно, не странные но если в большой лекционной аудитории попросить бельгийцев поднять руки, как однажды сделал я, то окажется, что их там почти нет.

Правда, когда я недавно читал лекцию в Бельгии, мою аналогию, судя по всему, не оценили.

ИЗЛОМ ВРЕМЕНИ

Ибо что такое жизнь ваша? Пар, являющийся на малое время, а потом исчезающий.

Иаков 4:14

Каждая скрытая природная связь, которую удавалось раскрыть науке со времен Галилея, вела физику в новом и неожиданном направлении. Объединение электричества и магнетизма прояснило нам скрытую природу света. Объединение света с Галилеевыми законами движения прояснило скрытые связи между пространством и временем, заключенные в принципе относительности. Объединение света и вещества открыло нам странную квантовую вселенную. А объединение квантовой механики с принципом относительности указало на существование античастиц.

Открытие античастиц Дираком стало результатом того, что он «догадался», каким должно быть правильное уравнение, описывающее релятивистское квантовое взаимодействие электронов с электромагнитными полями. Он мало чем мог подтвердить свою находку, и это одна из причин, почему и сам Дирак, и другие поначалу так скептически отнеслись к этому результату. Почему физика не может

обойтись без антивещества, прояснилось благодаря работе Ричарда Фейнмана, одного из крупнейших физиков второй половины XX века.

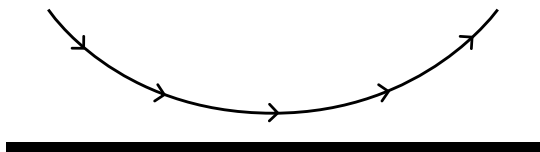
Фейнман был полной противоположностью Дираку. Если Дирак слыл до крайности немногословным, то Фейнман — компанейским человеком и отличным рассказчиком. Если Дирак почти (а может, и вообще) никогда намеренно не шутил, то Фейнман был любителем розыгрышей и откровенно наслаждался жизнью во всех ее проявлениях. Если Дирак был слишком застенчив, чтобы встречаться с женщинами, то Фейнман после смерти первой жены сменил немало подружек. Но физика создает странные союзы, так что Фейнман с Дираком навсегда останутся интеллектуально связанными, и вновь благодаря свету. Вместе они помогли завершить построение долгожданной квантовой теории излучения.

Фейнман, принадлежавший к следующему поколению, преклонялся перед Дираком и называл его в числе своих главных кумиров в физике. Поэтому не удивительно, что короткая статья Дирака 1939 г., где он предложил новый подход к квантовой механике, подтолкнула Фейнмана к работе, которая в итоге принесла ему Нобелевскую премию.

Гейзенберг и Шрёдингер объяснили квантово-механическое поведение систем: как, начав с некоторого исходного состояния системы, рассчитать ее эволюцию во времени. Однако свет снова дал ключ к другому способу понимания квантовых систем.

Мы привыкли думать, что свет всегда распространяется по прямой. Однако это не так. Это можно заметить, наблюдая за миражом над длинным прямым участком шоссе в жаркий день. Дорога впереди кажется мокрой, потому что свет неба преломляется и изгибается, проходя

последовательно через множество слоев теплого воздуха вблизи поверхности дороги, пока, повернув слегка вверх, не попадает в ваш глаз.



Французский математик Пьер де Ферма предложил в 1650 г. другой способ осмысления этого явления. Свет движется быстрее в теплом, менее плотном воздухе, нежели в холодном. Поскольку теплее всего воздух у поверхности, свету требуется меньше времени, чтобы попасть в ваш глаз по траектории, проходящей вдоль поверхности, чем напрямую. Ферма сформулировал принцип, получивший название *принципа наименьшего времени*, который гласит: чтобы определить итоговую траекторию любого светового луча, нужно просто проверить все возможные пути из точки А в точку В и найти тот из них, что требует наименьшего времени.

Формулировка звучит так, будто свет обладает собственной волей. Я с трудом удержался и не сказал, что свет рассматривает все возможные пути и выбирает тот из них, который требует наименьшего времени, поскольку уверен, что Дипак Чопра тут же процитировал бы меня и заявил, что я наделяю свет сознанием. Свет не имеет сознания, но математический результат выглядит так, будто свет выбирает самый быстрый путь.

А теперь вспомните, что в квантовой механике световые лучи и электроны движутся вовсе не по единственной траектории от точки к точке, а по всем возможным траекториям

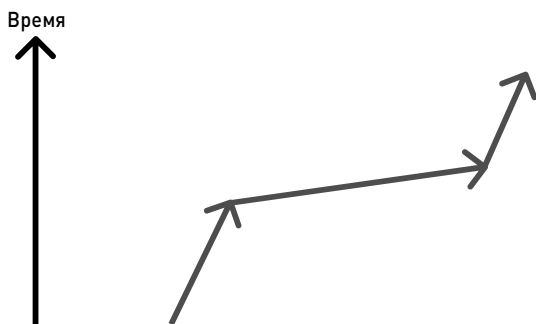
одновременно. Каждая траектория имеет определенную вероятность быть измеренной, но классическая, занимающая минимум времени траектория имеет самую большую вероятность из всех.

В 1939 г. Дирак предложил способ расчета всех таких вероятностей и их суммирования для определения квантово-механических шансов на то, что частица, вылетающая из точки А, в конечном итоге окажется в точке В. Ричард Фейнман, в то время студент-старшекурсник, услышав о статье Дирака на пивной вечеринке, математически вывел конкретный пример, на котором продемонстрировал, что эта идея работает. Взяв посыл Дирака в качестве стартового момента, Фейнман получил результаты, идентичные тому, что можно было получить с использованием подходов Шрёдингера и Гейзенберга, по крайней мере в простых случаях. Что еще важнее, Фейнман теперь мог использовать новую формулу «суммирования по траекториям» в применении к тем квантовым системам, которые невозможно легко описать или проанализировать другими методами.

В итоге Фейнман доработал свой математический метод, чтобы развить релятивистское уравнение Дирака для квантового поведения электронов до полностью непротиворечивой квантово-механической теории взаимодействия между электронами и светом. За эту работу, положившую начало теории квантовой электродинамики (КЭД), в 1965 г. он был удостоен Нобелевской премии, которую разделил с Джулианом Швингером и Синъитиро Томонагой.

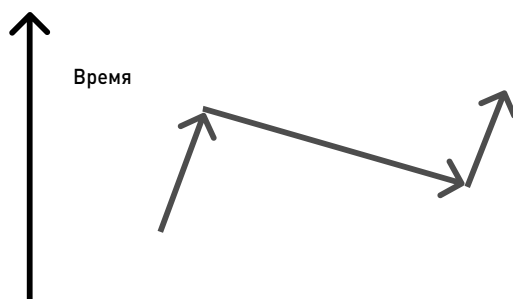
Однако еще до завершения этой работы Фейнман описал интуитивную физическую причину, по которой теория относительности в сочетании с квантовой механикой непременно требует существования античастиц.

Рассмотрим электрон, движущийся вдоль некоторой возможной «квантовой» траектории. Что это означает? До тех пор пока я не пытаюсь измерить положение или скорость электрона в процессе его движения, он движется одновременно по всем возможным траекториям между двумя точками. Среди этих траекторий есть и неразрешенные в классической физике, поскольку при движении по ним нарушались бы такие принципы, как, например, запрет превышения скорости света, вытекающий из теории относительности. С другой стороны, принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что, даже если я попытаюсь измерить характеристики электрона во время его движения на каком-то небольшом промежутке времени, его скорости все же останется присуща некоторая неопределенность, избавиться от которой невозможно. Так что даже если я буду измерять траекторию электрона в различных точках, я не смогу исключить возможность его странного неклассического поведения в промежутках. Представьте, к примеру, следующую траекторию.

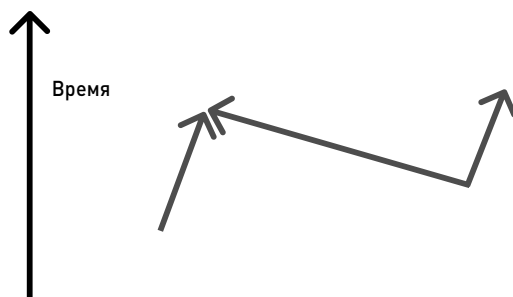


В течение короткого времени в середине изображенного периода электрон движется быстрее света.

Но Эйнштейн говорит нам, что время относительно, и разные наблюдатели измерят разные промежутки времени между событиями. А если какая-то частица движется быстрее света в одной системе отсчета, то в другой системе отсчета наблюдателю покажется, что она движется назад во времени, как изображено на следующем рисунке (это одна из причин, почему теория относительности ограничивает скоростью света движение всех наблюдаемых частиц).



Фейнман понял, что во второй системе отсчета это выглядело бы как электрон, который некоторое небольшое время движется вперед во времени, затем движется назад во времени, затем снова движется вперед. Но как выглядит электрон, который движется назад во времени? Поскольку электрон — отрицательно заряженная частица,



отрицательный заряд, движущийся назад во времени слева направо, эквивалентен положительному заряду, движущемуся вперед во времени справа налево. Таким образом, наша схема эквивалентна следующей картине.

На этом рисунке все начинается с электрона, движущегося вперед во времени, но затем в какой-то момент из пустого пространства внезапно появляются электрон и еще одна частица, которая очень похожа на электрон, но обладает противоположным зарядом; после этого положительно заряженная частица движется влево, опять же вперед во времени, пока не встречается с первоначальным электроном и не аннигилирует с ним; в результате остается один электрон, который продолжает движение.

Все это происходит на таком масштабе времени, который невозможно наблюдать непосредственно, — ведь если бы все это можно было наблюдать, то такое странное поведение, нарушающее фундаментальные положения теории относительности, было бы невозможно. Однако можете быть уверены, что внутри бумаги в книге, которую вы сейчас читаете, или за экраном вашей электронной книги такого рода процессы происходят постоянно.

Но если такая траектория возможна в невидимом квантовом мире, то античастицы — частицы, идентичные известным частицам, но обладающие противоположным по знаку электрическим зарядом (в уравнениях этой теории они выглядят как частицы, движущиеся назад во времени), — должны существовать и в видимом мире. Это также делает возможным спонтанное возникновение в пустом пространстве пар частица-античастица, при условии что они аннигилируют за такое короткое время, чтобы их недолгое существование нельзя было измерить.

Рассуждая подобным образом, Фейнман не только привел физический аргумент в пользу существования античастиц, требуемых для объединения теории относительности и квантовой механики, но и наглядно продемонстрировал, что ни в какой конкретный момент нельзя сказать наверняка, что в некоторой области пространства находится только одна или две частицы. Потенциально бесконечное количество «виртуальных» пар частица-античастица, существование которых настолько мимолетно, что их нельзя наблюдать непосредственно, может спонтанно появляться и исчезать на столь коротких масштабах времени, что измерить их мы не в состоянии.

Это описание звучит настолько дико, что неминуемо должно вызывать недоверие с вашей стороны. В конце концов, если мы не можем непосредственно измерить эти виртуальные частицы, то как мы можем утверждать, что они существуют?

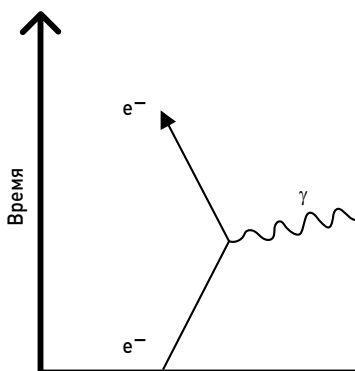
Ответ на этот вопрос заключается в том, что, хотя мы не в состоянии регистрировать воздействие виртуальных пар частица-античастица непосредственно, мы можем опосредованно сделать вывод об их присутствии, поскольку они косвенно изменяют свойства систем, которые мы можем наблюдать.

Теория, в которой такие виртуальные частицы присутствуют наряду с электромагнитными взаимодействиями электронов и позитронов, называется квантовой электродинамикой и представляет собой самую лучшую из всех научных теорий, имеющихся в нашем распоряжении. Предсказания, основанные на этой теории, сравниваются с данными наблюдений и совпадают с ними с точностью до десяти и более значащих цифр. Ни в какой другой области физической науки не достигается такого уровня

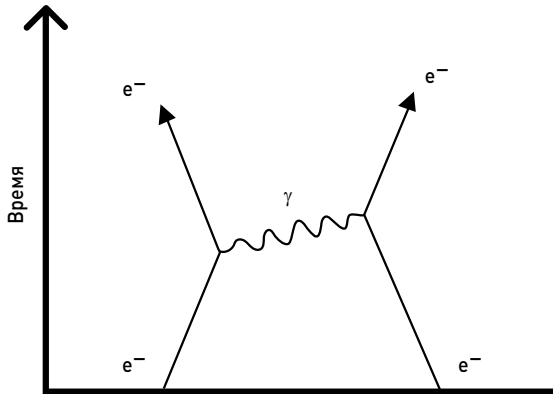
точности соответствия наблюдаемых данных и предсказаний, основанных на непосредственном применении первичных принципов на самых фундаментальных масштабах, которые мы в состоянии описать.

Но такая согласованность между теорией и наблюдениями возможна лишь в том случае, если при расчетах учитываются эффекты, связанные с виртуальными частицами. В действительности сам феномен существования виртуальных частиц подразумевает, что в квантовой теории взаимодействие между частицами *всегда* передается путем обмена виртуальными частицами, тем способом, о котором я сейчас расскажу.

В квантовой электродинамике электромагнитные взаимодействия осуществляются путем поглощения или испускания квантов электромагнитной энергии, то есть фотонов. Следуя Фейнману, мы схематически изобразим такое взаимодействие в виде электрона, который испускает волнистый «виртуальный» фотон (γ) и изменяет направление своего движения.



Тогда электрическое взаимодействие между двумя электронами можно изобразить следующим образом.



В данном случае электроны взаимодействуют друг с другом, обмениваясь виртуальным фотоном, который спонтанно испускается электроном слева и поглощается другим электроном через такое короткое время, что наблюдать этот фотон невозможно. После такого взаимодействия эти два электрона отталкиваются друг от друга и разлетаются.

Это объясняет также, почему электромагнетизм является дальнедействующей силой. Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, если мы измеряем состояние системы на протяжении некоторого отрезка времени, то в измеренной энергии этой системы присутствует соответствующая неопределенность. Причем чем больше этот отрезок времени, тем меньше связанная с ним неопределенность энергии. У фотона нет массы, и поэтому, в соответствии с эйнштейновским соотношением для массы и энергии, виртуальный безмассовый фотон при рождении может нести сколь угодно малое количество энергии. Это означает, что он может существовать и двигаться сколь угодно долгое время — и, соответственно, преодолеть сколь угодно большое расстояние — до своего поглощения;

при этом он по-прежнему будет находиться под защитой принципа неопределенности, поскольку переносимая им энергия так мала, что никакого видимого нарушения закона сохранения энергии не происходит. Таким образом, электрон на Земле способен испустить виртуальный фотон, который долетит до альфы Центавра на расстоянии четырех световых лет и там окажет воздействие на электрон, который его поглотит. Однако если бы фотон был не безмассовым, а обладал массой покоя m , то минимальная переносимая им энергия определялась бы формулой $E = mc^2$ и без видимого нарушения закона сохранения энергии он мог бы пройти до момента своего поглощения лишь конечное расстояние (поскольку у него на это есть лишь конечное время).

Но с виртуальными частицами связана серьезная потенциальная проблема. Если частицы могут обменяться одной виртуальной частицей или одна виртуальная пара частица-античастица может спонтанно возникнуть из вакуума, то почему то же самое не может произойти с двумя частицами или парами, а то и с бесконечным их числом? Более того, если виртуальные частицы должны исчезать за время, обратно пропорциональное переносимой ими энергии, то что мешает частицам выскакивать из пустого пространства, неся сколь угодно большую энергию, но существовать при этом сколь угодно малое время?

Попытавшись учесть эти эффекты, физики пришли в своих расчетах к бесконечным результатам.

Что с ними делать? Игнорировать.

На самом деле не совсем игнорировать, но систематически замечать под ковер бесконечные составляющие в вычислениях, оставляя только конечные. При этом, разумеется, встают вопросы о том, как узнать те конечные части,

которые надо сохранить, и почему вся эта процедура оправдана.

Понадобилось несколько лет, чтобы ответить на эти вопросы, и Фейнман был в составе научной группы, которой удалось это сделать. Но и после этого на протяжении многих лет, вплоть до получения в 1965 г. Нобелевской премии, он считал весь этот проект своего рода фокусом и надеялся, что в какой-то момент появится более фундаментальное решение проблемы.

И все же есть веская причина игнорировать бесконечности, вносимые виртуальными частицами с произвольно высокими энергиями. В силу принципа неопределенности Гейзенберга эти энергичные частицы могут до своего исчезновения преодолевать лишь очень короткие расстояния. Как же убедиться, что наши физические теории, разработанные для объяснения явлений в масштабах, доступных сегодня нашим измерениям, работают точно так же и в очень малых масштабах? Может быть, в таких масштабах проявляется некая новая физика с новыми силами и новыми элементарными частицами?

Если бы нам требовалось знать все законы физики вплоть до бесконечно малых масштабов, чтобы объяснить явления в гораздо более крупных масштабах, доступных нашему восприятию, физика стала бы безнадежным делом. *Нам потребовалась бы теория всего, прежде чем мы смогли бы разработать теорию хотя бы чего-нибудь.*

На самом же деле разумными физическими теориями следует считать те, которые нечувствительны к любой возможной новой физике, проявляющейся на гораздо меньших масштабах, чем те, для описания которых наши теории были разработаны. Мы называем такие теории *перенормируемыми*, поскольку производим «перенормировку»

бесконечных без этой процедуры предсказаний, избавляясь от расходимостей и оставляя лишь конечные, разумные результаты.

Но одно дело — сказать, что так *следует* делать, и совсем другое — доказать, что это *можно* сделать. Потребовалось немало времени, чтобы разобраться в этой процедуре. В первом конкретном примере, призванном продемонстрировать, что такая процедура имеет смысл, были точно рассчитаны энергетические уровни атомов водорода, что позволило корректно рассчитать измеримый в лаборатории спектр света, испускаемого и поглощаемого этими атомами.

Хотя Фейнман и его коллеги-нобелиаты прояснили механизм математической реализации методики перенормировки, доказательство того, что квантовая электродинамика (КЭД) является «перенормируемой» теорией и позволяет точно предсказывать все физические величины, которые в принципе в ней измеримы, было завершено Фрименом Дайсоном. Его доказательство придало квантовой электродинамике беспрецедентный в физике статус. Квантовая электродинамика представляет собой полную теорию квантовых взаимодействий между электронами и светом и дает сопоставимые с наблюдениями предсказания со сколь угодно высокой точностью, которая ограничена лишь энергией и целеустремленностью теоретиков, проводящих расчеты. В результате мы можем с высочайшей точностью предсказывать спектры испускаемого атомами излучения и создавать лазерные системы и атомные часы, задающие новые стандарты точности измерения расстояния и времени. Предсказания квантовой электродинамики настолько точны, что мы можем проверять в экспериментах самые ничтожные отклонения от них в поисках

возможных новых физических законов, которые могут обнаружиться при исследовании все меньших и меньших масштабов пространства и времени.

Теперь, пятьдесят лет спустя, мы понимаем также, что квантовая электродинамика оказалась такой замечательной физической теорией отчасти благодаря связанной с ней *симметрии*. Симметрии в физике позволяют выявлять самые глубокие свойства физической реальности. Начиная с этого момента и далее в обозримом будущем именно поиск новых симметрий определяет прогресс в области физики.

Симметрии состоят в том, что некоторые изменения в первичных математических величинах, описывающих физический мир, не влекут за собой изменений в том, как мир функционирует или выглядит. К примеру, сферу можно повернуть в любом направлении на любой угол, и она при этом останется в точности такой же, какой была. Ничто в физике сферы не зависит от ее ориентации. То, что законы физики не меняются от места к месту, от момента к моменту, имеет глубокое значение. Симметрия физических законов относительно времени — то, что в них, судя по всему, ничего не меняется с течением времени, — влечет за собой закон сохранения энергии в физической вселенной.

В квантовой электродинамике одна из фундаментальных симметрий лежит в основе природы электрических зарядов. Мы совершенно произвольно называем их «положительными» и «отрицательными». Мы могли бы заменить каждый положительный заряд во Вселенной на отрицательный и наоборот, и Вселенная при этом выглядела бы и вела себя в точности так же, как сейчас.

Вообразите, к примеру, что мир — это одна гигантская шахматная доска с черными и белыми полями. Ничто

в шахматах не изменилось бы, замени я черный цвет на этой доске белым, а белый — черным. Белые фигуры стали бы черными и наоборот, но в остальном доска выглядела бы точно так же.

Заметим, что именно благодаря этой симметрии природы электрический заряд сохраняется: никакой положительный или отрицательный заряд не может спонтанно появиться в ходе какого бы то ни было процесса, даже квантово-механического, без одновременного появления равного по величине и противоположного по знаку заряда. Поэтому виртуальные частицы спонтанно возникают в пустом пространстве только парами, в сочетании с античастицами. Поэтому же на Земле случаются грозы с молниями. Электрические заряды скапливаются на поверхности Земли, потому что грозовые облака накапливают в своем основании большие отрицательные заряды. Единственный способ избавления от этих зарядов — сильный ток с поверхности земли вверх, к небу.

Закон сохранения заряда, вытекающий из этой симметрии, также можно понять с использованием моей шахматной аналогии. То, что белый квадрат должен непременно соседствовать с черным, означает, что при встречной замене черного и белого вид доски не меняется. Если бы нашлось два черных квадрата, стоящих рядом, это означало бы, что доска обладает некоторой суммарной «чернотой», и тогда «черное» и «белое» перестали бы быть произвольными эквивалентными ярлыками. Черное в этом случае физически отличалось бы от белого. Короче говоря, симметрия между черным и белым на доске оказалась бы нарушена.

А теперь будьте внимательны, поскольку сейчас речь пойдет об идее куда более тонкой, но намного более важной. Она настолько важна, что, по существу, на ней основана

вся современная теоретическая физика. При этом она настолько тонка, что ее трудно изложить без привлечения математики. Ее следствия продолжают выявлять до сих пор, хотя прошло уже больше ста лет с момента, когда она была впервые предложена. Так что не удивляйтесь, если для полного осмысления этой идеи вам потребуется пару раз перечитать ее описание. У физиков процесс ее осмысления занял значительную часть прошлого столетия.

Эта симметрия называется калибровочной по одной туманной исторической причине, о которой я расскажу чуть позже. Но странное название в данном случае несущественно. Важно, что подразумевает эта симметрия.

Калибровочная симметрия в электромагнетизме — это утверждение, что можно локально, в каждой точке пространства, изменить определение того, что есть положительный заряд, без изменения фундаментальных законов, связанных с электрическим зарядом, при условии, что будет также введена некоторая величина, которая помогает отследить это изменение определения от точки к точке. И этой величиной оказывается электромагнитное поле.

Попробуем разобрать это утверждение при помощи моей шахматной аналогии. Глобальная симметрия, описанная мною ранее, меняет черное на белое повсюду, так что при повороте шахматной доски на 180 градусов она несколько не меняется и выглядит точно так же, как прежде, и ясно, что на шахматной игре эта операция никак не скажется.

А теперь представьте, что вместо этого я заменяю черное на белое в одном квадрате, но не стану заменять белое

на черное в соседнем с ним квадрате. Тогда на доске появятся два смежных белых квадрата. Ясно, что такая доска с двумя соседствующими белыми квадратами не похожа на ту, что была у нас раньше. Играть на ней, как прежде, будет нельзя.

Но погодите минутку. Что, если в специальной инструкции будет написано, как должны вести себя шахматные фигуры, встретив два смежных поля одинакового цвета, где цвет одного квадрата был изменен, а другого — нет? Тогда правила игры можно оставить прежними, при условии что при каждом ходе я буду заглядывать в эту инструкцию. *Получается, что эта инструкция позволяет продолжать игру, как будто ничего не изменилось.*

В математике величина, которая устанавливает некоторое правило, связанное с каждой точкой на поверхности, такой, к примеру, как шахматная доска, называется функцией. В физике функция, определенная в каждой точке нашего физического пространства, называется полем; примером может служить электромагнитное поле, описывающее, насколько велики электрические и магнитные силы в каждой точке пространства.

А теперь самое главное. Свойства, которые должны характеризовать форму необходимой функции (позволяющей нам изменять наше определение электрического заряда от точки к точке, не меняя лежащей в основе физики, управляющей взаимодействием электрических зарядов), *в точности* соответствуют тем свойствам, что характеризуют вид правил, управляющих электромагнитными полями.

Иначе говоря, требование о том, чтобы законы природы оставались инвариантными при *калибровочном преобразовании* — а именно при таком преобразовании, которое

локально меняет то, что я называю положительным или отрицательным зарядом, точно так же требует и существования электромагнитного поля, управляемого в точности уравнениями Максвелла. *Калибровочная инвариантность*, как это называется, полностью определяет природу электромагнетизма.

Это ставит перед нами интересный философский вопрос. Что более фундаментально — симметрия или физические уравнения, выражающие эту симметрию? В первом случае, когда калибровочная симметрия природы требует существования фотонов, света и всех уравнений и явлений, открытых Максвеллом и Фарадеем, получается, что божественное повеление «Да будет свет!» становится идентичным требованию «Да будет электромагнетизм калибровочно инвариантным!». Может быть, этот вариант не столь красив и лаконичен, но менее верным он от этого не становится.

Вместо этого можно было бы сказать, что теория такова, какова она есть, а открытие математической симметрии в ее базовых уравнениях всего лишь счастливая случайность.

Разница между двумя этими точками зрения представляется в первую очередь семантической и именно поэтому может заинтересовать философов. Но природа все же снабжает нас некоторыми указаниями. Если бы квантовая электродинамика была единственной теорией, уважающей такую симметрию, то последняя точка зрения могла бы казаться более разумной.

На самом же деле *все* известные теории, описывающие природу на фундаментальном уровне, отражают тот или иной тип калибровочной симметрии. В результате физики в настоящее время склонны считать симметрии природы

фундаментальными, а теории, описывающие природу, ограниченными по своей форме так, чтобы соответствовать этим симметриям, которые, в свою очередь, отражают некие ключевые математические черты физической Вселенной.

Но что бы мы ни думали о рассмотрении этой эпистемологической проблемы, в конечном итоге физикам важнее всего тот факт, что открытие и применение этой математической симметрии — калибровочной инвариантности — позволяло нам прежде и позволяет сейчас лучше любой другой научной идеи открывать природу реальности в самых мельчайших ее масштабах. В результате все попытки продвинуться дальше наших современных представлений о четырех фундаментальных взаимодействиях — электромагнетизме, двух типах взаимодействия, связанных с атомными ядрами (сильном и слабом, с которыми мы скоро познакомимся), и гравитации, включая попытку создания квантовой теории гравитации, — строятся на математическом фундаменте калибровочной симметрии.



Странное название калибровочной симметрии не имеет отношения к квантовой электродинамике и является анахронизмом, связанным с одним из свойств общей теории относительности Эйнштейна, которая, подобно всем остальным фундаментальным теориям, также обладает калибровочной симметрией. Эйнштейн показал, что мы вольны выбрать для описания пространства вокруг нас любую локальную систему координат, но та функция, или поле, что говорит нам, как от точки к точке согласовывать между собой эти системы координат, связана с базовым свойством кривизны пространства, которая определяется энергией

и импульсом находящегося в нем вещества. Связка с веществом этого поля, которое мы воспринимаем как гравитационное, в точности определяется инвариантностью геометрии пространства при выборе разных систем координат.

Вдохновленный этой симметрией общей теории относительности, математик Герман Вейль предположил, что электромагнетизм также мог бы отражать базовую симметрию, связанную с физическими изменениями масштабов длины. Он назвал эти масштабы «калибрами» по ассоциации с шириной железнодорожной колеи (*англ.* track gauge). (Эйнштейн и Шелдон из «Теории Большого взрыва» были не единственными физиками, которых вдохновляли поезда.) Хотя предположение Вейля оказалось ошибочным, та симметрия, которая *действительно* приложима к электромагнетизму, стала известна как калибровочная.

Какова бы ни была этимология названия, калибровочная симметрия стала со временем важнейшей из всех известных нам симметрий в природе. С квантовой точки зрения — в квантовой теории электромагнетизма, квантовой электродинамике, — существование калибровочной симметрии приобретает еще большее значение. Это важнейшая черта, гарантирующая осмысленность КЭД.

Если задуматься о природе симметрии, то начинаешь понимать, что такая симметрия действительно может обеспечивать осмысленность квантовой электродинамики. Симметрии, к примеру, сообщают нам, что различные части естественного мира связаны между собой, а определенные величины остаются неизменными при преобразованиях того или иного типа. Квадрат не меняет вида, если повернуть его на девяносто градусов, потому что все его стороны равны по длине, а углы при всех вершинах одинаковы. Таким образом, симметрия может сообщить нам, что

различные математические величины, возникающие в результате физических расчетов, как, например, эффекты, связанные со множеством виртуальных частиц и множеством виртуальных античастиц, могут иметь одинаковую величину. Они могут также быть разного знака — и тем самым *в точности* гасить друг друга. Существование данной симметрии — вот причина, требующая такого точного взаимного сокращения.

Таким способом можно представить себе, что в квантовой электродинамике неприятные члены выражения, которые в иных условиях приводили бы к бесконечным величинам, взаимно уничтожаются с другими потенциально неприятными членами — и все их неприятные качества попросту исчезают. Именно так и происходит в квантовой электродинамике. Калибровочная симметрия гарантирует, что все бесконечности, которые могли бы возникнуть при выводе физических предсказаний, можно изолировать в нескольких неприятных слагаемых, которые в силу симметрии либо взаимно уничтожаются, либо не влияют ни на какие физически измеримые величины.

Этот глубокий и важный результат, доказанный десятилетиями работы самых изобретательных и талантливых физиков-теоретиков всего мира, придал КЭД статус наиболее точной и выдающейся квантовой теории XX столетия.

Тем неприятнее было обнаружить, что, хотя вся эта математическая красота действительно позволяет разумно интерпретировать одно из самых фундаментальных взаимодействий в природе — электромагнетизм, при рассмотрении сил, управляющих поведением атомных ядер, физики поджидали новые неприятности.

РАСПАД И ОБЛОМКИ

...нет ничего нового под солнцем.

Екклесиаст 1:9

Когда я впервые узнал, что мы, человеческие существа, радиоактивны, меня это шокировало. Я учился тогда в школе и слушал лекцию замечательного многогранного астрофизика Томми Голда, известного своими новаторскими работами по космологии, пульсарам и селенологии; он сообщил нам, что частицы, составляющие большую часть массы нашего тела, — нейтроны — нестабильны и имеют среднее время жизни около десяти минут.

Учитывая, что вы, как я надеюсь, читаете эту книгу уже больше десяти минут, вас это тоже может удивить. Разрешается этот кажущийся парадокс при помощи одного из первых и чудеснейших совпадений в природе — тех самых, что делают возможным наше существование. По мере того как мы продолжим все глубже исследовать вопрос: «Почему мы существуем?», это совпадение будет постоянно и весьма навязчиво маячить на нашем горизонте. Может показаться, что нейтрон невероятно далек от света, находившегося до сих пор в центре нашего повествования,

но мы увидим, что в конечном счете они глубоко связаны между собой. Распад нейтрона, ответственный за бета-распад нестабильных ядер, заставил физиков выйти за пределы простых и элегантных теорий света и открыть для исследования новые фундаментальные вопросы о Вселенной.

Я, однако, забегаю вперед.

В 1929 г., когда Дирак впервые сформулировал свою теорию электронов и излучения, казалось, что она может в конечном итоге оказаться теорией едва ли не всего на свете. Единственной силой, помимо электромагнетизма, в физике на тот момент значилась гравитация, а Эйнштейн как раз незадолго до того сделал большой шаг вперед в ее исследовании. Из элементарных частиц — электронов, фотонов и протонов — складывались все объекты, представлявшие собой необходимые для понимания атомов, химии, жизни и Вселенной.

Открытие античастиц несколько нарушило эту симпатичную картину, но, поскольку теория Дирака в свое время успешно их предсказала (хотя самому Дираку и пришлось догонять свою теорию), это нововведение больше напоминало лежачего полицейского на дороге к реальности, чем блокпост или объезд.

Затем наступил 1932 г. Вплоть до этого времени ученые предполагали, что атомы состоят исключительно из протонов и электронов. Здесь, правда, возникала некоторая проблема, поскольку не сходились массы атомов. В 1911 г. Резерфорд открыл существование атомного ядра, заключающего в себе почти всю массу атома и занимающего крохотную область, в сто тысяч раз уступающую по размерам области, занятой орбитами электронов. После этого открытия стало ясно, что массы тяжелых ядер в два с лишним раза превышают ту массу, о которой можно было бы говорить,

если число протонов в ядре в точности соответствует числу обращающихся вокруг ядра электронов, обеспечивая тем самым электрическую нейтральность атома.

На эту загадку был предложен простой ответ. На самом деле в ядре содержится вдвое больше протонов, чем электронов вокруг ядра, но еще столько же электронов прячется где-то внутри ядра — и суммарный заряд атома по-прежнему равняется нулю.

Однако из квантовой механики следовало, что электроны ни в коем случае не могут быть заключены в ядре. Доказывается это довольно сложно, но суть аргументов приблизительно такова: если элементарные частицы обладают волновыми свойствами, то для того, чтобы заключить их в маленький объем, величина длины волны частицы должна быть меньше размеров этой области пространства. Однако длина связанной с частицей волны в квантовой механике обратно пропорциональна импульсу, который несет эта частица, а поэтому же обратно пропорциональна ее энергии. Если бы электроны были заключены в области размером с атомное ядро, энергия, которой они при этом обладали бы, примерно в миллион раз превосходила бы характерные значения энергии, высвобождаемой электронами при переходах между энергетическими уровнями их атомных орбит.

Как могли электроны набрать такую энергию? Да никак. Ведь даже если бы электроны были прочно связаны с протонами внутри ядра электрическими силами, энергия связи, которая высвобождалась бы при «падении» электронов на ядро, была бы в десять с лишним раз меньше энергии, необходимой для удержания волновой функции квантово-механического электрона в области, не превышающей по размеру атомное ядро.

Так что и здесь числа попросту не сходились.

Физики того времени знали об этой проблеме, но терпели, поскольку ничего не могли сделать. Я подозреваю, что такой агностический подход считался благоразумным, и физики готовы были отложить свое недоверие до тех пор, пока не узнают больше, ведь проблема, о которой идет речь, была связана с самой передовой физикой квантовой механики и атомного ядра. Вместо того чтобы выдвигать экзотические новые теории (наверное, где-то были такие маргинальные построения, но мне о них неизвестно), ученое сообщество постепенно, под давлением экспериментальных данных, вынуждено было преодолеть естественные сомнения и сделать следующий логический шаг: признать, что природа устроена куда сложнее, чем считалось до сих пор.

В 1930 г., примерно в то время, когда Дирак пытался смириться с возможностью того, что его античастицы на самом деле не являются протонами, была проведена серия экспериментов, снабдивших ученых именно теми данными, которые были необходимы для разрешения ядерного парадокса. Поэзия этих открытий может сравниться только с драмой, разыгравшейся в частной жизни сделавших их исследователей.

Макс Планк в свое время участвовал в осуществлении квантовой революции: он разрешил парадокс, связанный со спектрами излучения атомных систем. Поэтому вряд ли стоит удивляться тому, что Планк косвенным образом участвовал и в разрешении парадокса, связанного со строением атомного ядра. Хотя сам он в данном случае не проводил решающих исследований, Планк сумел зато распознать таланты молодого студента Вальтера Боте, изучавшего математику, физику, химию и музыку в Берлинском

университете; в 1912 г. Планк принял Боте к себе в качестве докторанта и наставлял затем на протяжении всей его ученой карьеры.

Боте чрезвычайно повезло попасть под руководство Планка и, чуть позже, Ханса Гейгера, создателя знаменитого счетчика заряженных частиц. На мой взгляд, Гейгер — один из самых талантливых физиков-экспериментаторов, обойденных Нобелевской премией. Свою карьеру Гейгер начал с экспериментов (проводившихся совместно с Эрнстом Марсденом), которые Резерфорд использовал при обнаружении атомного ядра. Гейгер тогда только что вернулся из Англии, где работал с Резерфордом, и стал руководить новой лабораторией в Берлине, а одним из первых его шагов в новой должности стал прием на работу Боте в качестве ассистента. Именно в этой лаборатории Боте научился всегда сосредотачиваться на самых важных экспериментах и использовать простые подходы, дающие немедленный результат.

После «вынужденных каникул» протяженностью в пять лет, проведенных во время Первой мировой войны в Сибири в качестве военнопленного, Боте вернулся в лабораторию и наладил замечательное сотрудничество с Гейгером, сменив его в конечном итоге на посту директора лаборатории. В период совместной работы эти ученые первыми стали использовать так называемые «методы совпадений» при исследовании физики атома, а затем и ядра. Используя различные детекторы вокруг мишени и тщательный хронометраж, они научились выделять одновременные события, синхронность которых свидетельствовала о том, что их источником событий было одно и тот же событие атомного или ядерного распада.

В 1930 г. Боте вместе с помощником Гербертом Беккером наблюдал нечто совершенно новое и неожиданное.

Бомбардируя ядра бериллия продуктами ядерного распада, известными как альфа-частицы (тогда уже было известно, что альфа-частицы — это ядра гелия), исследователи наблюдали испускание ядром совершенно новой формы высокоэнергетического излучения. У этого излучения было две уникальные особенности: оно обладало большей проникающей способностью, чем гамма-лучи самых высоких энергий, но, подобно гамма-лучам, состояло из электрически нейтральных частиц и потому, проходя сквозь вещество, не ионизировало его атомы.

Новость об этом удивительном открытии быстро разошлась по всем физическим лабораториям Европы. Первоначально Боте и Беккер предполагали, что обнаруженное ими излучение представляет собой какой-то *новый* вид гамма-лучей. В Париже дочь знаменитой исследовательницы Марии Кюри Ирен Жолио-Кюри и ее муж Фредерик воспроизвели результаты Боте и Беккера и более подробно исследовали загадочное излучение. В частности, они обнаружили, что при бомбардировке этим излучением парафиновой мишени из нее выбиваются протоны невероятно высоких энергий.

Из этого наблюдения стало ясно, что данное излучение не может быть гамма-лучами. Почему?

Ответ на этот вопрос сравнительно прост. Если бросить в подъезжающий грузовик шарик попкорна, вряд ли удастся этим его остановить или хотя бы разбить ему лобовое стекло. Причина в том, что попкорн, даже если бросать его очень и очень энергично, из-за своей малой массы несет совсем небольшой импульс. Чтобы остановить грузовик, вам нужно изменить его импульс на большую величину, потому что машина, даже если движется медленно, весьма массивна. Чтобы остановить грузовик или сбить

с него тяжелый объект, вам придется бросить большой камень.

Аналогично, чтобы выбить из парафина тяжелую частицу, такую как протон, гамма-излучение, состоящее из невесомых фотонов, должно было бы нести огромную энергию (такую, чтобы импульса, переносимого отдельным фотоном, хватало для выбивания из вещества тяжелого протона), а для этого ни в одном известном процессе ядерного распада не нашлось бы достаточного количества энергии, даже по порядку величины.

Удивительно, но супругам Жолио-Кюри (они были современными людьми и оба выбрали для себя одинаковую двойную фамилию), видимо, подобно Дираку, очень не хотелось вводить новые элементарные частицы для объяснения полученных данных. Протоны, электроны и фотоны не только были хорошо знакомы, но их до того момента было вполне достаточно для объяснения всех известных данных, включая экзотические квантовые явления, связанные с атомами. Поэтому Ирен и Фредерик не стали выдвигать очевидное, как сейчас кажется, предположение о том, что в процессах распада, которые наблюдали Боте и Беккер, возникает, возможно, новая электрически нейтральная массивная частица. (Аналогичная нерешительность, увы, помешала Жолио-Кюри объявить об открытии позитрона, несмотря на то что они реально наблюдали его в своих экспериментах прежде, чем Карл Андерсон несколько позже объявил о собственном открытии.)

Дать исследованиям в этом направлении следующий толчок выпало на долю физика Джеймса Чедвика. Чедвик, очевидно, обладал великолепным физическим чутьем, но его политическое чутье оставляло желать лучшего. Окончив в 1913 г. Манчестерский университет со степенью

магистра и работая затем с Резерфордом, он получил стипендию, позволявшую ему учиться где угодно. Чедвик отправился в Берлин работать с Гейгером. Он не мог бы выбрать себе лучшего наставника и вскоре уже проводил важные исследования в области радиоактивного распада. К несчастью, во время пребывания Чедвика в Германии вспыхнула Первая мировая война, и следующие четыре года молодой ученый провел в лагере для интернированных.

В конечном итоге он вернулся в Кембридж, куда к тому времени перебрался и Резерфорд, и завершил работу над докторской диссертацией под его руководством. После этого Чедвик остался в Кембридже, чтобы работать с Резерфордом и помогать ему руководить Кавендишской лабораторией. Чедвик не просто знал о результатах Боте и Беккера, он сам воспроизвел их, но лишь после того, как один из студентов сообщил ему о результатах Жолио-Кюри, Чедвик убедился на основании уже приведенного мной довода об энергии, что излучение, о котором идет речь, попросту должно состоять из неизвестных прежде нейтральных частиц с массой, сравнимой с массой протона, и что эти частицы могут «обитать» в атомном ядре (идея, которую они с Резерфордом вынашивали не один год).

Чедвик воспроизвел и расширил эксперименты Жолио-Кюри; он подвергал бомбардировке не только парафин, но и другие мишени и исследовал вылетающие протоны. Чедвик подтвердил не только тот факт, что с учетом энергетике столкновения источником загадочного излучения просто не могут быть гамма-лучи, но и то, что сила взаимодействия этих новых частиц с ядром намного превышает ту, что можно было бы предсказать для гамма-лучей.

Чедвик не был бездельником. Уже через две недели после начала экспериментов в 1932 г. он прислал в *Nature* письмо под названием «О возможном существовании нейтрона», а вслед за этим направил в Королевское общество более подробную статью. Так был открыт нейтрон, составляющий, как мы сегодня знаем, бóльшую часть массы тяжелых ядер и, таким образом, бóльшую часть массы нашего тела.

За это открытие через три года, в 1935 г., Чедвик был удостоен Нобелевской премии по физике. Есть какая-то поэтическая справедливость в том, что трое ученых, эксперименты которых сделали возможными результат Чедвика, но которые сами упустили шанс распознать нейтрон, также были удостоены Нобелевской премии за другие труды. Боте получил Нобелевскую премию в 1954 г. за работу по использованию совпадений наблюдаемых событий в разных детекторах для исследования детальной природы ядерных и атомных явлений. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри, упустившие аж два других открытия, которые могли бы принести им Нобелевку, получили премию по химии в 1935 г. за открытие искусственной радиоактивности, которая позже стала важной составной частью разработки как ядерной энергетики, так и ядерного оружия. Интересно, что только после получения Нобелевской премии Ирен во Франции смогла стать профессором. С учетом двух Нобелевских премий ее матери Марии семья Кюри добыла целых пять премий — больше, чем удавалось когда-либо получить членам одной семьи.

После этого открытия Чедвик задался целью измерить массу нейтрона. Его первая оценка, полученная в 1933 г., предполагала массу чуть меньшую, чем сумма масс протона и электрона. Это подкрепляло гипотезу о том, что нейтрон, возможно, представляет собой связанное состояние

этих двух частиц, а разница масс, по формуле Эйнштейна $E = mc^2$, соответствует потере энергии при связывании. Однако через год после еще нескольких попыток, предпринятых другими научными группами и давших противоречивые результаты, Чедвик еще раз проанализировал ситуацию с использованием ядерной реакции, инициируемой гамма-лучами, что позволяло измерять все энергии с большой точностью, и получил результат, с определенностью указывавший на то, что нейтрон тяжелее суммы масс протона и электрона, хотя и очень близок к ней; разница масс не превышает 0,1%.

Говорят, что «близок» важно только при бросании подковы* или гранаты, но в данном случае близость масс между протоном и нейтроном значила очень много. Это одна из главных причин нашего сегодняшнего существования.

Анри Беккерель открыл радиоактивность урана в 1896 г., а всего тремя годами позже Эрнест Резерфорд определил, что радиоактивность бывает двух разных типов, которые он назвал альфа- и бета-лучами. Еще через год были открыты гамма-лучи, а в 1903 г. Резерфорд, давая им название, подтвердил, что они представляют собой новую форму излучения. Беккерель в 1900 г. определил, что «лучи» при бета-распаде на самом деле состоят из электронов, которые, как нам сегодня известно, возникают при распаде нейтронов.

При бета-распаде нейтрон расщепляется на протон и электрон, а это, как я объясню чуть позже, было бы невозможно, если бы нейтрон не был чуть тяжелее протона. В нейтронном распаде удивительно не то, что он имеет место, но то, что происходит он так медленно. Обычно распад

* Имеется в виду популярная в Америке игра по набрасыванию подков на стержень, в которой попадание в шести дюймах от цели приносит игроку 1 очко. — *Прим. науч. ред.*

нестабильных элементарных частиц занимает миллионные или миллиардные доли секунды. Изолированные нейтроны живут в среднем более десяти минут.

Одной из основных причин того, что нейтроны живут так долго, является то, что масса нейтрона лишь слегка превышает сумму масс протона и электрона. Остающейся энергии, соответствующей массе покоя, едва хватает на то, чтобы позволить нейтрону распасться на эти частицы без нарушения закона сохранения энергии. (Еще одна причина состоит в том, что нейтрон распадается не просто на протон и электрон. Он распадается на три частицы... оставайтесь с нами!)

Хотя десять минут в атомных масштабах могут показаться вечностью, это все же довольно короткий промежуток времени по сравнению с продолжительностью жизни человека и атомов на Земле. Возвращаясь к загадке, которую я упоминал в начале этой главы, задам вопрос. Как можем мы состоять в основном из нейтронов, если они распадаются еще до первой рекламной паузы в тридцатиминутном телешоу?

Ответ опять же заключается в необычайной близости масс нейтрона и протона. Свободный нейтрон действительно распадается за десять минут или около того. Но рассмотрим нейтрон, связанный внутри атомного ядра. Связанность его означает, что для выбивания нейтрона из ядра необходимо затратить некоторое количество энергии. Но это означает также, что первоначально этот нейтрон, попадая в ядро, теряет энергию. Однако Эйнштейн учит нас, что полная энергия массивной частицы пропорциональна ее массе и определяется уравнением $E = mc^2$. Это означает, что если нейтрон при связывании в ядре теряет энергию, то его масса уменьшается. Но поскольку его масса

в изолированном состоянии лишь чуть-чуть превышает суммарную массу протона и электрона, то после потери части массы он уже не обладает достаточной энергией для распада на протон и электрон. Чтобы превратиться в протон, ему пришлось бы либо высвободить достаточно энергии, чтобы, помимо всего прочего, выбросить этот протон из ядра (на это его, учитывая стандартные энергии ядерных связей, не хватило бы), либо высвободить достаточно энергии, чтобы дать новому протону возможность остаться в новом стабильном ядре. Это ядро стало бы относиться к другому элементу, в ядре которого положительных зарядов на один больше, а увеличение положительного заряда ядра, как правило, тоже требует больше энергии, чем то небольшое количество, которое высвобождается при распаде нейтрона. В результате нейтроны в большинстве атомных ядер, содержащих нейтроны, остаются стабильными.

В общем, стабильность ядер, из которых состоит все, что мы видим вокруг, включая и большую часть атомов нашего тела, является случайным следствием того факта, что нейтрон и протон различаются по массе всего лишь на 0,1%, так что из-за небольшого изменения массы первой из этих частиц при встраивании в ядро она теряет возможность распадаться с образованием второй частицы. Об этом я узнал от Томми Голда.

Когда я задумываюсь об этом, то не устаю поражаться. Существование сложного вещества, периодическая таблица элементов, всё вокруг — от далеких звезд до клавиатуры, на которой я это печатаю, — напрямую зависит от этого замечательного совпадения. Почему? Случайность это или законы физики требуют такого по каким-то неведомым нам пока причинам? Подобные вопросы заставляют нас, физиков, копать глубже в поисках возможных ответов.

Открытие нейтрона и последующее наблюдение его распада добавили к нашему субатомному зоопарку не одну новую частицу. Эти события заставили предположить, что самые, возможно, фундаментальные свойства природы — законы сохранения энергии и импульса — могут нарушаться на микроскопических масштабах атомных ядер.

Почти за двадцать лет до открытия нейтрона Джеймс Чедвик наблюдал некоторые странности в поведении бета-лучей; естественно, тогда ни он, ни кто-либо другой не могли знать, что лучи эти испускаются при распаде нейтронов. Спектр энергии, уносимой электронами, возникающими при нейтронном распаде, непрерывен и простирается практически от нулевой энергии до максимальной, а она зависит от того, сколько энергии остается после распада нейтрона; для свободного нейтрона эта максимальная энергия равна энергетической разнице между массой нейтрона и суммой масс протона и электрона.

Но здесь тоже имеется проблема. Проще всего увидеть эту проблему, если представить на мгновение, что протон и электрон обладают равными массами. Тогда если протон уносит больше энергии после распада нейтрона, чем электрон, то и двигаться он должен быстрее, чем электрон. Однако если при этом они обладают равными массами, импульс протона также будет превышать по величине импульс электрона. Но если нейтрон в момент распада находится в покое, то его импульс до распада равен нулю и тогда импульс улетающего протона должен в точности компенсировать импульс улетающего электрона. Но это невозможно, если только они не имеют равных по величине импульсов и не разлетаются в строго противоположных направлениях. Так что импульс протона ни в коем случае не может превышать по величине импульс электрона. Короче говоря, есть

лишь одно значение для энергии и импульса двух частиц после распада, если эти две частицы обладают равными массами.

Те же рассуждения, хотя и чуть более сложные математически, применимы и в том случае, если протон и электрон различаются по массе. Если при распаде нейтрона образуются только две эти частицы, то их скорости — а значит, величины их энергий и импульсов — связаны между собой и имеют единственные, жестко заданные значения, определяемые отношением их масс.

Что из этого следует? Если электроны, возникающие в результате бета-распада нейтронов, на самом деле вылетают с разными (причем в широком диапазоне) значениями энергии, то, на первый взгляд, это нарушает законы сохранения энергии и импульса. Но, как я уже тонко намекал ранее, это верно лишь в том случае, если электрон и протон — единственные частицы, являющиеся продуктами нейтронного распада.

Опять же в 1930 г., всего за несколько лет до открытия нейтрона, замечательный австрийский физик-теоретик Вольфганг Паули написал письмо коллегам из Швейцарского федерального технологического института, и началось это письмо бессмертным обращением: «Дорогие радиоактивные леди и джентльмены». В письме Паули кратко изложил свое предложение по разрешению этой проблемы, относительного которого, по его собственным словам, «он не чувствовал себя в достаточной безопасности, чтобы опубликовать». Он предположил существование еще одной неизвестной электрически нейтральной элементарной частицы, которую он назвал нейтроном и которая, по его предположению, должна была наряду с электроном и протоном образовываться в результате бета-распада; тогда

энергия, высвобождаемая при распаде, могла бы распределяться между электроном, протоном и этой частицей, что объясняло бы непрерывный спектр.

Паули, удостоенный позже Нобелевской премии за свой «принцип запрета» в квантовой механике, не был глупцом. Более того, он терпеть не мог глупцов. Он был знаменит тем, что бросался к доске во время лекций и вырывал мел из руки лектора, если считал, что тот говорит чепуху. Он умел весьма язвительно критиковать теории, которые ему не нравились, а самую едкую критику приберегал для идей настолько неопределенных, что они, как он говорил, «даже не ошибочны». (Один из моих уважаемых коллег в те времена, когда я преподавал в Йельском университете, известный математический физик Феза Гюрсей, однажды сказал репортеру в ответ на вопрос о том, в чем заключается смысл некоей идеи, которую с явно излишней помпой не так давно объявили ученые, занятые в первую очередь поиском личности: «Смысл в том, что Паули, должно быть, умер».)

Паули понимал, что любое предположение о существовании новой элементарной частицы, которую никто не наблюдал, в высшей степени спекулятивно; в своем послании он писал, что такая частица маловероятна как потому, что ее никто никогда не видел, а значит, она должна слабо взаимодействовать с веществом, так и потому, что она должна быть очень легкой, чтобы рождаться при распаде наряду с электроном, имея в виду, что энергии, доступные при бета-распаде, очень малы по сравнению с массой протона.

Первой проблемой, возникшей у Паули в связи с этой идеей, оказалось выбранное им для частицы название. Когда в 1932 г. Чедвик экспериментально открыл частицу, которую мы сегодня называем нейтроном, — а это подходящее название для нейтрального родича протона,

обладающего сравнимой массой, — для гипотетической частицы Паули потребовалось другое имя. Энрико Ферми, блестящий итальянский физик и коллега Паули, в 1934 г. нашел выход: он предложил изменить название этой частицы на *нейтрино* — итальянское словечко, означающее «маленький нейтрон».

Прошло двадцать шесть лет, прежде чем ученым удалось обнаружить нейтрино Паули; за это время крохотная частица вместе со своим более тяжелым родичем, нейтроном, заставила физиков полностью пересмотреть свои представления о силах, управляющих космосом, о природе света и даже о природе пустого пространства.

ОТСЮДА И ДО БЕСКОНЕЧНОСТИ: ПРОЛИВАЯ СВЕТ НА СОЛНЦЕ

Подвигом добрым я подвизался, течение
совершил, веру сохранил...

Тим 4:7

Физик Энрико Ферми не очень известен широкой публике, но это не мешает ему быть одним из величайших физиков XX века. Вместе с Ричардом Фейнманом он сильнее, чем кто-либо из остальных выдающихся фигур той замечательной эпохи в развитии физики, повлиял на лично мое отношение и подходы к этой науке, а также на мое понимание физики. Хотелось бы мне быть таким же талантливым, как эти двое.

Ферми родился в 1901 г. и умер в возрасте пятидесяти трех лет от рака, который, возможно, развился у него в результате работы по исследованию радиоактивности. На момент смерти в 1954 г. он был на девять лет моложе меня сегодняшнего. Но за свою короткую жизнь он сумел продвинуть передний край физики, как экспериментальной,

так и теоретической, настолько, насколько никому с тех пор не удавалось и вряд ли кому удастся. Сложность всей совокупности теоретических инструментов, используемых в настоящее время для создания физических моделей, и сложность систем, применяемых для их проверки, даже по отдельности слишком высока, чтобы один человек, каким бы талантливым он ни был, мог оставаться в авангарде обоих направлений на том уровне, которого достиг в свое время Ферми.

В 1918 г., когда Ферми окончил школу в Риме, перед блестящим молодым научным дарованием открывались куда более широкие перспективы. Квантовая механика только что зародилась, новые идеи буквально витали в воздухе, а строгие математические методы, необходимые для работы с этими новыми идеями, еще не были созданы и, соответственно, не применялись. Экспериментальной физике еще только предстояло вступить в эпоху «большой науки»; эксперименты были еще достаточно просты, чтобы их могли проводить отдельные исследователи в импровизированных лабораториях, и времени они требовали куда меньше — недели, а не месяцы.

Ферми подал документы в престижную Высшую нормальную школу в Пизе, где частью вступительных испытаний было написание эссе. Темой работы в том году были «специфические характеристики звуков». Ферми представил «эссе», содержащее в себе решение уравнений в частных производных для колеблющегося стержня и применение метода, известного как Фурье-анализ. Даже сегодня эти математические методы, как правило, не включаются в программу обучения до, скажем, третьего курса бакалавриата, а для некоторых студентов и до четвертого. Понятно, что семнадцатилетний Ферми произвел на экзаменаторов

достаточно сильное впечатление и занял первую строчку в рейтинге результатов экзамена.

В университете Ферми сначала специализировался на математике, но быстро переключился на физику и практически самостоятельно освоил общую теорию относительности — Эйнштейн разработал ее всего за несколько лет до того, — а также квантовую механику и атомную физику, которые были тогда еще только формирующейся областью исследований. Менее чем через три года после поступления в университет он опубликовал в крупных физических журналах несколько теоретических статей на разные темы, от общей теории относительности до электромагнетизма. В двадцать один год, через четыре года после начала университетских занятий, он получил докторскую степень за диссертацию, посвященную исследованию применения теории вероятностей к дифракции рентгеновских лучей. В то время в Италии на степень доктора наук по физике не принимались диссертации на чисто теоретические темы, поэтому Ферми волей-неволей пришлось доказывать свою компетентность не только в работе с бумагой и ручкой, но и в лаборатории.

Ферми отправился в Германию — центр разворачивающихся исследований в области квантовой механики, а затем в голландский Лейден, где встретился с известнейшими физиками тех дней — достаточно назвать хотя бы Борна, Гейзенберга, Паули, Лоренца и Эйнштейна; через некоторое время он вернулся в Италию и занялся преподаванием. В 1925 г. Вольфганг Паули сформулировал «принцип запрета», объявив, что два электрона не могут занимать в точности одинаковое квантовое состояние одновременно и в одном и том же месте; этот принцип лежит в фундаменте всей современной атомной физики. Меньше чем через год

Ферми применил эту идею к системам многих других одно-типных частиц, которые, подобно электронам, могут иметь два возможных значения спина (момента импульса), который, как мы знаем, может быть направлен либо вверх, либо вниз. Так Ферми придал современный вид области исследований, известной как статистическая механика, лежащей в основе почти всего материаловедения, полупроводниковой техники и тех областей физики, на базе которых создаются современные электронные компоненты и компьютеры.

Как я подчеркивал ранее, невозможно интуитивно представить себе, как точечная частица может вращаться вокруг какой бы то ни было оси. Это просто один из способов, при помощи которых квантовая механика обходит наши обыденные представления и избегает конфликтов со здравым смыслом. Электроны называют частицами с полуцелым спином, поскольку величина их момента импульса — спина — оказывается вдвое меньше минимальной величины момента импульса, связанного с орбитальным движением электронов в атомах. Любая частица с полуцелым, как у электрона, спином в честь Энрико Ферми называется фермионом.

В возрасте всего двадцати шести лет Ферми был избран на вновь образованную кафедру теоретической физики в Римском университете; там он руководил группой талантливых студентов, в которую входили несколько будущих нобелевских лауреатов, и вместе с ними занимался атомной, а затем и ядерной физикой.

В 1933 г. Ферми заинтересовался еще одной гипотезой Паули — гипотезой о неизвестной частице, возникающей при распаде нейтронов; Ферми назвал эту гипотетическую частицу нейтрино. Но мало было дать новой частице

название. Цель Ферми была гораздо амбициознее: он выдвинул теорию нейтронного распада, из которой вытекала возможность существования в природе еще одного, неизвестного пока, фундаментального взаимодействия — первого нового взаимодействия, ставшего известным науке после электромагнетизма и гравитации; к его открытию нас, можно сказать, тоже подтолкнули размышления о природе света. Хотя в тот момент это не было очевидно, предложенное Ферми взаимодействие было одним из двух новых типов взаимодействия, связанных с атомным ядром; вместе с электромагнетизмом и гравитацией эти силы, насколько нам известно, составляют полный список фундаментальных сил, управляющих в природе всем — от мельчайших субатомных масштабов до движения галактик.

Когда Ферми направил свою гипотезу в журнал *Nature*, редактор отверг статью, поскольку она была «слишком далека от физической реальности, чтобы представлять интерес для читателей». Многим из нас, чьи статьи получали в этом журнале отказ от столь же высокомерных редакторов, приятно сознавать, что статья Ферми, излагавшая одну из важнейших гипотез в физике XX столетия, тоже не прошла отбор.

Этот несправедливый отказ, несомненно, обидел Ферми, но при этом, как ни странно, произвел и полезное побочное действие. Ферми решил вместо этого вернуться к экспериментальной физике и вскоре начал экспериментировать с нейтронами, которые за два года до этого открыл Чедвик. Всего за несколько месяцев он создал мощный радиоактивный источник нейтронов и обнаружил, что даже стабильные в обычных условиях атомы можно заставить распадаться, если бомбардировать их нейтронами. Бомбардируя нейтронами уран и торий, Ферми также наблюдал

ядерный распад и считал, что получает при этом новые элементы. На самом деле ему удалось заставить ядра атомов расщепляться, или делиться, с образованием более легких ядер, и при этом, как было обнаружено позже, испускается больше нейтронов, чем поглощается в процессе деления, — это обнаружили другие ученые в 1939 г.

Переход к эксперименту оказался полезен Ферми. Четыре года спустя, в 1938 г., в возрасте тридцати семи лет он был удостоен Нобелевской премии за открытие искусственной радиоактивности и создание новых радиоактивных элементов при помощи нейтронной бомбардировки. Однако к 1938 г. нацисты уже начали устанавливать в Германии свои расовые законы, их примеру последовала и Италия; жена Ферми Лаура — еврейка по национальности — оказалась в опасности. Поэтому после получения премии в Стокгольме Ферми с семьей не стал возвращаться в Италию, а уехал в Нью-Йорк, где занял пост в Колумбийском университете.

Узнав в 1939 г. в Нью-Йорке новость о ядерном распаде, а затем прослушав лекцию Нильса Бора в Принстоне, Ферми откорректировал уже прочитанную им нобелевскую лекцию, исправив допущенную ранее ошибку, и без промедления повторил немецкие результаты. Очень скоро и он, и его коллеги поняли, что новые данные говорят о возможности цепной реакции. Нейтроны могут бомбардировать уран, заставляя его распадаться с выделением энергии; при этом испускается еще больше нейтронов, которые, в свою очередь, могут бомбардировать больше атомов урана, и т. д.

Вскоре после этого Ферми прочел лекцию для представителей Военно-морских сил США, в которой предупредил о потенциальном значении этих данных, но мало кто в тот момент воспринял его предупреждение серьезно. Позже,

в том же году, на стол президенту Рузвельту легло знаменитое письмо Эйнштейна, которое изменило ход истории.

Ферми давно задумывался о потенциальных опасностях, связанных с высвобождением энергии атомного ядра. Через год после получения докторской степени, в 1923 г., он написал послесловие к одной книге по теории относительности, где упомянул о потенциале соотношения $E = mc^2$; еще тогда он писал: «Не представляется возможным, по крайней мере в ближайшем будущем, найти способ высвобождения этого чудовищного количества энергии — и это к лучшему, поскольку первым делом взрыв такого чудовищного количества энергии разнес бы в клочья того физика, который имел бы несчастье найти такой способ».

Должно быть, эта мысль владела им в 1941 г., когда, участвуя в недавно начатом Манхэттенском проекте, Ферми получил задание реализовать контролируруемую цепную реакцию, то есть создать ядерный реактор. Если руководители проекта оправданно опасались делать это в городской черте, то Ферми был достаточно уверен в безопасности проекта, чтобы убедить руководство разрешить строительство реактора при Чикагском университете. 2 декабря 1942 г. реактор достиг критичности*, но Чикаго при этом уцелел.

Через два с половиной года Ферми был в штате Нью-Мексико и наблюдал первый ядерный взрыв — операцию под кодовым названием «Тринити». Что характерно для Ферми, пока остальные просто стояли, с восторгом и ужасом наблюдая за происходящим, он провел импровизированный эксперимент по оценке мощности взрыва; при подходе

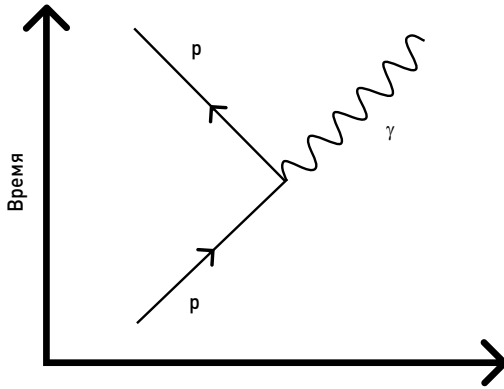
* Критичность реактора — нормальное рабочее состояние, при котором концентрация нейтронов в нем остается постоянной во времени. — *Прим. науч. ред.*

ударной волны он бросил в воздух несколько полосок бумаги, чтобы посмотреть, как далеко их унесет.

Стремление Ферми при любой возможности ставить физические эксперименты — одна из причин, по которым я чту его память. Он всегда находил простой, легко реализуемый способ найти верный ответ. Хотя Ферми прекрасно владел математическими методами, он не любил сложностей и понимал, что если приближенный, «достаточно хороший» ответ можно получить за короткое время, то на получение точного ответа могут уйти месяцы и даже годы. Он оттачивал свои способности и помогал в этом студентам, придумывая то, что мы сегодня называем «задачами Ферми»; говорят, он задавал их своим сотрудникам каждый день во время ланча. Моя любимая задача, которую я всегда задаю своим новым студентам-физикам, звучит так: «Сколько в Чикаго настройщиков роялей?» Попробуйте решить ее. Если вы получите ответ в диапазоне от ста до пятисот, вы неплохо справились.

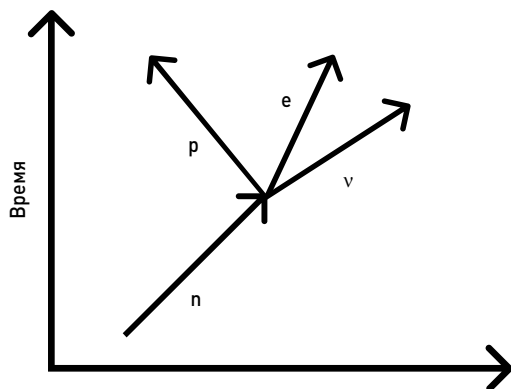
Ферми получил Нобелевскую премию за экспериментальную работу, но его теоретическое наследие может быть куда более ценным. По обыкновению, «теория», предложенная им в знаменитой отвергнутой статье о распаде нейтрона, была замечательно простой, но при этом выполняла поставленную задачу. Конечно, это во все не было полноценной теорией, но в то время даже пытаться разрабатывать такую теорию было бы преждевременно. Вместо этого он сделал простейшее возможное допущение — представил себе некий новый тип взаимодействия между частицами, действующий в одной точке. Частиц предполагалось четыре — нейтрон, протон, электрон и та новая частица, которую Паули и Ферми назвали нейтрино.

Рассуждения Ферми, как и почти вся современная физика, начинается с упоминания света; в данном случае речь шла о современной квантовой теории взаимодействия света с веществом. Вспомните, что Фейнман, доказывая существование антивещества, придумал графический метод анализа фундаментальных процессов в пространстве и времени. Здесь воспроизведена пространственно-временная картина электрона, испускающего фотон, но с заменой электрона на протон p .



Ферми представил распад нейтрона аналогичным образом, но вместо нейтрона, испускающего фотон и остающегося при этом собой, то есть всё тем же нейтроном, нейтрон n у него испускал пару частиц — электрон e и нейтрино $\bar{\nu}$ — и превращался в протон p .

В электромагнетизме сила взаимодействия между заряженными частицами и фотонами (определяющая вероятность излучения фотона в точке, показанной на первом рисунке) пропорциональна заряду частицы. Поскольку именно заряд позволяет частицам взаимодействовать с электромагнитным полем, мы называем величину фундаментального



кванта заряда — заряд единичного электрона или протона — постоянной взаимодействия электромагнетизма.

Во взаимодействии, которое рассматривал Ферми, вероятность превращения нейтрона в протон определяется численной величиной, которая проявляется в момент взаимодействия, изображенный на рисунке, когда и происходит превращение. Значение этой величины определяется экспериментально, и сегодня мы называем ее постоянной Ферми. По отношению к электромагнетизму численное значение этой величины мало, потому что нейтрон не спешит распадаться, сравнительно, например, со скоростью электромагнитных переходов в атоме. В результате взаимодействия Ферми, описывающее новую фундаментальную силу, стало известно как слабое взаимодействие.

Один из моментов, делавших гипотезу Ферми столь замечательной, состоял в том, что впервые в физике кто-то предположил, что в квантовом мире могут спонтанно возникать не только фотоны, но и какие-то другие частицы. (В данном случае в момент превращения нейтрона в протон возникают электрон и нейтрино.) Это послужило катализатором и прототипом для дальнейших исследований

квантового характера фундаментальных взаимодействий в природе.

Более того, этот подход не только объяснял уже имеющиеся наблюдения. Он позволял делать предсказания благодаря тому, что единственная математическая форма, отражавшая взаимодействие, вызывающее распад нейтрона, предсказывала также массу других явлений, которые позже удалось наблюдать экспериментально.

Что еще важнее, это взаимодействие, причем в точности той же силы, управляет аналогичными распадами других частиц в природе. Так, в 1936 г. первооткрыватель позитрона Карл Андерсон обнаружил в космических лучах еще одну новую частицу — первую из тех, многочисленность которых позже заставит специалистов по физике элементарных частиц гадать, кончатся ли они когда-нибудь. Говорят, что при известии об этом открытии физик-атомщик, позже лауреат Нобелевской премии, Исидор Айзек Раби воскликнул: «А это кто заказывал?»

Сегодня мы знаем, что эта частица, называемая мюоном и обозначаемая греческой буквой μ , представляет собой, по существу, точную копию электрона, только тяжелее примерно в двести раз. Большая масса позволяет ей распадаться с образованием электрона и нейтрино в ходе взаимодействия, которое выглядит в точности так же, как распад нейтрона, за исключением того, что мюон при этом превращается не в протон, а в нейтрино другого типа (называемое мюонным). Замечательно, что, если при расчете силы этого взаимодействия воспользоваться уже известной нам постоянной Ферми, мы получим в точности верное время жизни для мюона.

Очевидно, здесь работает новое фундаментальное взаимодействие, универсальное по своей природе, в чем-то схожее

с электромагнетизмом и в чем-то важном от него отличающемся. Во-первых, это взаимодействие намного слабее. Во-вторых, в отличие от электромагнетизма, это взаимодействие, судя по всему, работает только на малых расстояниях — в модели Ферми вообще фигурировала точка. Не бывает так, чтобы нейтроны превращались в протоны в одном месте и при этом вызывали превращение электронов в нейтрино в другом, тогда как взаимодействие между электронами и фотонами позволяет электронам обмениваться виртуальными фотонами и отталкиваться друг от друга даже на больших расстояниях. В-третьих, это взаимодействие превращает частицу одного типа в частицу другого. В электромагнетизме возможно создание и поглощение фотонов — квантов света, но заряженные частицы, которые с ними взаимодействуют, остаются сами собой как до, так и после взаимодействия. Тяготение тоже действует на больших расстояниях, и, когда мяч падает на землю, он остается мячом. А вот слабое взаимодействие заставляет нейтроны распадаться и превращаться в протоны, мюоны — в нейтрино и т. д.

Ясно, что слабое взаимодействие отличается от взаимодействий других типов, но вы можете спросить, стоит ли об этом беспокоиться. Распад нейтрона, конечно, интересен, но, к счастью, нас от него защищают свойства атомных ядер, и потому существуют стабильные атомы. Создается впечатление, что слабое взаимодействие практически никак не сказывается на нашей повседневной жизни. В отличие от гравитации и электромагнетизма, непосредственно мы его не ощущаем. Если бы слабое взаимодействие не имело других проявлений, его аномальную природу можно было бы легко упустить из виду.

Однако слабому взаимодействию мы обязаны своим существованием несколько не меньше, чем гравитации

и электромагнетизму. В 1939 г. Ханс Бете, которому вскоре суждено было возглавить усилия по разработке атомной бомбы, понял, что те же взаимодействия, которые разрушают тяжелые атомные ядра, извлекая из них взрывную энергию для бомбы, могли бы, при других обстоятельствах, быть использованы для создания крупных ядер из более мелких. При этом могло бы высвободиться еще больше энергии, чем высвобождается при взрыве атомной бомбы.

До того момента источник энергии Солнца оставался загадкой. Было установлено, что температура солнечного ядра не может превышать нескольких десятков миллионов градусов. Может показаться, что это очень много, но энергии, с которыми сталкиваются ядра при такой температуре, к тому моменту были уже достигнуты в лаборатории. Более того, было понятно, что Солнце не может светить за счет простого горения, как свеча.

Еще в XVIII веке было установлено, что объект с массой Солнца мог бы светить с наблюдаемой яркостью порядка десяти тысяч лет, если бы представлял собой что-то вроде горящего куска угля. Хотя это прекрасно соответствовало возрасту Вселенной, который епископ Ашер установил по библейскому рассказу о сотворении мира, к середине XIX века геологи и биологи установили, что на самом деле Земля много старше. Но никакого другого источника энергии вокруг не просматривалось, так что возраст и яркость Солнца долгое время оставались без объяснения*.

И тут на сцене появляется Ханс Бете — еще один представитель когорты невероятно талантливых и плодovitых

* Уильям Томсон (лорд Кельвин) предложил в качестве возможного источника энергии Солнца его постепенное гравитационное сжатие. Этого могло бы хватить на десятки миллионов лет, но не на миллиарды, как требовалось по геологическим данным. — *Прим. науч. ред.*

физиков-теоретиков, вышедших из Германии в первой половине XX века. Бете тоже был одним из докторантов Арнольда Зоммерфельда и тоже получил в итоге Нобелевскую премию. Бете начал свою карьеру в химии, поскольку вводный курс физики в его университете был достаточно слаб — это обычная проблема. (Я тоже на первом курсе забросил физику, и по той же причине, но, к счастью, физический факультет моего университета позволил мне на следующий год посещать более продвинутый курс.) Бете переключился на физику, прежде чем перейти к последипломным исследованиям, и эмигрировал в Соединенные Штаты, чтобы избежать преследования нацистов.

Будучи блестящим физиком, Бете мог с мелом у доски выполнить детальные расчеты по широкому кругу задач; он начинал в верхнем левом углу и исписывал всю доску до правого нижнего ее угла, почти ничего не стирая. Бете оказал сильное влияние на Ричарда Фейнмана, которого всегда поражал неторопливый методичный подход Бете к задачам. Сам Фейнман часто перескакивал от начала задачи сразу к результату, а промежуточные этапы прорабатывал позже. Прочная техническая подкованность Бете прекрасно сочеталась с блестящими озарениями Фейнмана, когда оба они работали в Лос-Аламосе над атомной бомбой. Они часто ходили по коридору, и Фейнман громко возражал терпеливому, но настойчивому Бете; коллеги окрестили эту пару «линкор и торпедный катер».

Когда я был начинающим физиком, Бете считался живой легендой, потому что даже в девяносто с лишним лет он умудрялся писать важные физические статьи. Кроме того, он всегда был рад поговорить с кем-нибудь о физике. Приехав с лекцией в Корнеллский университет, где Бете проработал большую часть жизни, я был невероятно польщен,

когда он зашел ко мне в кабинет, чтобы задать вопросы и внимательно меня выслушать, как будто мне на самом деле было что ему сообщить.

Кроме того, Бете обладал прекрасной физической формой. Друг-физик рассказывал мне о временах, когда ему тоже доводилось посещать Корнеллский университет. Однажды в выходной он амбициозно решил взобраться на холм по одной из многочисленных крутых пешеходных троп неподалеку от кампуса. Он гордился собой, когда, отдуваясь и тяжело дыша, добрался почти до вершины холма, — гордился ровно до тех пор, пока не заметил Бете, которому тогда было далеко за восемьдесят, легко спускавшегося по той же тропе с вершины.

Хотя Бете мне всегда нравился и я всегда очень его уважал, во время работы над материалами для этой книги я обнаружил два дополнительных момента, связывающих нас с ним лично, и мне приятно написать о них. Во-первых, я выяснил, что являюсь в каком-то смысле его интеллектуальным внуком, поскольку руководитель моей курсовой работы по физике М. К. Сундаресан был в свое время одним из его докторантов. Во-вторых, я узнал, что Бете, который терпеть не мог пафосных заявлений о фундаментальных результатах, когда они не основывались ни на глубоких рассуждениях, ни на наблюдательных данных, написал однажды, вскоре после получения докторской степени, шуточную статью, в которой высмеивалась показавшаяся ему нелепой статья знаменитого физика сэра Артура Стэнли Эддингтона. Эддингтон объявлял о том, что «вывел» фундаментальную постоянную электромагнетизма, опираясь на некоторые основные принципы, но Бете совершенно справедливо не увидел в его заявлении ничего, кроме неуместной нумерологии. Узнав это, я стал спокойнее относиться

к собственной шуточной статье, которую написал, будучи доцентом в Йельском университете, в ответ на негодную, как мне показалось, статью, опубликованную в одном из лучших физических журналов; в статье говорилось об обнаружении нового фундаментального взаимодействия в природе, и позже в самом деле выяснилась ее ошибочность. В те времена, когда свою статью писал Бете, физический мир воспринимал себя чуть более серьезно, и Бете с коллегами пришлось выступить с извинениями. К моменту, когда аналогичную статью написал я, единственной отрицательной реакцией стал выговор от декана факультета, который опасался, как бы *Physical Review* в самом деле не опубликовал мою статью.

В тридцать с небольшим Бете уже имел репутацию высокопрофессионального физика, и его имя связывалось с большим количеством результатов, начиная от формулы Бете, описывающей прохождение заряженной частицы через вещество, и заканчивая подстановкой Бете — методом получения точных решений некоторых квантовых случаев задачи многих тел. Серия обзоров, в создании которых он участвовал в 1936 г., посвященных состоянию зарождавшейся тогда области ядерной физики, некоторое время оставалась главным источником информации по данному вопросу и получила известность как Библия Бете. (В отличие от традиционной Библии, эта делала проверяемые прогнозы и со временем, по мере развития науки, была заменена другими источниками.)

В 1938 г. Бете убедили посетить конференцию по «источникам звездной энергии», хотя в то время астрофизика не относилась к его основным интересам. К концу встречи он разработал схему ядерных процессов, в ходе которых четыре отдельных протона (ядра атомов водорода)

в конечном итоге «сливались» — под действием слабого взаимодействия Ферми — и образовывали ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. При таком синтезе высвобождается примерно в миллион раз больше энергии на один атом, чем при сгорании угля. Это позволяет Солнцу светить в миллион раз дольше, чем по прежним оценкам, или примерно 10 миллиардов лет вместо десяти тысяч. Позже Бете показал, что на Солнце протекают и другие ядерные реакции, в частности так называемый CNO-цикл, в котором углерод, азот и кислород выступают в качестве катализаторов превращения водорода в гелий.

Секрет Солнца — а в конечном итоге и секрет рождения света в Солнечной системе — был раскрыт. Бете получил Нобелевскую премию в 1967 г., и почти сорок лет спустя эксперименты с солнечными нейтрино подтвердили его предсказания. Нейтрино были ключевым наблюдаемым феноменом, позволявшим получить такое подтверждение. Дело в том, что вся цепочка начинается с реакции, в которой два протона сталкиваются и под влиянием слабого взаимодействия один из них превращается в нейтрон, что позволяет этим двум частицам слиться в ядро тяжелого водорода, известного как дейтерий, испустив при этом нейтрино и позитрон. Позитрон поглощается в недрах Солнца, а вот нейтрино, способное участвовать только в слабом взаимодействии, вылетает из Солнца и летит к Земле и дальше.

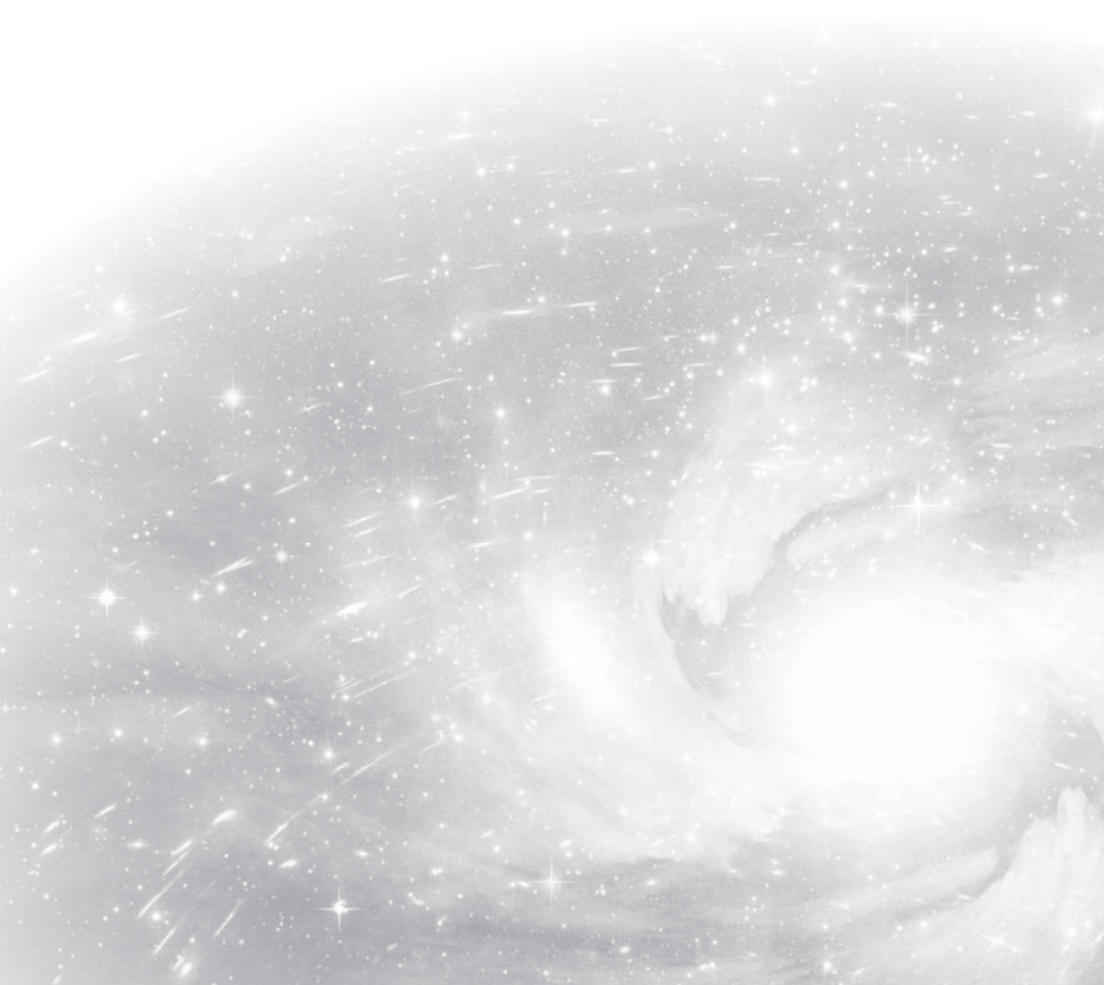
Каждую секунду в любой день более 400 триллионов подобных нейтрино проходят сквозь ваше тело. Их способность к взаимодействию настолько слаба, что нейтрино могло бы пройти в среднем сквозь десять тысяч световых лет сплошного свинца, прежде чем провзаимодействовать с чем-нибудь. Поэтому большинство нейтрино пролетают прямо сквозь вас и сквозь Землю, никак себя не проявляя,

и никто этого не замечает. Но если бы не слабое взаимодействие, нейтрино бы не образовались, Солнце не светило бы — и нас бы здесь не было, так что это никого бы не волновало.

Таким образом, именно слабому взаимодействию, несмотря на его чрезвычайную слабость, мы в значительной степени обязаны своим существованием. И это одна из причин, по которым, когда придуманное Ферми взаимодействие и предсказанное им нейтрино оказались плохо соответствующими здравому смыслу, физики вынуждены были озаботиться и принять их во внимание. А в результате им пришлось очень серьезно изменить представления об окружающей реальности.

Часть вторая

ИСХОД



ОТЧАЯННЫЕ ВРЕМЕНА И ОТЧАЯННЫЕ МЕРЫ

Всему свое время, и время всякой вещи под
небом.

Екклесиаст 3:1

Стремительная смена событий в 1930-х гг., от открытия нейтрона до исследования природы нейтронного распада, вкуче с открытием нейтрино и последовавшим за ним открытием в природе нового универсального слабого взаимодействия, действующего на малых расстояниях, скорее запутала, чем вдохновила физиков. Блестящий марш, приведший в свое время к объединению электричества и магнетизма, а также к объединению квантовой механики и теории относительности, опирался в первую очередь на исследование природы света. Однако оставалось неясным, как элегантное теоретическое сооружение квантовой электродинамики могло бы направить исследования нового взаимодействия. Слабое взаимодействие по природе своей очень далеко от непосредственного человеческого опыта и при этом имеет дело с новыми и весьма экзотическими элементарными частицами и ядерными превращениями,

которые чем-то напоминают алхимические трансмутации, но, в отличие от них, проверяемы и воспроизводимы.

Фундаментальная проблема была связана в первую очередь с природой самого атомного ядра и вопросом о том, что удерживает вместе его частицы. Открытие нейтрона помогло разрешить парадокс, который ранее, казалось, требовал присутствия в ядре электронов для компенсации заряда дополнительных протонов, необходимых для получения верной атомной массы, однако наблюдение бета-распада, в результате которого из ядра вылетали электроны, не помогло делу.

Понимание того, что в процессе бета-распада нейтроны в ядре превращаются в протоны, кое-что прояснило, но затем естественным образом возник следующий вопрос: может ли это превращение как-то объяснить сильную связь, удерживающую протоны и нейтроны вместе внутри ядра?

Несмотря на очевидные различия между слабым взаимодействием и квантовой теорией электромагнетизма (КЭД), на размышления физиков о слабом взаимодействии влиял и замечательный успех КЭД в описании поведения атомов и взаимодействия электронов со светом. Математические симметрии, связанные с КЭД, прекрасно работали, обеспечивая исчезновение бесконечностей в расчетах для предсказания физических величин, связанных с обменом виртуальными частицами. Что, если нечто подобное могло бы нам разобраться в силах, связывающих протоны и нейтроны в ядре?

А именно: если электромагнитная сила является результатом обмена частицами, то разумно предположить, что сила, связывающая составляющие ядра воедино, также может быть результатом обмена частицами. Вернер Гейзенберг предложил эту идею в 1932 г., примерно в то же время,

когда был открыт нейтрон. Если протоны и нейтроны способны превращаться друг в друга, причем протон поглощает электрон, чтобы стать нейтроном, то, возможно, этот самый обмен электронами между ними может каким-то образом порождать связующую силу?

Однако эту красивую картину портило множество хорошо известных проблем. Первой из них была проблема спина. Если предполагать, как это сделал Гейзенберг, что нейтрон, по существу, состоит из протона и электрона, связанных воедино, и поскольку обе эти частицы обладают полуцелым спином, то их соединение в виде нейтрона никак не может тоже иметь полуцелый спин, поскольку $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ не может равняться $\frac{1}{2}$. Гейзенберг возражал, в отчаянии — ведь то были отчаянные времена, когда, казалось, рушились все традиционные правила, — что тот «электрон», который передается между нейтронами и протонами и связывает их вместе в ядре, отличается некоторым образом от свободного электрона и вообще не имеет спина.

Задним числом можно заметить, что в этой картине есть своя проблема. Гейзенберг склонен был считать именно электроны средством связи протонов и нейтронов, потому что размышлял он не о чем-нибудь, а о молекулах водорода. В водороде H_2 два протона связываются воедино благодаря тому, что обращающиеся вокруг них электроны являются общими для обеих частиц. Но если попытаться объяснить аналогичным образом связывание частиц не в молекуле, а в ядре, возникает проблема масштаба. Как могут нейтроны и протоны обмениваться электронами и быть связаны между собой настолько тесно, что среднее расстояние между ними оказывается в сто с лишним тысяч раз меньше молекулы водорода?

Вот еще один способ размышлять об этой проблеме, который пригодится нам позже. Вспомните, что электромагнетизм — это сила, действующая на больших расстояниях. Два электрона в противоположных концах Галактики испытывают взаимное отталкивание, хотя и чрезвычайно слабое, благодаря обмену виртуальными фотонами. В квантовой теории электромагнетизма это возможно. Фотоны не имеют массы, и виртуальные фотоны могут улетать сколь угодно далеко и нести на себе сколь угодно малые количества энергии, прежде чем будут поглощены вновь — без нарушения принципа неопределенности Гейзенберга. Если бы фотоны обладали массой, это было бы невозможно.

Итак, если некое взаимодействие между протонами и нейтронами в ядре возникает благодаря поглощению и испусканию, скажем, виртуальных электронов, то это взаимодействие будет работать только на коротких расстояниях, поскольку электроны обладают массой. Насколько коротких? Оказывается, примерно в сто раз превосходящих размер типичного ядра. Так что обмен электронами не годится для обеспечения взаимодействий ядерного масштаба. Как я уже сказал, это были отчаянные времена.

Отчаянная идея Гейзенберга о странной бесспиновой версии электрона не пропала втуне: она вдохновила молодого японского физика, скромного двадцативосьмилетнего Хидэки Юкаву. В 1935 г., когда Япония только начинала выходить из многовековой изоляции, но как раз перед тем, как ее имперские планы разожгли на Тихом океане пожар войны, Юкава опубликовал первую оригинальную работу по физике, написанную ученым, получившим все образование в Японии. По крайней мере два года никто не обращал на эту работу внимания, но четырнадцать лет спустя Юкава

был удостоен за нее Нобелевской премии; к тому моменту статья *была* замечена, но по неверным причинам.

Визит Эйнштейна в Японию в 1922 г. окончательно закрепил растущий интерес Юкавы к физике. Когда старшекласснику Юкаве потребовались материалы для подготовки к экзамену по второму иностранному языку, под руку ему попала книга Макса Планка «Введение в теоретическую физику» на немецком. Читая ее, он получал огромное удовольствие и от языка, и от физики, а помогал ему в этом одноклассник Синъитиро Томонага — талантливый физик, с которым Юкава вместе учился и в школе и позже в Киотском университете. Томонага был настолько талантлив, что позже, в 1965 г., получил Нобелевскую премию вместе с Ричардом Фейнманом и Джулианом Швингером за демонстрацию математической непротиворечивости квантовой электродинамики.

Удивительно, что Юкава, учившийся в Японии в те времена, когда многие из его наставников еще не понимали до конца недавно появившуюся новую область физики — квантовую механику, натолкнулся на возможное решение задачи ядерного взаимодействия, которого не заметили ни Гейзенберг, ни Паули, ни даже Ферми. Подозреваю, что отчасти это можно объяснить феноменом, который неоднократно наблюдался в физике XX века, а может быть, встречался и раньше и будет встречаться еще. Когда парадоксы и сложности, связанные с неким физическим процессом, начинают казаться огромными и непреодолимыми, возникает соблазн решить, что дело не обойдется без новой революции, подобной теории относительности или квантовой механике, и это потребует таких масштабных сдвигов в мышлении, что кажется бессмысленным продолжать попытки найти решение при помощи существующих технологий.

Ферми, в отличие от Гейзенберга и Паули, не занимался поисками каких-то революционных новшеств. Он готов был предложить, по его словам, «предварительную теорию» нейтронного распада, которая позволяла избавиться от электронов в ядре, разрешив им спонтанно возникать в процессе бета-распада. Он предложил работающую модель, понимая при этом, что это всего лишь модель, а не полноценная теория, — но она позволяла проводить расчеты и делать предсказания. Можно сказать, что в этом суть практического стиля Ферми.

Юкава следил за развитием событий, он перевел работу Гейзенберга об атомных ядрах вместе с предисловием и опубликовал ее в Японии, так что проблемы, связанные с предложением Гейзенберга, были ему ясны. Затем, в 1934 г., Юкава познакомился с теорией нейтронного распада Ферми, и та заронила в его сознание новую идею. Может быть, ядерное взаимодействие, связывающее протоны и нейтроны в ядре, обусловлено не просто обменом виртуальными электронами между ними, но обменом сразу парой электрон — нейтрино, возникающей при превращении нейтронов в протоны?

Однако сразу же возникла еще одна проблема. Распад нейтрона — результат того, что позже стало известно как слабое взаимодействие, и сила, отвечающая за него, слаба. При подстановке величин для возможной силы, которая могла бы возникнуть между протонами и нейтронами при обмене парой электрон — нейтрино, становилось ясно, что эта сила получилась бы слишком слабой, чтобы их связывать.

Тогда Юкава позволил себе то, что не позволял никто из остальных. Он задал себе вопрос: почему ядерная сила, если она, подобно тому как это имеет место в КЭД,

возникает в результате обмена виртуальными частицами, должна основываться непременно на обмене одной или несколькими частицами, существование которых физикам известно или по крайней мере предполагается? Помня, как не любили тогда физики — взять хотя бы Дирака или Паули — предлагать новые частицы, даже если для того были все основания, вы сможете, наверное, оценить, насколько радикальной была идея Юкавы. Позже Юкава описывал это так:

В тот период атомное ядро представляло собой воплощенное противоречие и совершенно не поддавалось объяснениям. А почему? Потому, что наша концепция элементарной частицы была слишком узкой. В японском языке такого слова вообще не было, и мы пользовались английским словом, а означало оно протон и электрон. Казалось, откуда-то было принято Божественное послание, запрещающее нам думать о каких бы то ни было других частицах. Думать о чем-то вне этих рамок (за исключением фотона) значило проявлять наглость и отсутствие страха Божия. А дело было в том, что концепция вечности материи была традиционной и брала начало со времен Демокрита и Эпикура. Размышления о возникновении частиц, если это не фотоны, казались подозрительными, и в отношении таких мыслей существовал сильный, почти под-сознательный, запрет.

Один из хороших моих приятелей-физиков говорит, что единственными периодами, когда ему удавалось провести сложные вычисления, были периоды после рождения

каждого из его детей, когда спать он так и так был не в состоянии, так что проще было встать и поработать. Так в октябре 1934 г., будучи не в состоянии заснуть вскоре после рождения второго ребенка, Юкава вдруг понял, что если расстояние, на котором работает сильное ядерное взаимодействие, должно быть ограничено размером ядра, то любая частица, участвующая при этом в обмене, должна быть намного тяжелее электрона. На следующее утро он оценил массу такой частицы примерно в двести масс электрона. При этом частица, если ею должны обмениваться нейтроны с протонами, непременно должна обладать электрическим зарядом, но не может иметь спина, чтобы спин протона или нейтрона при ее поглощении или высвобождении не менялся бы.

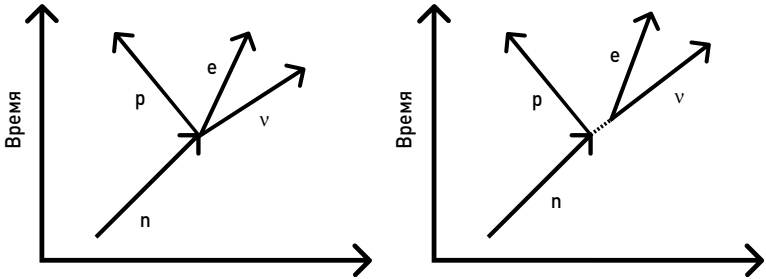
Вы можете спросить, какое отношение все эти тревоги по поводу сильного ядерного взаимодействия имеют к распаду нейтрона — теме, которой началась эта глава и закончилась предыдущая? В 1930-е гг. не только размышления о новых частицах раздражали и вызывали внутренний протест, но и придумывание новых сил казалось занятием в лучшем случае ненужным, а в худшем случае — еретическим. Физики были убеждены, что все процессы, происходящие в ядре, сильные или слабые, должны быть связаны между собой.

Юкава придумал хитроумный способ добиться этого, соединив идеи Ферми и Гейзенберга, а также обобщив идеи успешной квантовой теории электромагнетизма. Если вместо того, чтобы испускать фотон, нейтроны в ядре испускают новую частицу — тяжелую заряженную частицу без спина, которую Юкава первоначально назвал мезотроном, но затем Гейзенберг поправил его греческий и название было сокращено до мезона, — то эту

частицу могут поглощать протоны ядра, порождая при этом силу притяжения, величину которой Юкава смог рассчитать при помощи уравнений, экстраполированных им, как вы уже догадались, из теории электромагнетизма.

Однако аналогия с электромагнетизмом не могла быть полной, поскольку мезон массивен, а фотон массы не имеет. Юкава поступил так же, как мог бы поступить Ферми, если бы ему пришла в голову такая идея. Да, теория неполна, но Юкава готов был игнорировать остальные аспекты электромагнетизма, которые его теория воспроизвести не могла. Плевать на торпеды, полный вперед!

Юкава изобретательно — и, как выяснилось в конечном итоге, неверно — связал сильное взаимодействие с наблюдаемым нейтронным распадом, предположив, что мезоны, возможно, не всегда служат просто объектом обмена между нейтронами и протонами в ядре. Небольшая доля мезонов, испущенных нейтронами, по пути, прежде чем поглотиться, возможно, распадается на электрон и нейтрино, что приводит к распаду нейтрона. В этом случае нейтронный распад будет изображаться не так, как на рисунке слева, где и его исчезновение, и образование других частиц происходят в одной точке, а будет выглядеть скорее как на рисунке справа, где распад, можно сказать, размазывается в пространстве и новая частица (мезон Юкавы), показанная пунктирной линией, проходит небольшое расстояние, прежде чем распасться на электрон и нейтрино. С этой новой частицей-посредником слабое взаимодействие, обеспечивающее распад нейтрона, начинает больше походить на электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами.



Юкава предложил новую частицу-посредник, тяжелый мезон, с которым нейтронный распад выглядел бы похожим на известную картину обмена фотонами в электромагнетизме, — собственно, она и вдохновила его на эти размышления, — но с заметными отличиями. Промежуточная частица здесь обладала одновременно и массой, и электрическим зарядом; кроме того, в отличие от протона у нее не было спина, то есть момента импульса.

Юкава сумел показать, что для тяжелого мезона его теория будет неотличима от точечного взаимодействия Ферми, по крайней мере в предсказании деталей нейтронного распада. Кроме того, теория Юкавы позволяла свести все странные свойства ядра — от бета-распада нейтронов внутри ядра до силы взаимодействия, связывающей воедино протоны и нейтроны, — к необходимости разобраться в свойствах одного-единственного нового взаимодействия, которое является результатом обмена новой частицей — его мезоном.

Однако оставалось неясным: если новый тяжелый мезон существует, то где он? Почему никто до сих пор не видел его хотя бы в космических лучах? По этой причине, а также потому, что Юкава был никому не известен и работал далеко от всех центров, где происходили главные

события, никто не обратил сколько-нибудь серьезного внимания на его предложение, призванное объяснить одновременно и сильное взаимодействие между нуклонами, и более слабое взаимодействие, которое, как представлялось, отвечает за нейтронный распад. Тем не менее его гипотеза, в отличие от гипотез Гейзенберга и других физиков (включая Ферми), была проще и лучше отвечала здравому смыслу.

Все изменилось в 1936 г., менее чем через два года после предсказания Юкавы. Когда Карл Андерсон, первооткрыватель позитрона, и его коллега Сет Неддермейер обнаружили в космических лучах нечто, на первый взгляд показавшееся новым набором частиц. Характеристики треков этих новых частиц в туманных камерах позволяли предположить, что они слишком слабо излучают при прохождении через вещество, чтобы быть протонами или электронами. Кроме того, они были массивнее электронов и имели, кажется, иногда положительный, а иногда отрицательный заряд. Вскоре выяснилось, что масса новых частиц лежит в предсказанном Юкавой диапазоне и составляет около двухсот масс электрона.

Удивительно, как быстро спохватился остальной мир. Юкава опубликовал короткую заметку, в которой указал, что его теория предсказывает именно такие частицы. Уже через несколько недель крупнейшие физики Европы взялись исследовать его модель и включать его идеи в свою работу. В 1938 г., на последней крупной конференции перед тем, как Вторая мировая война прекратила почти все международное сотрудничество в науке, из восьми основных докладчиков трое говорили о теории Юкавы, называя имя, с которым еще год или два назад были совершенно незнакомы.

Хотя значительная часть околофизического мира праздновала очевидное открытие мезона Юкавы, само это открытие не было лишено серьезных проблем. В 1940 г. в треках космических лучей удалось пронаблюдать предсказанный Юкавой распад мезона с образованием электрона. Однако в 1943–1947 гг. стало ясно, что частицы, открытые Андерсоном и Неддермейером, взаимодействуют с атомными ядрами намного слабее, чем должна была бы взаимодействовать частица Юкавы.

Что-то было не так.

Трое японских коллег Юкавы предположили, что мезоны бывают двух разных сортов и что мезон Юкавы, возможно, распадается с образованием другого мезона, иного и взаимодействующего намного слабее. Но статьи этих ученых были написаны по-японски и не публиковались на английском языке до окончания войны, а к тому моменту аналогичное предположение было высказано американским физиком Робертом Маршаком.

Как ни странно, эта задержка оказалась даже полезной. Были разработаны новые методы наблюдения треков космических лучей в фотоэмульсиях, и целые группы храбрых исследователей потащили свое оборудование на все имеющиеся горы в поисках возможных новых сигналов. Многие частицы космических лучей вступают во взаимодействие и исчезают еще до достижения уровня моря, так что у научных групп, жаждущих исследовать чудный новый источник частиц, прилетающих прямо с небес, просто не было другого выбора, кроме как искать местечко повыше. Здесь космическим лучам приходилось проходить сквозь атмосферу меньшее расстояние и обнаруживать их было легче.

Джузеппе Оккиалини, бывший итальянский горный проводник, ставший физиком, во время войны был приглашен

из Бразилии, чтобы работать с британской командой, занимавшейся атомной бомбой. Как иностранец, он не мог непосредственно участвовать в проекте, так что присоединился в Бристоле к группе физиков, занимавшихся космическими лучами. Горная подготовка Оккиалини оказалась полезна, когда ему пришлось затаскивать фотографические эмульсии на французский Пик-дю-Миди высотой две тысячи восемьсот метров. Сегодня в эту обсерваторию на вершине пика можно доехать по канатной дороге — это жуткое и захватывающее путешествие. Но в 1946 г. Оккиалини пришлось, рискуя здоровьем, лезть на вершину в попытке уловить сигналы экзотической новой физики.

И ему вместе с его командой действительно удалось открыть эту новую экзотическую физику. По словам Сесила Пауэлла, одного из коллег Оккиалини по Бристолу (и будущего нобелевского лауреата, в отличие от Оккиалини, которому Нобелевки не досталось), они увидели «целый новый мир. Мы как будто внезапно вломились в огороженный защитной стеной сад, где пышно цвели деревья и зрели во множестве всевозможные экзотические фрукты».

Если воспользоваться менее поэтическим языком, то обнаружили они два случая, когда в толще эмульсии первоначальный мезон прекратил существование, породив при этом второй мезон, — в точности как предполагали теоретики. Когда же эмульсии подняли на высоту, почти вдвое превышающую Пик-дю-Миди, ученым удалось зарегистрировать немало новых событий. В октябре 1947 г. в журнале *Nature* Пауэлл, Оккиалини и ученик Пауэлла Чезаре Латтес опубликовали статью, в которой назвали первоначальный мезон — тот, судя по данным наблюдений, взаимодействовал с ядерной силой, подходящей для мезона

Юкавы, — пионом, а мезон, возникающий в результате его распада, — мюоном.

Казалось, что мезон Юкавы наконец-то открыт. Что же до его «партнера» — мюона, который прежде путали с мезоном Юкавы, то это была совсем другая частица. Во-первых, она не была лишена спина; напротив, она имела такой же спин, как электрон и протон. А ее взаимодействие с веществом было далеко не таким сильным, чтобы играть какую-то роль в ядерном связывании. Мюон оказался просто тяжелой, хотя и нестабильной копией электрона, что и послужило поводом для вопроса Раби: «А это кто заказывал?»

Итак, в конечном итоге оказалось, что частица, прославившаяся в 1936 г. Юкаву, вовсе не была той, которую он предсказал. Его идея приобрела известность потому, что первоначальный экспериментальный результат был неверно интерпретирован. К счастью, Нобелевский комитет дождался открытия пиона в 1947 г., прежде чем присудить Юкаве премию в 1949 г.

Учитывая длинную череду ошибок и присвоения неверных имен, естественно задаться вопросом: действительно ли пион был той частицей, которую предсказал Юкава? Ответ: одновременно и да и нет. Обмен заряженными пионами между протонами и нейтронами действительно позволяет точно оценить сильное ядерное взаимодействие, скрепляющее ядра атомов. Но, помимо заряженных пионов — мезонов, предсказанных Юкавой, существуют и нейтральные пионы. А их кто заказывал?

Более того, выдвинутая Юкавой теория для описания сильного взаимодействия, как и теория Ферми для описания нейтронного распада, не была полностью математически согласованной, что признавал и сам Юкава, когда

предлагал ее. В то время *еще* не существовало корректной релятивистской теории, описывающей обмен массивными частицами. Чего-то по-прежнему не хватало, и серия удивительных экспериментальных открытий в сочетании с провидческими теоретическими идеями, которые, к сожалению, применялись не к тем теориям, привели к десяти с лишним годам путаницы, прежде чем туман рассеялся и появился свет в конце туннеля. Или, может быть, в устье пещеры.

МАРШ ТИТАНОВ

Тогда волк будет жить вместе с ягнёнком, и барс
будет лежать вместе с козлёнком...

Исайя 11:6

Отношения между теоретическим озарением и экспериментальным открытием — один из интереснейших аспектов развития науки. В основе своей физика, как любая естественная наука, представляет собой эмпирическую дисциплину. Но бывают моменты, когда всё меняют короткие вспышки теоретических озарений. Безусловно, хорошим примером может служить проникновение Эйнштейна в природу пространства и времени в первые два десятилетия XX века. Другой пример — замечательный теоретический прогресс, связанный с разработкой квантовой механики Шрёдингером, Гейзенбергом, Паули, Дираком и другими в 1920-е гг.

Менее известен период с 1954 г. по 1974 г., который, хотя и не был настолько революционным, по прошествии некоторого времени будет рассматриваться как одна из наиболее плодотворных и продуктивных эпох в физике XX века. Эти два десятилетия перевели нас, не без сумятицы, от хаоса

к порядку, от замешательства к уверенности, от уродства к красоте. Это была бешеная гонка с несколькими, казалось бы, беспричинными блужданиями по окольным путям, — но наберитесь терпения! Если путь покажется вам слегка неудобным, вспомните, что я говорил во «Введении» о науке и комфорте. Только поставив себя на место тех, кто участвовал в этом квесте, чье разочарование вылилось со временем в озарения, только проникнувшись образом их мыслей, можно по-настоящему оценить значение этих озарений.

Этот бурный период следовал за временем, когда экспериментальные сенсации порождали только всеобщее замешательство и делали природу «всё страньше и страньше», как мог бы сказать Льюис Кэрролл. Открытие позитрона и вскоре после него нейтрона были только началом. Распад нейтрона, ядерные реакции, мюоны, пионы и целая куча последовавших за ними других новых элементарных частиц создавали впечатление, что фундаментальная физика — это нечто безнадежно сложное. Простая картина Вселенной, в которой одни только электромагнетизм и гравитация управляют взаимодействиями вещества, состоящего из протонов и электронов, отправилась на свалку истории. Некоторые физики того времени, подобно некоторым политикам сегодняшнего дня, жаждали простоты старых добрых дней, которая зачастую существовала лишь в их воображении.

Под впечатлением этой новообнаруженной сложности к 1960-м гг. некоторые физики решили, что в природе нет вообще ничего фундаментального. В своем воображении они создали сюрреалистичную картину, в которой все элементарные частицы состоят из всех остальных элементарных частиц, а представление о фундаментальных взаимодействиях всего лишь иллюзия.

Тем не менее где-то в глубине зрели теоретические идеи, которым суждено было отдернуть завесу невежества и путаницы, открыв взгляду базовую структуру природы, столь же замечательную, сколь и странно простую, в которой свет вновь играет ключевую роль.

Началось все с двух теоретических достижений: одного глубокого, но не замеченного, а другого — относительно прямолинейного, но блестящего и немедленно получившего известность. Примечательно, что в обе эти работы был вовлечен один и тот же человек.

Ян Чжэньнин родился в 1922 г. в семье математика. Образование он получил в Китае, причем в 1938 г., спасаясь от японского нашествия, был вынужден перебраться из Пекина в Куньмин. Четыре года спустя он окончил курс Национального юго-западного объединенного университета и остался в нем еще на два года. Тогда же он встретился с другим студентом, Ли Цундао, тоже вынужденно перебравшимся в Куньмин. Имея лишь смутное представление о Соединенных Штатах, оба они тем не менее в 1946 г. получили стипендии, учрежденные американским правительством на деньги Китая; эти деньги должны были дать талантливым китайским студентам возможность учиться в Америке. Ян уже имел диплом магистра, а потому пользовался большей свободой и мог выбирать, где защищать степень доктора философии; вместе с Ферми он перебрался из Колумбийского университета в Чикагский и приобрел американскую транскрипцию фамилии — Янг*. У Ли

* Китайцы различают два варианта конечного звука [н] и передают их латиницей различным образом, через n и ng. Традиционная транслитерация китайских фамилий Yan и Yang — Янь и Ян соответственно, однако если воспринимать носителя фамилии Yang как американца, то уже по правилам английской транслитерации ее следует

особого выбора не было, поскольку степени магистра он не имел, но единственным университетом в США, где он мог готовить диссертацию сразу на докторскую степень, тоже оказался Чикагский университет. Янг готовил диссертацию под руководством Эдварда Теллера и уже через год после выпуска работал непосредственно с Ферми в качестве помощника, а Ли готовил диссертацию под руководством Ферми.

В 1940-е гг. Чикагский университет был одним из ведущих центров теоретической и экспериментальной физики США, и его выпускники получали бесценный опыт общения с замечательными учеными — это были не только Ферми и Теллер, но и другие ученые, включая блестящего, но при этом очень скромного астрофизика Субраманьяна Чандрасекара. В девятнадцать лет Чандра, как часто называли его коллеги, доказал, что звезды с массой, более чем в 1,4 раза превышающей массу Солнца, в конце цикла ядерного горения должны катастрофически схлопываться либо через процесс, известный сегодня как взрыв сверхновой, либо непосредственно в то, что мы сегодня называем черной дырой. Хотя в то время теория молодого астрофизика была встречена насмешками, пятьдесят три года спустя он получил за нее Нобелевскую премию.

Чандра был не только блестящим ученым, но и, подобно Ферми, прирожденным педагогом. Занимаясь исследованиями в Йеркской обсерватории (штат Висконсин), он не ленился каждую неделю проезжать сто миль туда и обратно, чтобы вести занятия у двух студентов, записавшихся

передавать как Янг. Аналогичные проблемы неизбежно возникают и при передаче имен других американских авторов китайского происхождения, и эту разницу приходится аккуратно оговаривать. — *Прим. ред.*

на его семинары, — Ли и Янга. В конечном итоге все члены группы, включая и профессора, стали нобелевскими лауреатами (вероятно, это уникальный случай в истории науки).

В 1949 г. Янг перебрался в престижный Институт перспективных исследований в Принстоне, где продолжал плодотворно сотрудничать с Ли по разнообразным темам. В 1952 г. Янг получил в этом институте пожизненную должность, тогда как Ли в 1953 г. перебрался в расположенный неподалеку, в Нью-Йорке, Колумбийский университет, где и работал до выхода в отставку.

Каждый из этих людей внес в физику значительный вклад в различных областях, но прославившее их сотрудничество началось со странного экспериментального результата, опять же связанного с наблюдением космических лучей.

В том же году, когда Янг покинул Чикагский университет и начал работать в Институте перспективных исследований, первооткрыватель пиона Сесил Пауэлл обнаружил в космических лучах еще одну новую частицу, которую назвал тау-мезоном. Эта частица, согласно наблюдениям, распадалась на три пиона. Вскоре после этого была обнаружена еще одна частица, получившая название тета-мезона; она распадалась на два пиона. Как ни удивительно, выяснилось, что эта частица имеет в точности такую же массу и точно такое же время жизни, что и тау-мезон.

Возможно, это не покажется вам таким уж странным. Может быть, это одна и та же частица, просто ученые наблюдали два разных варианта ее распада? Не забывайте, что в квантовой механике все, что не запрещено, может произойти, и поскольку новая частица достаточно массивна, чтобы распасться хоть на два, хоть на три пиона, — а слабое взаимодействие допускает оба варианта, — то и другое должно время от времени происходить.

Но, по здравому смыслу, слабое взаимодействие не должно было бы разрешать оба варианта распада.

Подумайте, к примеру, на мгновение о своих руках. Ваша левая рука отличается от правой. Никакой простой физической процесс, за исключением прохода сквозь зеркало и попадания в зазеркалье, не способен превратить левую руку в правую и наоборот. Никакая последовательность движений — подъем или опускание рук, поворот вокруг оси или подпрыгивание на месте — не сможет превратить одно в другое.

Силы, определяющие наш опыт, — электромагнетизм и гравитация — не различают право и лево. Никакой процесс, управляемый одним из этих двух типов взаимодействия, не может превратить нечто в его же зеркальное отражение. Так, невозможно превратить вашу правую руку в левую, просто направляя на нее свет.

Иными словами, если я направлю луч света на вашу правую руку и взгляну на нее издали, интенсивность отраженного света будет точно такой же, какой была бы, если бы я проделал то же самое с вашей левой рукой. Свету, когда он отражается от объекта, нет дела до левого и правого.

Вообще, определение левого и правого введено нами по соглашению. Завтра мы можем решить, что левое — это правое и наоборот, и ничего не изменится, кроме наших ярлычков. Я пишу этот текст в самолете, в салоне эконом-класса, и человек в кресле справа от меня, вполне возможно, сильно отличается от человека слева, но опять же это всего лишь стечение случайных обстоятельств. Не думаю, что законы природы, которым подчиняется полет этого самолета, по-разному действуют на правое его крыло и на левое.

А теперь задумаемся, как все это выглядит в субатомном мире. Энрико Ферми, как мы помним, выяснил, что по правилам квантовой механики математическое поведение групп или пар элементарных частиц зависит от того, обладают ли они полуцелым спином, то есть являются ли фермионами. Поведение групп фермионов резко отличается от поведения таких частиц, как фотоны, у которых спин имеет значение 1 (или любое другое целое значение, к примеру 0, 1, 2, 3 и т. д.). Математическая «волновая функция», описывающая пару фермионов к примеру, антисимметрична, тогда как аналогичная функция, описывающая пару фотонов, симметрична. Это означает, что, если поменять частицы местами, волновая функция, описывающая фермионы, поменяет знак. Но для таких частиц, как фотоны, волновая функция при такой замене останется прежней.

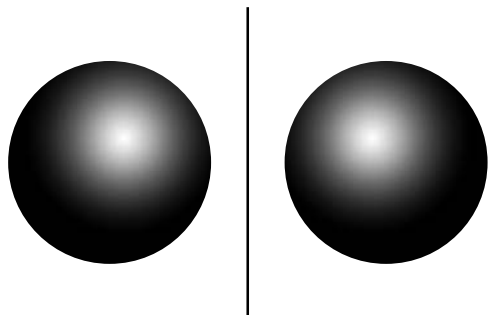
Поменять две частицы местами — то же самое, что отразить их в зеркале. Та, что была слева, теперь будет находиться справа, и наоборот. Таким образом, существует тесная связь между такой заменой и тем, что физики называют четностью и что является совокупной характеристикой подвергаемой отражению системы (то есть системы, в которой право и лево меняются местами).

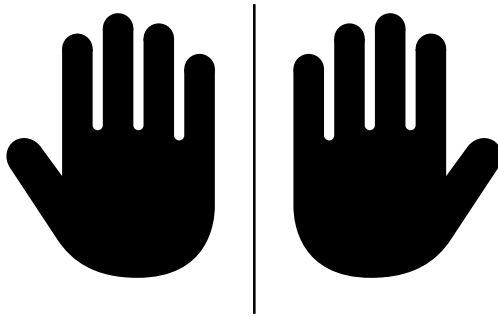
Если некая элементарная частица распадается на две другие частицы, то волновая функция, описывающая «четность» конечного состояния (то есть сообщающая, поменяет ли волновая функция знак при замене правых частиц на левые и наоборот), позволяет нам присвоить исходной частице некую величину, которую мы тоже назовем четностью. И если сила в квантовой механике, управляющая распадом, игнорирует различие между правым и левым,

то и сам распад не изменит четности квантового состояния системы.

Если же волновая функция системы антисимметрична в отношении обмена частиц после распада, то система имеет «отрицательную» четность. В этом случае волновая функция, описывающая начальное квантовое состояние распадающейся частицы, тоже должна обладать отрицательной четностью (то есть менять знак при обмене правого и левого).

Так вот, пионы — частицы, существование которых предположил Юкава, а открыл Пауэлл, — имеют отрицательную четность, так что волновая функция, описывающая квантовое состояние их зеркального отражения, должна иметь другой знак по сравнению с первоначальной волновой функцией. Различие между положительной и отрицательной четностью — это как различие между чудесным круглым мячом, который в зеркале выглядит точно так же, как без него, и потому характеризуется положительной четностью, и, скажем, вашей рукой, которая при отражении в зеркале меняет вид, превращаясь из правой в левую, и потому, можно сказать, характеризуется отрицательной четностью.





Из-за этих несколько абстрактных соображений наблюдаемые данные, связанные с распадом новых, открытых Пауэллом частиц, поставили физиков в тупик. Поскольку четность пиона отрицательна, четность пары пионов должна быть положительной, поскольку $(-1)^2 = 1$. Однако система из трех пионов, по тем же соображениям, будет иметь отрицательную четность, так как $(-1)^3 = -1$. Таким образом, если при распаде частицы четность не меняется, одна и та же частица не может распадаться до двух разных конечных состояний с разной четностью.

Если бы сила, ответственная за распад, вела себя так же, как вели себя в те времена все остальные известные силы, такие как электромагнетизм или гравитация, то она игнорировала бы четность (не различала бы правое и левое) и потому не меняла бы в процессе распада первоначальную четность системы — точно так же, как свет, направленный на вашу правую руку, не сделает ее похожей на левую.

Поскольку представлялось невозможным, чтобы некий тип частиц распадался иногда на два, а иногда на три пиона, решение казалось простым. Требуется не одна, а две новые элементарные частицы с противоположными характеристиками четности. Пауэлл окрестил их тау-частицей

и тета-частицей; одна из них распадалась на два пиона, другая — на три.

Наблюдения говорили о том, что эти две частицы обладают в точности одинаковой массой и временем жизни, что казалось немного странным, но Ли и Янг предположили, что это может быть общим свойством различных элементарных частиц; согласно их гипотезе, частицы существуют парами с противоположными значениями четности. Они назвали эту идею «удвоением четности».

Так выглядела ситуация весной 1956 г., когда началась Международная конференция по физике высоких энергий, проходившая каждый год в Университете Рочестера. В 1956 г. все сообщество ученых, интересующихся физикой элементарных частиц и ядерной физикой, легко вмещалось в одну университетскую лекционную аудиторию, и все эти ученые, включая и сильнейших игроков, старались приехать на эту ежегодную встречу. На той конференции Ричард Фейнман жил в одной комнате с Марти Блоком. Будучи экспериментатором, Блок не так остро реагировал на еретическое в то время предположение о том, что какая-то сила в природе может не быть слепа по отношению к правому и левому, и потому он спросил Фейнмана, не может ли оказаться так, что слабое взаимодействие, управляющее распадами, которые наблюдал Пауэлл, различает правое и левое. Это позволило бы одной и той же частице распасться до состояний разной четности — имелось в виду, что тау-и тета-частицы оказались бы на поверку одной и той же частицей.

Блоку не хватило дерзости поднять этот вопрос на общем заседании, но Фейнману хватило, хотя сам он считал этот вариант чрезвычайно маловероятным. Янг ответил, что он и Ли думали об этом, но пока из этой идеи ничего

не вышло. На заседании присутствовал и Юджин Вигнер, который позже получил Нобелевскую премию за разъяснение важности таких вещей, как четность, в атомной и ядерной физике; он тоже поднял вопрос о том, не может ли слабое взаимодействие различать правое и левое.

Однако всё достается победителю, а от простых рассуждений о возможном нарушении четности новым типом фундаментального взаимодействия, способным, может быть, различать левое и правое, было далеко до того, чтобы это продемонстрировать. Месяцем позже Ли и Янг, обедая в нью-йоркском кафе, решили еще раз проанализировать все известные эксперименты, имевшие дело со слабым взаимодействием, чтобы понять, можно ли по данным какого-нибудь из них отвергнуть всякую возможность нарушения четности. Прюделав это, они, к собственному огромному удивлению, поняли, что ни один эксперимент наверняка это не устанавливает. Янг позднее вспоминал: «Тот факт, что сохранение четности при слабом взаимодействии так долго не подвергалось сомнению без всяких экспериментальных доказательств, поражал воображение. Но еще поразительнее была перспектива того, что закон симметрии пространства — времени, который физики так хорошо изучили, может нарушаться. Эта перспектива нам не нравилась».

К чести Ли и Янга следует отметить, что молодые ученые предложили несколько экспериментов, при помощи которых можно было проверить возможность того, что слабое взаимодействие различает правое и левое. Они предложили рассматривать бета-распад нейтрона в ядре кобальта-60. Поскольку это радиоактивное ядро обладает ненулевым спином (моментом импульса), то есть ведет себя так, будто вращается вокруг своей оси, оно также

работает как крохотный магнит. Во внешнем магнитном поле такие ядра выстраиваются в направлении поля. Если электроны, испущенные при распаде нейтрона в ядре, в конечном итоге оказываются преимущественно в одном полушарии, а не в другом, то это признак нарушения четности, поскольку в зеркале те же электроны оказались бы в противоположном полушарии.

Если бы это оказалось правдой, то означало бы, что на фундаментальном уровне природа различает правое и левое. Тогда и созданные человеком различия между ними (не зря же «правый» означает не только сторону, но и правоту) оказались бы не совершенно искусственными. Таким образом, мир в зеркале можно было бы отличить от реального мира, или, как позже образно сформулировал Ричард Фейнман, мы могли бы использовать этот эксперимент, чтобы отправить послание марсианам, информирующее их, какое направление является «левым», — скажем, то полушарие, где наблюдается появление большего числа электронов, — и для этого не нужно будет рисовать картинку.

Тогда такая возможность казалась настолько маловероятной, что многих в физическом сообществе эта инициатива позабавила, но никто не спешил поставить предложенный эксперимент. То есть никто, кроме коллеги Ли по Колумбийскому университету — физика-экспериментатора У Цзяньсюн, известной также как мадам Бу.

Даже сегодня мы нередко сетуем на малое число женщин среди физиков, обучающихся в американских университетах, но в 1956 г. ситуация была много хуже. О чем говорить, если до конца 1960-х гг. женщин даже не принимали в большинство университетов Лиги плюща. Почти через тридцать лет после того как У (Бу) прибыла из Китая в 1936 г. на учебу в Беркли, журнал *Newsweek* в посвященной

ей статье привел такое ее высказывание: «Безобразно, что в науке так мало женщин... В Китае множество женщин занимается физикой. В Америке бытует ложное представление, что все женщины-ученые — неряшливые старые девы. Виноваты в этом мужчины. В китайском обществе женщина ценится за то, что она собой представляет, и мужчины поощряют ее достижения — но при этом она остается бесконечно женственной».

Как бы то ни было, Ву была специалистом по распаду нейтрона, и заманчивая возможность поискать нарушения четности в слабом взаимодействии, о которой она узнала от своих друзей Ли и Янга, ее заинтриговала. Она отменила поездку с мужем в Европу и занялась этим экспериментом в июне — всего через месяц после того, как Ли и Янг впервые задумались об этой проблеме; к октябрю того же года, когда статья Ли и Янга вышла из печати, она с несколькими коллегами собрала необходимую для эксперимента установку. Через два дня после Рождества того же года они получили результат.

Сегодня эксперименты в области физики элементарных частиц могут занимать десятилетия от задумки до завершения, но в 1950-е гг. все обстояло не так. Кроме того, это было время, когда физики, судя по всему, не думали о таких вещах, как отпуск и выходные. Несмотря на рождественские праздники, организованные Ли пятничные «китайские завтраки» продолжались, и в первую пятницу после Нового года Ли объявил, что группа Ву обнаружила не просто нарушение четности, но нарушение, максимально возможное в данном эксперименте. Результат настолько всех удивил, что группа Ву продолжила работу в том же направлении, чтобы убедиться, что результат не объясняется каким-то недоразумением или ошибкой эксперимента.

Тем временем Леон Ледерман и его коллеги Дик Гарвин и Марсель Вайнрич, тоже из Колумбийского университета, поняли, что могут проверить эти результаты в своих экспериментах по распаду пионов и мюонов на университетском циклотроне. Не прошло и недели, как обе группы — а еще Джерри Фридман и Вал Телегди в Чикаго — независимо подтвердили результат с высокой достоверностью и к середине января 1957 г. представили свои статьи в *Physical Review*. Они навсегда изменили нашу картину мира.

Колумбийский университет созвал, вероятно, первую в истории пресс-конференцию для объявления научного результата. Фейнман проиграл пари на 50 долларов, а вот Вольфгангу Паули повезло больше. Он 15 января написал из Цюриха письмо Виктору Вайскопфу в Массачусетский технологический институт, в котором предложил пари на то, то эксперимент Ву не покажет нарушения четности, не зная, что эксперимент ее уже показал. В письме Паули эмоционально восклицал: «Я отказываюсь верить, что Бог — слабосильный левша», продемонстрировав к тому же интересное мнение о бейсболе. Вайскопф, который к тому моменту уже знал о полученных результатах, оказался слишком честен, чтобы принять предложенное пари.

Узнав новости, Паули некоторое время спустя написал: «Теперь, когда первый шок миновал, я начинаю приходить в себя». Это был настоящий шок. Идея о том, что одна из фундаментальных сил в природе различает правое и левое, всей силой обрушилась и на здравый смысл, и на основания современной физики в том виде, как ее тогда понимали.

Шок был настолько силен, что, чуть ли не впервые в истории Нобелевской премии, воля Нобеля была выполнена

надлежащим образом. В его завещании говорится, что премия должна выдаваться ученому или ученым в каждой научной области, чья работа *в том году* принесла наиболее важные результаты. В октябре 1957 г., почти точно через год после публикации статьи Ли и Янга и всего через десять месяцев после подтверждения, полученного Ву и Ледерманом, тридцатиднолетний Ли и тридцатичетырехлетний Янг разделили между собой Нобелевскую премию, которая была присуждена им за выдвинутую гипотезу. А вот мадам Ву, которую называли китайской мадам Кюри, пришлось, как ни обидно, довольствоваться честью стать первым лауреатом учрежденной двадцать лет спустя премии Вольфа по физике.

Внезапно слабое взаимодействие стало куда более интересным, но и куда менее понятным. Теория Ферми, которой физики обходились до того момента, строилась примерно по модели теории электромагнетизма. Об электромагнитном взаимодействии можно думать как о силе, возникающей между двумя электрическими токами, соответствующими двум движущимся электронам, между которыми и происходит взаимодействие. Слабое взаимодействие тоже можно представить аналогичным образом, если считать, что в одном из токов нейтрон в процессе взаимодействия превращается в протон, а другой ток образуют вылетающие электрон и нейтрино.

Однако между этими ситуациями есть два принципиальных различия. В слабом взаимодействии по Ферми два тока взаимодействуют в одной точке, а не на расстоянии, и токи в слабом взаимодействии позволяют частицам превращаться из одного типа в другой в процессе движения сквозь пространство.

Если электромагнитные взаимодействия в зеркале выглядят точно так же, как в реальном мире, то в слабом

взаимодействии четность нарушается, задействованные в нем «токи» должны будут, как отмечал Паули, иметь «хиральность», то есть направленность, позволяющую различать в них правое и левое, как, к примеру, имеют хиральность штопор и ножницы, отражение которых в зеркале отличается от оригинального предмета.

Нарушение четности при слабом взаимодействии можно уподобить принятому в обществе правилу, согласно которому мы пожимаем друг другу правую руку. У людей зазеркального мира рукопожатие выполняется левыми руками. Таким образом, реальный мир заметно отличается от своего зеркального отражения. Если бы токи в слабом взаимодействии обладали хиральностью, то само слабое взаимодействие могло бы различать правое и левое, и тогда в зазеркальном мире оно выглядело бы не так, как в нашем реальном мире.

Было проделано много работы — и возникло много путаницы, когда физики попытались в деталях разобраться, какие типы новых возможных взаимодействий могли бы заменить простое взаимодействие токов по Ферми, при котором задействованным частицам невозможно было приписать какую бы то ни было хиральность. Теория относительности допускает ряд возможных обобщений взаимодействия Ферми, но результаты различных экспериментов приводили к разным, взаимоисключающим математическим формам для искомого взаимодействия, так что казалось невозможным объяснить все эти результаты одним универсальным слабым взаимодействием.

Примерно в то же время, когда появились первые экспериментальные результаты по распаду нейтрона и мюона, позволяющие предположить, что четность при слабом взаимодействии нарушается в максимально возможной

степени, в этой запутанной ситуации начал разбираться студент-выпускник Рочестерского университета Джордж Сударшан. Он предложил свою теорию универсального взаимодействия, которая могла бы заменить вариант Ферми, — и со временем выяснилось, что его теория верна, — однако из нее также вытекало, что по крайней мере некоторые экспериментальные результаты того времени ошибочны.

История эта завершилась в какой-то мере трагично. На конференции в Рочестере, через три месяца после того, как было открыто нарушение четности, и через год после того, как Ли и Янг представили свои первые мысли об удвоении четности, Сударшан подал заявку на выступление, чтобы представить свои результаты. Однако, поскольку он был всего лишь студентом, его заявка была отклонена. Его научный руководитель Роберт Маршак, в свое время предложивший Сударшану эту исследовательскую задачу, к тому моменту был поглощен уже другой задачей из области ядерной физики и предпочел провести вместо этого семинар по своей теме. Еще один сотрудник, которого попросили упомянуть в своем выступлении работу Сударшана, также забыл это сделать. Так что дискуссия о возможной форме слабого взаимодействия, проходившая на конференции, в конечном итоге ни к чему не привела.

Ранее, в 1947 г., Маршак первым предположил, что в экспериментах Сесила Пауэлла были открыты два разных мезона, один из которых представляет собой частицу, о существовании которой говорил Юкава, а второй — частицу, которая в настоящее время называется мюоном. Кроме того, Маршак был инициатором Рочестерских конференций и, вероятно, считал, что выпустить на ней с выступлением своего студента было бы фаворитизмом. К тому же, чтобы идея Сударшана работала, по крайней мере некоторые

экспериментальные данные должны были оказаться ошибочными, поэтому, вполне возможно, Маршак решил, что представлять эту идею на конференции преждевременно.

Тем летом Маршак работал на корпорацию RAND в Лос-Анджелесе и позвал с собой Сударшана и еще одного студента. Два самых известных в то время в мире теоретика в области физики элементарных частиц — Фейнман и Гелл-Манн — работали в Калифорнийском технологическом, и оба они были одержимы разгадкой формы слабого взаимодействия.

Фейнман в свое время не открыл нарушения четности, потому что не стал упорствовать в поиске ответов на вопросы, которые сам же и задал, но с тех пор он успел понять, что его работа по квантовой электродинамике могла бы пролить свет на слабое взаимодействие. Он отчаянно стремился к этому, поскольку чувствовал, что его работа в области КЭД — это всего лишь хитроумное математическое упражнение, куда менее благородное, чем установление формы закона, управляющего одним из фундаментальных взаимодействий в природе. Однако гипотеза Фейнмана относительно формы слабого взаимодействия также, судя по всему, расходилась с экспериментальными данными того времени.

В 1950-е гг. именно Гелл-Манну суждено было предложить многие из важнейших в то время и надолго сохранивших свое значение идей в физике элементарных частиц. Он был одним из двух физиков, которые предположили, что протоны и нейтроны состоят из более фундаментальных частиц, которые Гелл-Манн назвал кварками. У него были собственные причины размышлять о четности и слабом взаимодействии. Основой его успеха в значительной части была сосредоточенность на новых математических симметриях в природе, и он, помимо прочего, использовал эти идеи, чтобы предложить новую возможную форму для

слабого взаимодействия, но опять же его идея противоречила экспериментальным данным.

Во время пребывания в Лос-Анджелесе Маршак организовал для Сударшана завтрак с Гелл-Манном, на котором они могли бы поговорить о своих идеях. Кроме того, они встретились с выдающимся экспериментатором Феликсом Бёмом, по словам которого, его эксперименты теперь соответствовали их идеям. Сударшан и Маршак узнали от Гелл-Манна, что его идеи созвучны с гипотезой Сударшана, но что сам Гелл-Манн планирует, быть может, включить этот момент одним параграфом в длинную статью по общим вопросам слабого взаимодействия.

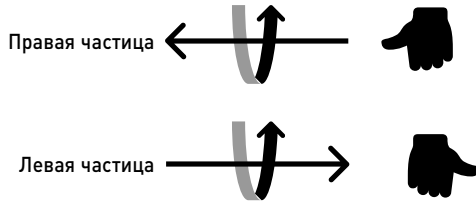
Тем временем Сударшан и Маршак подготовили статью по своей идее, и Маршак решил приберечь ее и представить осенью на международной конференции в Италии. Однако Фейнман, узнав от Бёма о новых экспериментальных данных, решил — с немалым энтузиазмом, — что его идеи верны, и начал писать статью на эту тему. Гелл-Манн, будучи очень амбициозным по характеру, решил, что, раз Фейнман пишет статью по этому вопросу, ему тоже стоит написать статью. В итоге руководитель факультета убедил Фейнмана и Гелл-Манна написать совместную статью, что они и сделали. Статья привлекла огромное внимание и стала знаменитой. Хотя в текст и были включены благодарности за плодотворные дискуссии Сударшану и Маршаку, их собственная статья появилась позже в трудах конференции и не могла соперничать со статьей Фейнмана и Гелл-Манна в борьбе за внимание физического сообщества.

Позже, в 1963 г., Фейнман, всегда старавшийся проявлять великодушие в отношении идей, публично заявил: «Эту теорию открыли Сударшан и Маршак, но сделали популярной Фейнман и Гелл-Манн». Но это заявление прозвучало

слишком поздно, да и было его явно недостаточно. Даже в лучшие времена трудно было бы конкурировать в вопросах славы с Фейнманом и Гелл-Манном, и Сударшану пришлось прожить много лет с сознанием того, что универсальную форму слабого взаимодействия, открытую двумя героями мировой физики, первым предложил именно он, причем с большей уверенностью, чем остальные.

Теория Сударшана, красиво изложенная в статье Фейнмана и Гелл-Манна, получила известность как V-A-теория слабого взаимодействия. Название ее имеет сугубо техническое происхождение и станет понятнее в последующих главах, однако фундаментальная идея этой теории проста, хотя и покажется неспециалисту одновременно нелепой и бессмысленной: токи, фигурирующие в теории Ферми, должны быть «левыми».

Чтобы разобраться в этой терминологии, вспомним, что в квантовой механике элементарные частицы, такие как электроны, протоны и нейтрино, обладают вращательным моментом импульса, то есть ведут себя так, как если бы вращались вокруг своей оси, хотя с классической точки зрения точечная частица не может считаться вращающейся. Теперь рассмотрим направление их движения и предположим на мгновение, что частица подобна волчку, вращающемуся вокруг своей оси. Протяните правую руку и расположите ее так, чтобы отставленный большой палец указывал в направлении движения частицы. Теперь согните остальные пальцы. Если онигибаются в том же направлении (против часовой стрелки), в каком вращается частица/волчок относительно направления движения, то частицу называют правой. Если вытянуть левую руку и проделать ту же операцию, то левая частица будет вращаться по часовой стрелке, соответствуя движению согнутых пальцев вашей руки.



Если посмотреть на левую руку в зеркало, она будет выглядеть как правая рука; точно так же, если смотреть в зеркало на вращающуюся в полете стрелу, направление ее движения поменяется, так что если в реальном мире стрела летит прочь от вас, то в зеркале она будет лететь к вам, но направление ее вращения не поменяется. Таким образом, в зеркале левая частица превратится в правую. (Так что, если бы у бедняг в Платоновой пещере было зеркало, они, возможно, не удивлялись бы так сильно тому, что тени стрел меняют направление движения.)

Эта рабочая картинка левой частицы неточна, поскольку, если подумать, то левую частицу можно превратить в правую, просто двигаясь быстрее этой частицы. В системе отсчета, в которой человек покоится и видит, как мимо пролетает частица, она, возможно, будет двигаться влево. Но если вы сядете в ракету, направите ее влево и обгоните частицу, то относительно вас она будет двигаться вправо. В результате получается, что представленное выше описание является точным только для частиц, которые не имеют массы и потому движутся со скоростью света. Ведь если частица движется со скоростью света, ничто не может двигаться так быстро, чтобы ее обогнать. Математически точное определение левости частицы должно принимать во внимание данный эффект, но здесь мы к этому больше обращаться не будем.

Электроны могут вращаться в любом направлении, однако V-A-теория в математической форме утверждает, что лишь движущиеся электроны с левыми токами способны «чувствовать» слабое взаимодействие и участвовать в распаде нейтрона. Правые токи этого взаимодействия не чувствуют.

И что еще поразительнее, нейтрино чувствуют только слабое взаимодействие, и никакого другого. Насколько мы можем судить, нейтрино бывают *только* левыми. Дело не только в том, что лишь один сорт нейтринного тока может быть задействован в слабом взаимодействии. Во всех без исключения экспериментальных наблюдениях по сей день *не* встречалось правых нейтрино, — возможно, это самая наглядная демонстрация нарушения четности в природе.

Кажущаяся глупость такой организации предстала передо мной особенно выпукло несколько лет назад, когда в одном из эпизодов сериала «Звездный путь: Далекый космос 9» офицер по науке на космической станции обнаружила, что в казино, где сосредоточены азартные игры, что-то не так с законами вероятности. Она пропустила через подозрительное заведение нейтринный луч и обнаружила, что на выходе наблюдаются только левые нейтрино. Ясно, что здесь какой-то непорядок.

За исключением того, что именно так все и обстоит *на самом деле*.

Что не так с природой? Как так получается, что по крайней мере для одного из фундаментальных взаимодействий левое и правое не равнозначны? И почему нейтрино так отличаются от всех прочих частиц? Простой ответ на эти вопросы состоит в том, что мы пока этого не знаем, хотя само наше существование, которое является производным

от природы известных взаимодействий, напрямую от этого зависит. Это одна из причин, почему мы стараемся это объяснить. Объяснение нового взаимодействия привело к новым загадкам и, подобно большинству загадок в природе, в конечном итоге дало нам ключ, который должен был повести физиков по новому пути открытий. Осознание того, что в природе нет симметрии левого и правого, которую прежде все считали фундаментальной, заставило физиков заново исследовать, как проявляются в нашем мире симметрии и, что еще важнее, как они не проявляются.

ИЗ БЕСКОНЕЧНОГО ВОЗНИКАЕТ КРАСИВЕЙШЕЕ: СИММЕТРИЯ НАНОСИТ ОТВЕТНЫЙ УДАР

Вера же есть осуществление ожидаемого
и уверенность в невидимом.

Евр. 11:1

Вслед за Паули мы можем сказать, что мать-природа — слабая левша. После осознания того шокирующего факта, что природа различает левое и правое, физика и сама повернула налево и двинулась по незнакомой дороге, лишенной привычных ориентиров. Чудесная упорядоченность периодической таблицы элементов, управляющей явлениями на атомных масштабах, уступила место загадке ядра и непостижимой природе сил, управляющих его поведением.

Миновали простые, как стало уже казаться, дни света, движения, электромагнетизма, тяготения и квантовой механики. Впечатляюще успешную теорию квантовой электродинамики, занимавшую до этого прочные позиции на переднем крае физики, сменил, казалось, беспорядочный мир

экзотических явлений, связанных с новооткрытыми слабым и сильным ядерными взаимодействиями, которые правят самым сердцем материи. Их проявления и свойства нелегко было разделить, несмотря на то что одно из этих взаимодействий было в тысячи раз сильнее другого. Мир фундаментальных частиц все усложнялся, и ситуация с каждым годом становилась все запутаннее.



Если открытие нарушения четности спутало все карты, продемонстрировав, что у природы имеются совершенно неожиданные предпочтения, то первые лучи света на ситуацию пролило осознание того, что другие ядерные величины, на первый взгляд представлявшиеся совершенно различными, могут оказаться не такими уж разными, если рассматривать их в фундаментальной перспективе.

Быть может, важнейшим открытием в ядерной физике было то, что протоны и нейтроны способны превращаться друг в друга, как предположил Юкава много лет назад. На базе этого открытия и сформировалось постепенно понимание слабого взаимодействия. Однако большинство физиков чувствовало, что это открытие служит также ключом к пониманию сильного взаимодействия, скрепляющего, по-видимому, атомные ядра.

За два года до революционного совместного проекта с Ли, положившего конец священной лево-правой симметрии природы, Янг сосредоточил свои усилия на попытке разобраться в том, как другой тип симметрии, позаимствованный из квантовой электродинамики, может обнажить скрытую внутри ядра красоту. Возможно, как обнаружил Галилей в отношении основ движения, очевиднейшие вещи, наблюдаемые в природе, — это как раз те,

которые наиболее эффективно маскируют ее фундаментальные свойства.

Постепенно — не только за счет прогресса в исследовании нейтронного распада и других слабых эффектов в атомных ядрах, но и из наблюдения сильных ядерных столкновений — становилось ясно: когда в дело вступает фундаментальная физика, определяющая ядерные явления, очевидное различие между протонами и нейтронами (протон заряжен, а нейтрон нейтрален) может оказаться несущественным. Как минимум в том же смысле, как несущественна очевидная разница между падающим пером и падающим камнем для нашего понимания физики тяготения и падающих объектов.

Во-первых, слабое взаимодействие умеет превращать протоны в нейтроны. Еще важнее, что если сравнить скорости других, более сильных ядерных реакций, в которых сталкиваются протоны или нейтроны, то замена протонов нейтронами и наоборот слабо влияет на результат.

В 1932 г., когда был открыт нейтрон, Гейзенберг высказал предположение о том, что протон и нейтрон могут оказаться всего лишь двумя состояниями одной и той же частицы, и придумал для их различения параметр, который назвал изотопическим спином. В конце концов, массы у них почти одинаковы, а в легких стабильных ядрах их содержится равное количество. Вслед за этим и после того, как известные физики-ядерщики Бенедикт Кассен, Эдвард Кондон, Грегори Брейт и Юджин Финберг признали, что ядерные реакции, по-видимому, практически не различают протоны и нейтроны, блестящий математический физик Юджин Вигнер предположил, что в ядерных реакциях «сохраняется» изотопический спин. Подразумевалось, что это фундаментальная симметрия, управляющая

ядерными силами между протонами и нейтронами. (Ранее Вигнер разработал правила, демонстрирующие, как симметрии в атомных системах в конечном итоге допускают полную классификацию атомных состояний и переходов между ними, за что впоследствии был удостоен Нобелевской премии.)

Ранее, при обсуждении электромагнетизма, я отметил, что суммарный электрический заряд не меняется в ходе электромагнитного взаимодействия — то есть электрический заряд сохраняется — благодаря фундаментальной симметрии между положительным и отрицательным зарядами. Фундаментальная связь между законами сохранения и симметриями намного шире и глубже этого единственного примера. Глубокие и неожиданные отношения между законами сохранения и симметриями в природе стали важнейшим ведущим принципом физики XX века.

Несмотря на всю важность, точная математическая связь между законами сохранения и симметриями была выявлена только в 1915 г. замечательным немецким математиком Эмми Нётер. Как ни печально, хотя Нётер и была одним из наиболее значительных математиков начала XX века, большую часть своей жизни она трудилась без какой-либо официальной должности или оплаты.

Против Нётер работало два фактора. Во-первых, она была женщиной, что очень затрудняло как получение образования, так и поиск работы на раннем этапе ее деятельности. Во-вторых, она была еврейкой, что положило конец ее академической карьере в Германии и привело в конце концов к бегству в США незадолго до смерти. Она умудрилась попасть в Университет Эрлангена, оказавшись одной из двух девушек на 986 студентов, но даже здесь посещать учебные курсы ей позволялось только после получения особого

разрешения от каждого профессора. Тем не менее она сдала выпускной экзамен и позже недолгое время училась в прославленном Гёттингенском университете, прежде чем вернулась в Эрланген работать над докторской диссертацией. Проработав в Эрлангене семь лет преподавателем без жалованья, в 1915 г. она получила приглашение вернуться в Гёттинген от знаменитого математика Давида Гильберта. Историки и философы на факультете, однако, не допустили ее назначения. Один из членов университета протестовал: «Что подумают наши солдаты, когда вернутся в университет и обнаружат, что им предлагается овладеть знаниями у ног женщины?» В ответе, который бесконечно усилил мое и без того огромное уважение к Гильберту за его замечательный математический талант, он сказал: «Не понимаю, почему полкандидата служит доводом против ее избрания приват-доцентом. Ведь здесь университет, а не баня».

Однако Гильберт не сумел убедить коллег, и, хотя следующие семнадцать лет Нётер преподавала в Гёттингене, до 1923 г. она не получала жалованья. Несмотря на значительный вклад во многие области математики — ее достижения были настолько многочисленными и настолько глубокими, что Нётер часто причисляют к великим математикам XX столетия, — профессорской должности она так и не получила.

Тем не менее в 1915 г., вскоре после прибытия в Гёттинген, Эмми Нётер доказала теорему, которая сейчас носит ее имя и которую изучают все студенты-физики — или должны были бы изучать, если хотят называть себя физиками.



Вновь возвращаясь к электромагнетизму и к той связи между произвольно назначенными положительным и от-

рицательным зарядами (если бы Бенджамин Франклин, определяя положительный заряд, лучше представлял себе устройство природы, то электроны сегодня, вероятно, считались бы частицами с положительным, а не с отрицательным зарядом), отметим, что закон сохранения электрического заряда — он заключается в том, что суммарный заряд системы до и после любой физической реакции не меняется, — вовсе не очевиден. На самом деле это следствие теоремы Нётер, которая гласит, что с каждой фундаментальной симметрией в природе — а именно с каждым преобразованием, при котором законы природы остаются неизменными, — связана некоторая сохраняющаяся физическая величина. Иными словами, эта величина не меняется со временем в процессе эволюции физических систем. Так, например:

- закон сохранения электрического заряда отражает тот факт, что законы природы не меняются при одновременной инверсии всех электрических зарядов;
- закон сохранения энергии отражает тот факт, что законы природы не меняются со временем;
- закон сохранения импульса отражает тот факт, что законы природы не меняются от одного места к другому;
- закон сохранения момента импульса отражает тот факт, что законы природы не зависят от того, в каком направлении система повернута.

Следовательно, заявленное сохранение изотопического спина при ядерных реакциях — это отражение экспериментально подтвержденного заявления, что ядерные взаимодействия остаются примерно одинаковыми при превращении всех протонов в нейтроны и наоборот. Кроме того,

в мире нашего опыта оно проявляется в том, что по крайней мере у легких элементов число протонов и нейтронов в ядре примерно одинаково.

В 1954 г. Янг вместе со своим тогдашним соавтором Робертом Миллсом сделал еще один важный шаг вперед — и опять отталкиваясь от мыслей о свете. Электромагнетизм и квантовая электродинамика не только обладают простой симметрией, говорящей нам, что не существует принципиальной разницы между отрицательным и положительным зарядом и что названия эти даны произвольно, но, как я уже подробно объяснял, здесь работает также куда более тонкая симметрия — та, что в конечном итоге определяет полную теорию электродинамики.

Калибровочная симметрия в электромагнетизме говорит, что можно изменить определение положительного и отрицательного заряда локально, не изменив при этом законов физики, если существует поле — в данном случае электромагнитное, которым можно объяснить любые подобные локальные изменения и тем самым обеспечить, чтобы дальнедействующие силы между зарядами не зависели от этого переименования. Следствием этого в квантовой электродинамике является существование частицы, не имеющей массы, — фотона, который представляет собой квант электромагнитного поля и обеспечивает перенос взаимодействия между разнесенными в пространстве частицами.

В этом смысле калибровочная инвариантность, представляющая собой симметрию природы, гарантирует именно ту форму электромагнетизма, которую он имеет. Характер взаимодействия между заряженными частицами и светом также предписывается этой симметрией.

Янг и Миллс задались новым вопросом: что произойдет, если расширить симметрию, позволяющую без изменения

физики явлений всюду заменить протоны нейтронами и наоборот, и ввести симметрию, которая позволяла бы переобозначать «протоны» и «нейтроны» по-разному в разных точках пространства. Из аналогии с квантовой электродинамикой ясно, что понадобилось бы какое-то новое поле, чтобы объяснить и нейтрализовать действие произвольной замены этикеток от точки к точке. Если это поле квантовое, то не могут ли связанные с ним частицы играть какую-то роль или даже полностью определять природу ядерных сил между протонами и нейтронами?

Вопросы были интереснейшие, а Янг и Миллс, к их чести, не только сформулировали их, но и попытались найти ответы, анализируя, какие математические следствия повлекло бы за собой существование нового типа калибровочной симметрии, связанного с сохранением изотопического спина.

Сразу же стало ясно, что это сильно усложнило бы ситуацию. В квантовой электродинамике простая смена знаков заряда между электронами и позитронами не меняет величину суммарного заряда на каждой частице. Однако переименование частиц в ядре заменяет нейтральный нейтрон положительно заряженным протоном. Поэтому любое новое поле, которое пришлось бы ввести, чтобы скомпенсировать эффект такого локального превращения и обеспечить неизменность базовых законов физики, само должно быть заряженным. Но если само поле заряжено, то, в отличие от фотонов, которые, будучи нейтральными, сами не взаимодействуют непосредственно с другими фотонами, это новое поле должно, помимо всего прочего, взаимодействовать с самим собой.

Вводя необходимость нового заряженного обобщения электромагнитного поля, мы сильно усложняем математику,

управляющую нашей теорией. Во-первых, для того, чтобы объяснить все изотопические преобразования спина, требуется не одно такое поле, а три: одно — положительно заряженное, другое — отрицательно заряженное и третье — нейтральное. Это означает, что недостаточно единственного поля в каждой точке пространства, подобного электромагнитному полю в КЭД, которое имеет определенную величину и направление в каждой точке пространства (в физике такое поле называется векторным). Электрическое поле необходимо заменить полем, которое описывается математическим объектом, известным как матрица — не путать с чем-то имеющим отношение к Киану Ривзу.

Янг и Миллс исследовали математику, лежащую в основе этого нового, более сложного типа калибровочной симметрии, который мы сегодня называем либо неабелевой калибровочной симметрией, — она возникает из определенного математического свойства матриц, отличающего их умножение от умножения чисел, — либо, отдавая дань уважения Янгу и Миллсу, симметрией Янга — Миллса.

На первый взгляд статья Янга и Миллса кажется абстрактным, чисто умозрительным математическим изучением следствий из предположения о возможной форме нового взаимодействия, построенного по аналогии с калибровочной симметрией в электромагнетизме. Тем не менее это было не просто упражнением в чистой математике. В статье делалась попытка разобраться в возможных наблюдаемых следствиях такой гипотезы, чтобы понять, имеет ли она какое-либо отношение к реальному миру. К сожалению, математика оказалась настолько сложной, что возможные наблюдаемые проявления были неочевидны.

И все же одно *было* ясно. Поскольку новые «калибровочные поля» должны учитывать и, следовательно,

компенсировать эффекты независимых преобразований изотопического спина, производимых в пространственно разнесенных местах, поля эти должны быть безмассовыми. Это, в сущности, эквивалентно утверждению о том, что только благодаря отсутствию у фотонов массы взаимодействие между частицами, которое они обеспечивают, может осуществляться на сколь угодно большом расстоянии. Возвращаясь к аналогии с шахматной доской, можно сказать, что требуется единый свод правил, говорящих, как двигаться по всей доске, с учетом того, что я заранее случайным образом поменял цвета ее клеток. Массивные калибровочные поля, которыми невозможно обмениваться на сколь угодно больших расстояниях, эквивалентны наличию инструкции, которая сообщает вам, как компенсировать замену цветов только на клетках, находящихся неподалеку от начальной. Это не позволило бы вам двигать фигуры по доске на большие расстояния.

Короче говоря, калибровочная симметрия, как в электромагнетизме, так и в более экзотической гипотезе Янга — Миллса, работает только в том случае, если новые поля, которых требует симметрия, не имеют массы. При всей математической сложности этот единственный факт остается нерушимым.

Но мы не наблюдаем в природе никаких дальнедействующих сил, помимо электромагнетизма и гравитации, в которых был бы задействован обмен безмассовыми частицами. Ядерные взаимодействия имеют малый радиус и действуют только в пределах ядра.

Эта очевидная проблема не ускользнула от внимания Янга и Миллса, и они, если называть вещи своими именами, были выбиты из колеи. Они выдвинули гипотезу, что их новые частицы каким-то образом способны, взаимодействуя

с ядром, становятся массивными. Попытавшись чисто теоретически оценить массы этих частиц, они обнаружили, что теория математически слишком сложна и не позволяет дать сколько-нибудь разумной оценки. Им было известно лишь, что из эмпирических соображений масса новых калибровочных частиц должна превышать массу пионов, чтобы они не поддавались обнаружению в поставленных на тот момент экспериментах.

Подобный жест отчаяния мог бы показаться признаком лени или непрофессионализма, но Янг и Миллс, как и Юкава до них, знали, что никому не удалось создать разумную квантово-полевую теорию частицы, подобной фотону, но, в отличие от фотона, имеющей массу. Поэтому в то время казалось, что попытка решить все проблемы квантовой теории поля разом не стоит свеч. Вместо этого они, подобно Джонатану Свифту, но с меньшей непочтительностью, просто представили свою статью как скромную гипотезу, чтобы подстегнуть воображение коллег.

Вольфганг Паули, однако, не мог принять даже такого скромного предположения. Сам он годом раньше тоже обдумывал аналогичные идеи, но отказался от них. Более того, он считал, что все разговоры о квантовых неопределенностях при измерении масс всего лишь ложный след. Если бы в природе действительно существовала новая калибровочная симметрия, связанная с изотопическим спином и управляющая ядерными силами, то новые частицы Янга — Миллса, подобно фотонам, не имели бы массы.

Именно по этим причинам, в частности, статья Янга — Миллса вызвала гораздо меньше шума в то время, чем вызвал позже опус Янга и Ли. Для большинства физиков это была в лучшем случае забавная диковинка, а общее

внимание тогда было захвачено недавно открытым нарушением четности.

Но не для Джулиана Швингера, потому что он не был обычным физиком. Этот вундеркинд в восемнадцать лет закончил университет, а в двадцать один год получил степень доктора философии. Трудно найти двух менее похожих физиков, чем Швингер и Фейнман, которые разделили Нобелевскую премию в 1965 г. за независимые, но эквивалентные по смыслу работы, развивающие теорию квантовой электродинамики. Швингер был блестящим и рафинированным ученым с прекрасными манерами. Фейнман был блестящим ученым, но манерами не блистал и рафинированным его никто не назвал бы. Фейнман часто полагался на интуицию и догадки, основанные на опыте и чудесном владении математикой. Швингер во владении математикой нисколько не уступал Фейнману, но работал очень организованно и оперировал сложными математическими выражениями с легкостью, недоступной простым смертным. Он шутил о диаграммах Фейнмана, придуманных для того, чтобы облегчить опасно трудоемкие расчеты в квантовой теории поля; он говорил: «Подобно кремниевым чипам последних лет, диаграмма Фейнмана несет вычисления в массы». Однако у них была и общая черта. Они шагали в разных ритмах... в противоположные стороны.

Швингер воспринял идею Янга — Миллса всерьез. Должно быть, его привлекла математическая красота этой теории. В 1957 г., тогда же, когда было открыто нарушение четности, Швингер сделал дерзкое и на первый взгляд в высшей степени маловероятное предположение о том, что именно для слабого взаимодействия, отвечающего за распад нейтронов с превращением их в протоны, электроны и нейтрино, возможность существования полей

Янга — Миллса может оказаться полезной, но в неожиданном и замечательном смысле. Он предположил, что наблюдаемая калибровочная симметрия электромагнетизма может оказаться всего лишь одной частью более масштабной калибровочной симметрии, в которой новые калибровочные частицы служат посредниками для слабого взаимодействия, вызывающего распад нейтронов.

Очевидное возражение против подобного рода объединения состоит в том, что слабое взаимодействие намного слабее электромагнетизма. У Швингера нашелся ответ на это возражение. Если каким-то образом новые калибровочные частицы окажутся *очень* тяжелыми — почти в тысячу раз тяжелее протонов и нейтронов, то взаимодействие, которое они могут переносить, будет действовать на еще более коротких расстояниях, намного меньших, чем даже размер ядра или даже отдельного протона или нейтрона. В этом случае, если вычислить вероятность того, что такое взаимодействие вызовет распад нейтрона, она окажется мала. Таким образом, если дальность действия слабого взаимодействия мала, то эти новые поля, сила взаимодействия которых с электронами и протонами на малых масштабах была бы сравнима с силой электромагнетизма, могли бы тем не менее на масштабах атомного ядра и более крупных проявляться *намного* слабее.

Грубо говоря, Швингер высказал дикую идею о том, что электромагнетизм и слабое взаимодействие, несмотря на вопиющие и очевидные различия между ними, представляют собой часть одной теории Янга — Миллса. Он считал, что фотон в принципе мог бы оказаться нейтральным членом комплекта из трех калибровочных частиц, необходимых по Янгу — Миллсу, если рассматривать изотопический спин как калибровочную симметрию; заряженные члены

этого комплекта переносят слабое взаимодействие и выступают в роли посредников при распаде нейтронов. Почему при этом заряженные частицы должны обладать громадными массами, притом что фотон безмассовый, он понятия не имел. Но, как я часто говорю, недостаток понимания не свидетельствует ни о существовании Бога, ни об ошибочности гипотезы. Он говорит всего лишь о недостатке понимания.

Швингер был не только блестящим физиком, но и не менее блестящим преподавателем и наставником. Если у Фейнмана было всего несколько успешных учеников (вероятно, потому, что никто из них за ним не попевал), то у Швингера, кажется, был настоящий талант вести за собой блестящих аспирантов. За свою жизнь он руководил более чем семьдесятю аспирантами, и четверо его учеников стали впоследствии лауреатами Нобелевской премии.

Швингер заинтересовался возможной связью между слабым взаимодействием и электромагнетизмом в достаточной степени, чтобы рекомендовать эту тему для исследования одному из дюжины своих студентов. Шелдон Глэшоу окончил аспирантуру в 1958 г., защитив диссертацию по этому предмету, и еще несколько лет продолжал исследования в качестве сотрудника Национального научного фонда в Копенгагене. В своей нобелевской лекции двадцать лет спустя Глэшоу сказал, что он и Швингер планировали написать что-нибудь по этому вопросу после защиты Глэшоу, но кто-то из них потерял первую черновую рукопись и больше они к этому вопросу не возвращались.

Глэшоу вовсе не был копией Швингера. Да, он был блестящим ученым и обладал прекрасными манерами, но он также был нахален, игрив и шумен. Исследования Глэшоу не отличались математической акробатикой; их отличала

скорее четкая сосредоточенность на физических загадках и интерес к новым возможным симметриям природы, которые могли бы их разрешить.

Когда я был юным выпускником-физиком Массачусетского технологического института, меня влекли к себе глубокие математические вопросы физики, и моя работа при поступлении в аспирантуру была посвящена им. Но прошло несколько лет, и природа математических исследований, которыми я занимался, начала подавлять меня. Я познакомился с Глэшоу в летней школе для аспирантов и подружился с ним самим, и с его семьей — позже, когда мы с ним стали коллегами по Гарварду, эта дружба продолжилась. Через год после нашей встречи он взял творческий отпуск, чтобы провести его в МТИ. Для меня это был важный год, я тогда рассматривал альтернативные варианты, и он сказал мне: «Есть физика, а есть уравнения, и нужно понимать разницу». Этот совет подразумевал, что мне следует продолжать заниматься физикой. Когда я увидел, каким интересным делом он занимается и какую радость от этого получает, мне стало легче думать о том, чтобы и самому заниматься чем-то подобным.

Как я вскоре понял, мне, чтобы добиться чего-либо в физике, нужно работать над вопросами, движимыми в основном физическими проблемами, а не математическими. Для этого не существует других способов, кроме как следить за текущими экспериментами и всегда быть в курсе новых экспериментальных результатов. Наблюдая за Шелли и за тем, как он занимался физикой, я понял, что он обладает поразительной способностью видеть, какие эксперименты интересны и какие результаты могут оказаться значительными или указывать на что-то новое. Отчасти это, несомненно, была врожденная способность, но в какой-то

мере она базировалась на громадном опыте, на постоянных контактах с экспериментаторами и постоянном отслеживании всего, что происходит «на земле». Физика — эмпирическая наука, и терять связь с реальностью опасно для нас.

В Копенгагене Глэшоу понял, что если он хочет надлежащим образом воплотить предложение Швингера и связать слабое взаимодействие с электромагнитным, то просто объявить фотон нейтральным членом тройки калибровочных частиц, заявив, что два заряженных члена становятся массивными посредством какого-то неизвестного пока чуда, мало. Это не объяснит подлинную природу слабого взаимодействия и, в частности, тот странный факт, что слабое взаимодействие работает, судя по всему, только с левыми электронами (и нейтрино), тогда как электромагнитное взаимодействие не различает левые и правые электроны.

Единственным решением этой проблемы представлялось существование еще одной нейтральной калибровочной частицы в дополнение к фотону, которая сама по себе связывалась бы только с левыми частицами. Но эта новая нейтральная частица, очевидно, тоже должна была быть тяжелой, поскольку переносимые ею взаимодействия были слабыми.

С идеями Глэшоу физическое сообщество познакомил Мюррей Гелл-Манн в 1960 г. на Рочестерской конференции, поскольку к тому времени Гелл-Манн успел привлечь Глэшоу к работе в своей группе в Калтехе. Статья Глэшоу на эту тему, представленная в 1960 г., вышла из печати в 1961 г., но не вызвала сколько-нибудь широкого отклика.

В конце концов, в гипотезе Глэшоу по-прежнему фигурировали две фундаментальные проблемы. Первая была давно знакома: как могут частицы, переносящие разные взаимодействия, обладать разными массами, если калибровочные

симметрии требуют, чтобы все калибровочные частицы не имели массы вовсе. Глэшоу просто, как и многие до него, высокомерно заявил во введении к статье: «Это камень преткновения, на который мы не должны обращать внимания».

Вторая проблема была более тонкой, но с экспериментальной точки зрения не менее серьезной. И нейтронный, и пионный, и мюонный распад, если их и в самом деле обеспечивали какие-то новые частицы, переносящие слабое взаимодействие, как будто требовали только обмена новыми заряженными частицами. До сих пор не наблюдалось никакого слабого взаимодействия, которое требовало бы обмена некоей новой нейтральной частицей. И если бы такая нейтральная частица действительно существовала, то, как показывали тогдашние расчеты, она позволяла бы прочим известным тяжелым мезонам, распадавшимся на два или три пиона (из-за которых и возникла первоначально путаница, в результате чего было обнаружено нарушение четности), распадаться намного быстрее, чем это наблюдалось в экспериментах.

По этим причинам гипотеза Глэшоу отошла на задний план; тем временем физиков все сильнее увлекал настоящий зоопарк новых частиц, вылетающих из ускорителей, и сопутствующая им возможность новых открытий. И хотя несколько ключевых теоретических ингредиентов, необходимых для завершения революции в фундаментальной физике, уже были на месте, это в то время было далеко не очевидно. То, что всего лишь за десять с небольшим лет после выхода статьи Глэшоу все известные взаимодействия в природе, за исключением гравитации, предстанут в новом свете и будут поняты, показалось бы в тот момент чистой фантазией.

А ключом ко всему послужила симметрия.

ХОЛОДНАЯ ЗАСТЫВШАЯ РЕАЛЬНОСТЬ: СТРАШНО ИЛИ КРАСИВО?

Из чьего чрева выходит лед, и иней небесный, —
кто рождает его?

Иов 38:29

Легко испытывать жалость по отношению к несчастным обитателям Платоновой пещеры, которые способны узнать и понять все, что можно узнать о тенях на стене, за исключением того, что всё это — тени. Но внешность бывает обманчива. Что, если мир вокруг нас всего лишь подобная им тень реальности?

Представьте, к примеру, что вы просыпаетесь однажды морозным зимним утром и выглядываете в окно — а все стекло покрыто красивыми ледяными кристаллами, образующими на стекле странные рисунки. Вот примерно как на этой фотографии. Красота изображения поражает отчасти из-за замечательной упорядоченности на малых масштабах, которая сочетается с очевидной беспорядочностью на больших масштабах. Из кристаллов льда выросли

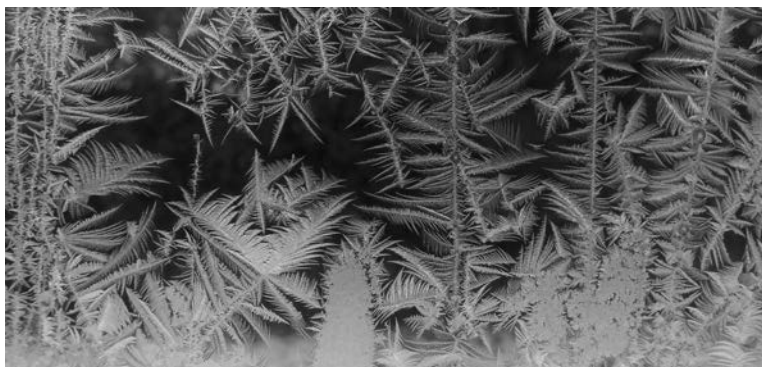


Фото Елены Филатовой

великолепные древовидные структуры, выходящие из основания в самых разных направлениях и сталкивающиеся друг с другом под случайными углами. Контраст между упорядоченностью на малых масштабах и явным беспорядком на крупных наводит на мысль, что для крохотных физиков или математиков, живущих в замкнутом пространстве на оси одного из сфотографированных ледяных кристаллов, Вселенная выглядела бы совсем не так, как для нас.

Пространственное направление, соответствующее оси ледяного кристалла, обладало бы особыми свойствами. Природный мир казался бы ориентированным относительно этой оси. Более того, с учетом строения кристаллической решетки электрические силы вдоль оси казались бы совсем не такими, как в перпендикулярном направлении: одна и та же сила проявляла бы себя как разные силы.

Если бы физик или математик, живущий на кристалле, был умен или, подобно математику в Платоновой пещере, удачлив и смог покинуть кристалл, то ему скоро стало бы ясно, что особое направление, определяющее физику привычного ему мира, всего лишь иллюзия. Он понял бы — или,

по крайней мере, обоснованно предположил, — что другие кристаллы, возможно, сориентированы в других направлениях. В конечном итоге, если бы этот ученый смог взглянуть на окно снаружи в достаточно крупном масштабе, ему стала бы очевидна фундаментальная симметрия природы в отношении поворотов, проявляющаяся в том, что кристаллы могут расти во всех направлениях.

В центре внимания современной физики лежит представление о том, что мир нашего опыта являет собой подобное случайное стечение конкретных обстоятельств, а не отражает непосредственно фундаментальную реальность. Это представление даже получило самостоятельное забавное название — «спонтанное нарушение симметрии».

Я уже упоминал один вид спонтанного нарушения симметрии, когда речь шла о четности, или симметрии правого и левого. Левая рука человека выглядит иначе, чем его же правая рука, хотя электромагнетизм — сила, определяющая строение больших биологических структур, таких как наши тела, — не различает левое и правое.

Два другие известных мне примера — оба они представлены известными физиками — также помогают высветить разные аспекты спонтанного нарушения симметрии, что может оказаться полезным. Абдус Салам, удостоенный Нобелевской премии в 1979 г. за работу, целиком основанную на этом явлении, описал всем нам знакомую ситуацию. Представьте, что вы с группой людей садитесь за круглый стол, накрытый, скажем, на восемь персон. Когда вы рассаживаетесь, вам, возможно, не очевидно, который бокал на столе предназначен вам, а который — вашему соседу справа или слева. Но, несмотря на правила этикета, предписывающие ставить бокал по правую руку от сидящего, как только кто-то первым возьмет свой бокал в руку,

у всех остальных за столом останется только один вариант — если, конечно, вы стремитесь к тому, чтобы никто из участников застолья не остался без выпивки. Несмотря на то, что базовая симметрия накрытого стола очевидна, она нарушается, когда сидящие за столом выбирают направление для винных бокалов.

Йоитиро Намбу — еще один нобелиат, первым из физиков описавший спонтанное нарушение симметрии в физике элементарных частиц, предложил другой пример, который я воспроизвожу с некоторой адаптацией. Возьмите стержень (или даже соломинку для напитков), поставьте его одним концом на стол и надавите сверху на конец стержня. В конечном итоге стержень согнется. Он может согнуться в любом направлении, и если вы проделаете эксперимент несколько раз, то обнаружите, что стержень каждый раз сгибается в новом направлении. Заметим, что до вашего нажатия стержень обладал полной цилиндрической симметрией. После нажатия оказывается выбранным лишь одно направление из многих возможных, определяемое не собственной физикой стержня, а каждый раз случайными характеристиками каждого вашего нажатия. Происходит спонтанное нарушение симметрии.

Если теперь вернуться в мир покрытого изморозью окна, то окажется, что материалы могут изменяться с понижением температуры системы. Вода замерзает, газы сжимаются и т. д. В физике подобные изменения называются фазовыми переходами, и, как показывает пример с окном, нередко, когда система претерпевает фазовый переход, обнаруживается, что симметрии, связанные с одним фазовым состоянием, в другой фазе исчезают. К примеру, до замерзания и превращения в кристаллы льда на оконном стекле капли воды не были столь упорядоченными.

Один из самых поразительных фазовых переходов, известных науке, первым удалось наблюдать голландскому физику Камерлинг-Оннесу 8 апреля 1911 г. Оннес научился — и это уже было замечательно — охлаждать вещества до недостижимых прежде температур, и ему первому удалось получить жидкий гелий, который переходит в сверхпроводящее состояние всего при четырех градусах выше абсолютного нуля. За это экспериментальное достижение он позже был удостоен Нобелевской премии. 8 апреля, охладив ртутную проволочку в ванне из жидкого гелия до температуры 4,2 градуса по абсолютной шкале и измерив ее электрическое сопротивление, он с изумлением обнаружил, что оно внезапно упало до нуля. Токи, однажды возникшие в кольце из такой проволоки, могут циркулировать вечно даже после отключения источника тока. Для обозначения этого замечательного и совершенно неожиданного результата Оннес пустил в оборот слово «сверхпроводимость», чем продемонстрировал, что его способности в деле пиара нисколько не уступают его же экспериментаторским талантам.

Явление сверхпроводимости было настолько неожиданным и странным, что потребовалось почти пятьдесят лет после открытия квантовой механики, которой оно обязано своим существованием, прежде чем Джон Бардин, Леон Купер и Роберт Шриффер в 1957 г. сумели дать ему удивительное физическое объяснение. (Произошло это в том самом году, когда было открыто нарушение четности, а Швингер предложил модель объединения слабого и электромагнитного взаимодействий.) Их превосходная работа строилась на цепочке озарений, случившихся на протяжении нескольких десятилетий. В конечном итоге объяснение это опирается на неожиданное явление, способное возникать в некоторых материалах.

В пустом пространстве электроны отталкивают от себя другие электроны, поскольку обладают зарядами одного знака. Однако при охлаждении некоторых материалов электроны в них способны связываться с другими электронами. Так происходит в веществе потому, что свободный электрон притягивает к себе положительно заряженные ионы. Если температура чрезвычайно низка, то поле этих положительно заряженных ионов вокруг электрона может притянуть к себе еще один электрон. Пары электронов могут связываться между собой, а склеивает их, если хотите, положительно заряженное поле, созданное влиянием притяжения первого электрона на решетку положительных зарядов, связанных с атомами вещества.

Поскольку ядра атомов тяжелые и удерживаются на месте относительно сильными межатомными взаимодействиями, первый электрон лишь слегка искажает решетку близлежащих атомов, придвигая их чуть ближе к себе, чем они располагались бы без него. Искажения решетки в общем случае вызывают в веществе вибрации, или звуковые волны. В квантовом мире эти вибрации квантованы и называются фононами. Леон Купер выяснил, что фононы способны связывать пары электронов, как я описывал выше, поэтому такие пары называют куперовскими.

Подлинное волшебство квантовой механики начинается дальше. Когда ртуть (или любое из ряда других веществ) охлаждается до температуры ниже определенной точки, происходит фазовый переход и все куперовские пары внезапно сливаются в единое квантовое состояние. Это явление, известное как конденсация Бозе — Эйнштейна, возникает потому, что, в отличие от фермионов, частицы с целочисленным квантово-механическим спином, такие как фотоны, или даже частицы с нулевым спином предпочитают

находиться в одном и том же состоянии. Первым такое предположение высказал индийский физик Шатъендранат Бозе, а позже его гипотезу развил Эйнштейн. Здесь вновь свет сыграл принципиальную роль, поскольку в анализе Бозе использовалась статистика фотонов, а сама конденсация Бозе — Эйнштейна тесно связана с физическими законами, которые управляют лазерами, где множество отдельных фотонов ведет себя когерентно, пребывая в одном и том же состоянии. Поэтому частицы с целочисленным спином, такие как фотоны, называют бозонами, чтобы отличать их от фермионов.

В газе или твердом теле при комнатной температуре обычно происходит так много столкновений между частицами, что их индивидуальные состояния стремительно меняются, а какое бы то ни было коллективное поведение невозможно. Однако бозонный газ при достаточно низкой температуре может превращаться в конденсат Бозе — Эйнштейна, в котором самостоятельность отдельных частиц исчезает. Вся система ведет себя как единый, иногда даже макроскопический объект, но подчиняется правилам квантовой, а не классической механики.

В результате конденсат Бозе — Эйнштейна может обладать весьма экзотическими свойствами — так же как свет лазера может вести себя совершенно иначе, чем обычный свет от фонарика. Поскольку конденсат Бозе — Эйнштейна представляет собой массовое объединение того, что в противном случае было бы отдельными невзаимодействующими частицами, в единое квантовое состояние, создание такого конденсата требовало особых, весьма экзотических атомно-физических экспериментов. Непосредственно наблюдать образование конденсата из составляющих газ частиц впервые удалось только в 1955 г. американским

физикам Карлу Виману и Эрику Корнеллу, и это достижение также было сочтено достойным Нобелевской премии.

Возможность подобной конденсации в толще такого вещества, как ртуть, выглядит особенно странной, потому что изначально в ней участвуют электроны, которые в нормальных условиях не только отталкиваются друг от друга, но к тому же имеют полуцелый спин и, как я уже отмечал, будучи фермионами, ведут себя противоположно бозонам.

Но, когда образуются куперовские пары, каждые два электрона начинают действовать совместно, а поскольку у каждого из них спин равен $\frac{1}{2}$, составной объект получает целочисленный ($2 \times \frac{1}{2}$) спин. И вуаля — создан новый тип бозона. Минимально возможное энергетическое состояние системы, в которое она приходит при низкой температуре, представляет собой конденсат из куперовских пар, где все они находятся в одном и том же состоянии. Когда это происходит, свойства материала полностью меняются.

До образования конденсата, когда к проволоке прикладывают напряжение, отдельные электроны начинают двигаться — возникает электрический ток. Сталкиваясь по пути с атомами, электроны теряют энергию, отчего возникает знакомое всем нам электрическое сопротивление, приводящее к нагреву проводника. Когда же образуется конденсат, отдельные электроны и даже отдельные куперовские пары теряют всякую индивидуальную идентичность. Подобно боргам из сериала «Звездный путь», они вливаются в коллектив. При возникновении электрического тока весь конденсат движется как единое целое.

Если бы конденсат столкнулся с отдельным атомом и отскочил от него, изменилась бы траектория всего конденсата. Но это потребовало бы значительного количества энергии — намного больше, чем нужно, чтобы изменить

направление движения отдельного электрона. Классически мы можем описать этот результат следующим образом: при низких температурах случайные колебания атомов не содержат достаточно тепловой энергии, чтобы изменять движение всей массы конденсата, включающего множество частиц. Это как пытаться сдвинуть с места грузовик, бросая в него попкорном. С квантово-механической точки зрения результат аналогичен. В этом случае мы сказали бы, что для изменения конфигурации конденсата весь массив конденсата частиц должен был бы сдвинуться на значительную фиксированную величину и перейти в новое квантовое состояние, которое энергетически отличается от первоначального. Но тепловая ванна при низкой температуре не может обеспечить такой энергии. В качестве альтернативы мы могли бы предположить, что столкновение разбивает два электрона куперовской пары в составе конденсата — ну, скажем, как при столкновении со столбом у грузовика отламывается зеркало заднего вида. Но при низких температурах все движется слишком медленно, чтобы это могло произойти, так что ток течет беспрепятственно. Борг сказал бы, что сопротивление бесполезно. В данном случае, однако, сопротивления просто нет. Однажды возбужденный ток будет течь вечно, даже если убрать источник, который первоначально был подключен к проводнику.

Это была теория сверхпроводимости Бардина — Купера — Шриффера (БКШ) — замечательный труд, позволивший в конечном итоге объяснить все экспериментальные свойства таких сверхпроводников, как ртуть. Эти новые свойства свидетельствуют, что основное состояние системы изменилось по сравнению с тем, в котором она находилась до превращения в сверхпроводник; подобно ледяным кристаллам на оконном стекле, эти новые свойства отражают

спонтанное нарушение симметрии. В сверхпроводниках нарушение симметрии не так наглядно, как в ледяных узорах на стекле, но оно тем не менее есть, хотя и скрыто под поверхностью.

Математически о нарушении симметрии свидетельствует то, что после образования конденсата из куперовских пар для изменения конфигурации материала в целом внезапно начинает требоваться значительная минимальная энергия. Конденсат ведет себя как макроскопический объект довольно большой массы. Появление такого «скачка массы» (он выражается как минимальная энергия, необходимая для вывода системы из сверхпроводящего состояния) — визитная карточка фазового перехода с нарушением симметрии, при котором возникает сверхпроводимость.

Несмотря на всю занимательность этих явлений, вы, вероятно, гадаете, какое все это имеет отношение к истории, на которой сосредоточено наше внимание, а именно к пониманию фундаментальных взаимодействий в природе. Теперь, задним числом, связь эта очевидна. Однако в сложном и запутанном мире физики элементарных частиц в 1950–1960-х гг. путь к ясности был далеко не прямым.

В 1956 г. Йоитиро Намбу, незадолго до того перебравшийся в Чикагский университет, посетил семинар Роберта Шриффера, посвященный тому, что в будущем стало БКШ-теорией сверхпроводимости, и услышанное произвело на него огромное впечатление. Подобно большинству тех, кто интересовался в то время физикой элементарных частиц, он пытался разобраться, какое место знакомые частицы, составляющие атомное ядро, — протоны и нейтроны — занимают в зоопарке частиц и джунглях взаимодействий, связанных с их рождением и распадом.

Намбу, как и других, поражали почти равные массы протона и нейтрона. Ему, как в свое время Янгу и Миллсу, казалось, что такое совпадение должно быть результатом действия какого-то глубинного закона природы. Намбу, однако, предположил, что ключ к решению может дать феномен сверхпроводимости, в особенности вид новой шкалы собственных энергий, которая связана с энергией возбуждения, необходимой для разрушения конденсата из куперовских пар.

На протяжении трех лет Намбу разбирался, как можно приспособить эту идею к нарушениям симметрии в физике элементарных частиц. Он предложил модель, согласно которой в природе может существовать аналогичный конденсат некоторых полей, и минимальная энергия, необходимая для создания возбуждения в этом конденсированном состоянии, может быть той самой большой собственной массой/энергией, связанной с протонами и нейтронами.

Намбу и независимо от него физик Джеффри Голдстоун выяснили, что признаком такого нарушения симметрии было бы существование других безмассовых частиц, известных в настоящее время как бозоны Намбу — Голдстоуна (НГ), или голдстоуновские бозоны, взаимодействие которых с остальным веществом отражало бы также природу нарушения симметрии. Здесь можно провести своеобразную аналогию с более знакомой системой, такой как ледяной кристалл, где спонтанно нарушается симметрия относительно пространственного переноса, поскольку движение в одном направлении резко отличается от движения в другом. Но в таком кристалле возможны крошечные колебания отдельных атомов кристаллической решетки относительно своих равновесных положений. Эти колебательные моды, называемые, как я уже говорил, фононами, способны

содержать в себе сколь угодно малое количество энергии. В квантовом мире физики элементарных частиц эти моды отразились бы как безмассовые частицы Намбу — Голдстоуна, поскольку там, где явно проявляется эквивалентность между энергией и массой, возбуждения, способные нести малую энергию или не нести никакой, соответствуют частицам с нулевой массой.

И вдруг — подумать только! — оказалось, что открытые Пауэллом пионы очень близко подходят под это описание. У них не то чтобы совсем отсутствует масса, но они намного легче остальных частиц, участвующих в сильном взаимодействии. Их взаимодействия с другими частицами имеют характеристики, ожидаемые для НГ-бозонов, которые могут существовать, если в природе имелось некоторое явление, нарушающее симметрию, энергия возбуждения для которого соответствовала бы по масштабу массе/энергии протонов и нейтронов.

Но, несмотря на всю важность работы Намбу, и сам он, и почти все его коллеги в данной области просмотрели связанное с ней, но гораздо более глубокое следствие спонтанного нарушения симметрии в теории сверхпроводимости, которое позже дало ключ к раскрытию подлинной загадки сильного и слабого ядерных взаимодействий. Внимание Намбу к нарушениям симметрии было совершенно оправданно, но аналогии, которые он и другие исследователи проводили со сверхпроводимостью, были неполны.

А на самом деле мы гораздо сильнее похожи на физиков, обитающих на ледяном кристалле изморози, чем можем себе представить. Зато нетрудно вообразить, что, как и у этих физиков, наша близорукость далеко не сразу была замечена физическим сообществом.

ЖИЗНЬ ВНУТРИ СВЕРХПРОВОДНИКА

Ложь говорит каждый своему ближнему; уста лъстивы, говорят от сердца притворного.

Псалтырь 11:2

Сейчас ошибки прошлого могут показаться очевидными, но не забывайте, что объекты, наблюдаемые в зеркале заднего вида, часто оказываются ближе, чем кажется. Легко критиковать наших предшественников за упущения, но и то, что сегодня ставит нас в тупик, нашим потомкам может показаться очевидным. Работая на переднем крае науки, мы движемся по тропе, зачастую скрытой в тумане.

Аналогия со сверхпроводимостью, которую впервые использовал Намбу, полезна, но в основном по совершенно иным причинам, чем думали в свое время Намбу и другие. Задним числом ответ может показаться чуть ли не очевидным, как становятся очевидными после финала все намеки и детали, указывающие на убийцу в романах Агаты Кристи. Но, как и в этих детективах, на пути исследователя возникает множество отвлекающих деталей, а тупиковые

направления делают полученное в конечном итоге решение еще более неожиданным.

Можно только посочувствовать физикам в той неразберихе, что царила тогда в исследованиях элементарных частиц. Вводились в строй новые ускорители, и всякий раз, когда преодолевался новый порог энергии столкновения, перед изумленным взором ученых появлялись новые сильно взаимодействующие родичи нейтронов и протонов. Процесс казался бесконечным. Это обескураживающее разнообразие заставляло и теоретиков, и экспериментаторов сконцентрироваться на загадке сильного ядерного взаимодействия: казалось, что именно в нем заключается самый серьезный вызов существующей теории.

Казалось, микромир можно описать как потенциально бесконечное число элементарных частиц со все возрастающими массами. Но все это плохо сочеталось с идеями квантовой теории поля — успешной концепции, сумевшей чудесно объяснить релятивистское квантовое поведение электронов и фотонов.

Физик Джеффри Чу из Университета в Беркли возглавил работу над популярной и влиятельной программой разрешения этой проблемы. Чу отказался от идеи существования каких бы то ни было по-настоящему фундаментальных частиц и от всякой микроскопической квантовой теории с участием точечных частиц и связанных с ними квантовых полей. Вместо этого он предположил, что все наблюдаемые частицы, участвующие в сильном взаимодействии, вовсе не являются точечными, а представляют собой сложные связанные состояния других частиц. С этой точки зрения редукция к первичным фундаментальным объектам невозможна. Такая дзеновская картина была весьма уместной для Беркли 1960-х гг. Все частицы мыслились в ней состоящими

из других частиц. Это так называемая бутстрапная модель, в которой никакие элементарные частицы не считались первичными или особыми. Поэтому такой подход называли также ядерной демократией.

Этот подход получил поддержку многих физиков, успевших уже разочароваться в квантовой теории поля как инструменте для описания любых взаимодействий, за исключением самых простых взаимодействий между электронами и фотонами. Однако некоторые ученые были так впечатлены успехом квантовой электродинамики, что попытались выстроить аналогичную ей теорию сильного ядерного взаимодействия (такое название за ним закрепилось) по лекалам, предложенным ранее Янгом и Миллсом.

Один из этих физиков, Дж. Сакураи, опубликовал в 1960 г. статью, довольно амбициозно озаглавленную: «Теория сильных взаимодействий». Сакураи всерьез воспринял предложение Янга и Миллса и попытался досконально разобраться, какие из фотоподобных частиц могли бы переносить сильное взаимодействие между протонами, нейтронами и другими новооткрытыми частицами. Поскольку сильное взаимодействие проявляется только на малых расстояниях, не превышающих размеров ядра, представлялось разумным, что частицы, необходимые для переноса этого взаимодействия, должны быть массивными, что несовместимо с какой бы то ни было точной калибровочной симметрией. Но, с другой стороны, они должны были обладать многими свойствами, аналогичными свойствам фотонов, и иметь спин, равный 1, — так называемый векторный спин. Новые предсказанные частицы назвали массивными векторными мезонами. Они должны были связываться с различными токами сильно взаимодействующих частиц, так же как фотоны связываются с токами электрически заряженных частиц.

Частицы с общими свойствами предсказанных Сакураи векторных мезонов были открыты экспериментально уже в следующие два года, и мысль о том, что они могут каким-то образом раскрыть секрет сильного взаимодействия, стояла за попытками с их помощью разобраться в сложных взаимодействиях между нуклонами и другими частицами.

В ответ на предположение о том, что в основе сильного взаимодействия может лежать какая-то разновидность симметрии Янга — Миллса, Мюррей Гелл-Манн разработал изящную схему симметрии, которую в духе дзен назвал восьмеричным путем. Эта схема не только позволяла классифицировать восемь различных векторных мезонов, но и предсказывала существование новых, не наблюдавшихся до той поры частиц, участвующих в сильном взаимодействии. Идея о том, что эти новопредложенные симметрии природы, возможно, помогут привнести порядок в то, что казалось на тот момент безнадежным паноптикумом элементарных частиц, оказалась настолько захватывающей, что, когда предсказанная им частица была-таки открыта, Гелл-Манн получил Нобелевскую премию.

Но Гелл-Манна чаще всего вспоминают в связи с другой, более фундаментальной идеей. Он — и независимо от него Джордж Цвейг — ввел то, что Гелл-Манн назвал *кварками*, заимствовав это слово из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану»; кварки помогли ученым физически объяснить свойства симметрий восьмеричного пути. Если предположить, что именно из кварков, которые Гелл-Манн рассматривал всего лишь как удобный инструмент для математических расчетов (точно так же Фарадей в свое время рассматривал предложенные им электрическое и магнитное поля), состоят все участвующие в сильном взаимодействии частицы, такие как протоны и нейтроны, то удавалось

предсказать все симметрии и свойства известных частиц. И вновь в воздухе, казалось, повисло предчувствие близкого великого объединения, в результате которого разрозненные частицы и силы сольются в одно упорядоченное целое.

Значение гипотезы о кварках невозможно переоценить. Хотя Гелл-Манн и не утверждал, что его кварки представляют собой реальные физические частицы внутри протонов и нейтронов, предложенная им схема систематизации означала, что соображения симметрии, возможно, определяют в конечном итоге природу не только сильного взаимодействия, но и всех фундаментальных частиц в природе.

Однако утверждение о том, что один сорт симметрии, возможно, управляет строением вещества, еще ничего не говорило о том, что эта симметрия может быть расширена до некоторой разновидности калибровочной симметрии Гелл-Манна, определяющей взаимодействия между частицами. Уже надоевшая проблема наблюдаемых масс векторных мезонов означала, что они не могут по-настоящему отражать какую бы то ни было лежащую в основе сильного взаимодействия калибровочную симметрию, так чтобы однозначно определять ее форму и потенциально обеспечивать ей квантово-механический смысл. Любое расширение квантовой электродинамики по Янгу — Миллсу требовало, чтобы новые фотоподобные частицы обладали нулевой массой. И точка.

И как раз в тот момент, когда физики столкнулись с этим непреодолимым на первый взгляд препятствием, прозвучал неожиданный звоночек от сверхпроводимости, открывший другую, более тонкую, но в конечном итоге более глубокую возможность.

Первым, кто разворошил погасшие было угли, стал теоретик, работавший непосредственно в области физики

конденсированных сред, связанной со сверхпроводимостью в различных материалах. Филип Андерсон в Принстонском университете, позже получивший Нобелевскую премию за другие работы, предположил, что одно из наиболее фундаментальных и универсальных явлений в сверхпроводниках стоит рассмотреть в контексте физики элементарных частиц.

Одна из самых впечатляющих демонстраций, которые можно провести со сверхпроводниками, особенно с новыми высокотемпературными сверхпроводниками, в которых сверхпроводимость проявляется при температуре жидкого азота, состоит в том, чтобы заставить магнит висеть в воздухе над сверхпроводником, как показано на рисунке.



Фото Mai-Linh Doan

Это возможно по причине, которую экспериментально открыл в 1933 г. Вальтер Мейснер с коллегами, а объяснили теоретики Фриц и Хайнц Лондон двумя годами позже; причина эта известна как эффект Мейснера.

Как открыли Фарадей и Максвелл за шестьдесят лет до этого, электрические заряды по-разному отзываются

на магнитное и электрическое поля. В частности, Фарадей открыл, что переменное магнитное поле может вызывать электрический ток в удаленном проводнике. Не менее важно, хотя раньше я этого не подчеркивал, что результирующий ток будет течь таким образом, чтобы породить новое магнитное поле в направлении, противоположном меняющемуся внешнему магнитному полю. Таким образом, если внешнее поле ослабевает, то возбужденный ток породит магнитное поле, которое противится этому ослаблению. Если оно усиливается, то возбужденный ток будет течь в противоположном направлении, порождая магнитное поле, которое будет противиться этому росту.

Вы, возможно, замечали, что если во время разговора по сотовому телефону вы заходите в лифт, особенно в такой, где внешняя часть лифтовой шахты обшита металлом, то после закрытия дверей ваш звонок сбрасывается. Это пример действия так называемой клетки Фарадея. Поскольку сигнал принимается телефоном в виде электромагнитной волны, металл прикрывает вас от внешнего сигнала; дело в том, что токи в металле текут так, чтобы по возможности гасить меняющиеся электрическое и магнитное поля сигнала, снижая таким образом его силу внутри лифта.

Если бы у вас был идеальный проводник безо всякого электрического сопротивления, то заряды в металле могли бы, по существу, скомпенсировать любое действие внешнего переменного электромагнитного поля. Внутри лифта не осталось бы никакого сигнала этих переменных полей, то есть никакого телефонного сигнала, который можно было бы принять. Более того, идеальный проводник экранировал бы также действие любого постоянного внешнего электрического поля, поскольку в ответ на любое поле

заряды в сверхпроводнике могут перераспределиться так, чтобы полностью его скомпенсировать.

Но эффект Мейснера этим не ограничивается. В случае сверхпроводника никакие магнитные поля, даже постоянные магнитные поля — такие, каким обладает магнит на картинке, не могут проникать внутрь сверхпроводника. Дело в том, что, если вы медленно подносите магнит издаля ближе, в сверхпроводнике возбуждается ток, компенсирующий меняющееся магнитное поле, которое усиливается с приближением магнита. Но, поскольку речь идет о сверхпроводящем материале, ток в нем продолжит течь и не остановится даже тогда, когда вы перестанете двигать магнит. Затем, если вы поднесете магнит еще ближе, в сверхпроводнике возникнет больший ток, чтобы скомпенсировать усиление поля. И так далее. Таким образом, поскольку электрические токи в сверхпроводнике могут течь без рассеивания, экранируются не только электрические поля, но и магнитные. Вот почему магниты могут левитировать над сверхпроводниками. Токи в сверхпроводнике выталкивают магнитное поле внешнего магнита, и это отталкивает магнит в точности так же, как если бы на поверхности сверхпроводника находился другой магнит, северный полюс которого был бы обращен к северному полюсу внешнего магнита (или южный полюс — к южному).

Братья Лондоны, которые первыми попытались объяснить эффект Мейснера, вывели уравнение, описывающее это явление внутри сверхпроводника. Результат наводил на размышления. Каждому отдельному типу сверхпроводника соответствует характерная величина подповерхностного слоя, определяемая микроскопической природой сверхпроводящих токов, возникающих в материале для компенсации внешних полей, — и любое внешнее магнитное

поле на этой глубине гасится. Эта величина называется лондоновской глубиной проникновения. Для разных сверхпроводников эта глубина зависит от деталей их микрофизики, но как именно зависит, братья определить не смогли, поскольку микроскопической теории сверхпроводимости в то время не было.

Тем не менее само наличие глубины проникновения поразительно, поскольку подразумевает, что электромагнитное поле в сверхпроводнике ведет себя не так, как обычно, — оно больше не является дальнедействующим. Но если электромагнитные поля под поверхностью сверхпроводника становятся близкодействующими, то и носитель электромагнитных взаимодействий должен вести себя необычно. Какой же из этого следует вывод? Фотон в сверхпроводнике ведет себя так, будто он обладает массой.

В сверхпроводниках виртуальные фотоны, как и переносимые ими электрические и магнитные поля, могут распространяться под поверхностью только на расстояние, сравнимое с лондоновской глубиной проникновения, — в точности так, как обстояло бы дело, если бы электромагнетизм внутри сверхпроводника был результатом обмена массивными, а не безмассовыми фотонами.

Теперь представьте, каково было бы жить внутри сверхпроводника. Для вас электромагнетизм был бы силой с малым радиусом действия, фотоны — массивными частицами, а вся знакомая физика, которую мы связываем с электромагнетизмом как дальнедействующей силой, исчезла бы.

Я хочу еще раз подчеркнуть, как необычна и замечательна эта ситуация. Ни один эксперимент, который вы могли бы провести внутри сверхпроводника — при условии,

что он остается в сверхпроводящем состоянии, не показал бы, что во внешнем мире фотоны не имеют массы. Если бы вы были платоновским философом внутри такого сверхпроводника, вам понадобилось бы огромное число догадок об окружающем мире, чтобы прийти к выводу, что некое загадочное и невидимое явление порождает такую иллюзию. Не одна тысяча лет была бы потрачена на размышления и эксперименты, прежде чем вы или ваши потомки смогли бы догадаться о природе реальности, лежащей в основе мира теней, в котором вы живете, или создать устройство, обладающее достаточной энергией для разбиения куперовских пар и выхода из сверхпроводящего состояния; при этом электромагнетизм был бы восстановлен в его нормальном виде и выяснилось бы, что фотон не имеет массы.

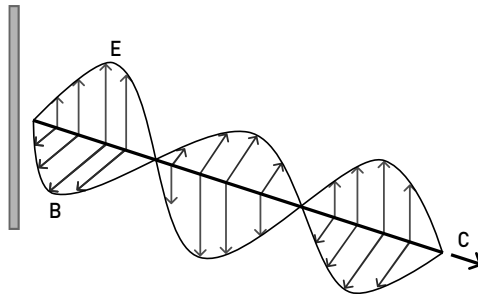
Задним числом можно сказать, что мы, физики, могли бы догадаться (просто из соображений симметрии, без непосредственного рассмотрения эффекта Мейснера), что фотоны внутри сверхпроводника должны бы, в принципе, вести себя как массивные частицы. Конденсат куперовских пар состоит из электронов и потому обладает суммарным электрическим зарядом. Это нарушает калибровочную симметрию электромагнетизма, потому что на этом фоне любые положительные заряды, добавленные к веществу, будут вести себя иначе, чем добавленные отрицательные заряды. Так что теперь существует реальное различие между положительным и отрицательным. Но не забывайте, что отсутствие массы у фотонов — признак того, что электромагнитное поле является дальнедействующим, а дальнедействующая природа электромагнитного поля говорит о том, что локальные вариации в определении электрического заряда в одном месте *не влияют* на физические

законы глобально, во всем объеме вещества. Но если калибровочная инвариантность пропала, то локальные изменения в определении электрического заряда будут иметь реальный физический эффект, и такого дальнедействующего поля, которое могло бы гасить эти изменения, существовать не может. Один из способов избавиться от дальнедействующего поля состоит в том, чтобы сделать фотон массивным.

А теперь вопрос на 64 000 долларов: а не может ли что-то подобное происходить в мире, где мы обретаемся? Может ли причиной наличия масс у тяжелых фотонподобных частиц служить то, что на самом деле мы живем в чем-то похожем на космический сверхпроводник? Именно этот жгучий вопрос поднял Андерсон, по крайней мере в части аналогии с настоящими сверхпроводниками.

Прежде чем ответить на этот вопрос, нам необходимо разобраться в некотором техническом волшебстве, позволяющем наделить массой фотон в сверхпроводнике.

Вспомним, что в электромагнитной волне электрическое (E) и магнитное (B) поля колеблются туда-сюда в направлениях, перпендикулярных направлению движения волны, как показано на рисунке.



Поскольку перпендикулярных направлений два, электромагнитную волну можно изобразить двумя способами. Волна может выглядеть так, как показано на рисунке, а можно поменять поля E и B местами. Это результат того, что электромагнитные волны имеют две степени свободы, которые называют двумя разными поляризациями.

Это объясняется калибровочной инвариантностью электромагнетизма или, что то же самое, отсутствием у фотона массы. Однако если бы у фотонов была масса, то результатом стало бы не только нарушение калибровочной инвариантности, но и возникновение третьего варианта. Электрическое и магнитное поля могли бы колебаться вдоль направления движения, вместо того чтобы придерживаться только перпендикулярных к нему направлений. (Поскольку фотоны уже не двигались бы со скоростью света, стали бы возможны колебания вдоль направления движения частиц.)

Но это означает, что соответствующие массивные фотоны должны иметь не две, а три степени свободы. Как же могут фотоны в сверхпроводниках обрести эту лишнюю степень свободы?

Андерсон исследовал этот вопрос в сверхпроводниках, и его решение тесно связано с фактом, о котором я уже говорил. Если бы в сверхпроводнике не было электромагнитных взаимодействий, в конденсате куперовских пар можно было бы производить небольшие пространственные изменения с энергозатратами сколь угодно малой величины, потому что куперовские пары не взаимодействовали бы друг с другом. Однако, если принять во внимание электромагнетизм, эти низкоэнергетические моды (которые уничтожили бы сверхпроводимость) исчезают, и как раз потому, что заряды в конденсате взаимодействуют с электромагнитным полем. Это взаимодействие

заставляет фотоны в сверхпроводнике вести себя так, как если бы они обладали массой. Новый режим поляризации массивных фотонов в сверхпроводнике возникает, когда конденсат колеблется в ответ на проходящую электромагнитную волну.

На языке физики элементарных частиц безмассовые моды Намбу — Голдстоуна, соответствующие корпускулярному варианту исчезающе малых в ином случае энергетических колебаний в конденсате, «съедаются» электромагнитным полем, что придает фотонам массу и новую степень свободы и делает электромагнитное взаимодействие в сверхпроводнике близкодействующим.

Андерсон предположил, что это явление — при котором безмассовый в ином случае фотон исчезает в сверхпроводниках, и безмассовая в ином случае мода Намбу — Голдстоуна тоже исчезает, и обе они вместе соединяются и порождают массивный фотон — может оказаться важным для решения давней задачи создания массивных фотоподобных частиц Янга — Милса, которые, возможно, связаны с сильными ядерными взаимодействиями.

Андерсон на этом остановился, оставив в подвешенном состоянии предположение о том, что этот механизм, придуманный по аналогии со сверхпроводниками, может быть применим и в теории элементарных частиц. Так же как и Намбу в свое время остановился на рассмотрении спонтанного нарушения симметрии в физике элементарных частиц по аналогии со сверхпроводимостью, но не исследовал связанное со сверхпроводимостью явление, на котором позже сосредоточился Андерсон, — эффект Мейснера, придающий массу фотонам в сверхпроводниках. Явное приложение всех этих идей к физике элементарных частиц было еще впереди.

В результате физическое сообщество не сумело сразу же распознать возможные глубокие следствия из теории сверхпроводимости для понимания физики фундаментальных частиц, и они какое-то время еще оставались в тени.

Пока мысль о том, что мы, возможно, живем в каком-то космическом сверхпроводнике, не внушала доверия. В конце концов, человек любит выдумывать дичайшие истории для объяснения непонятого, любит изобретать фантастические и скрытые причины всего вроде богов и демонов. Было ли более правдоподобным заявление о существовании во всем пространстве какого-то невидимого конденсата полей, призванного объяснить природу того, что иначе представлялось непонятым в сильном ядерном взаимодействии?

НОСИМАЯ ТЯЖЕСТЬ БЫТИЯ: СИММЕТРИЯ НАРУШЕНА, ФИЗИКА ОТРЕМОНТИРОВАНА

...соберите оставшиеся куски, чтобы ничего
не пропало.

Иоанн 6:12

В природе есть замечательная поэзия, как часто бывает и в человеческих драмах. А в любимых мной эпических поэмах древней Греции, созданных в те же времена, когда Платон писал про свою пещеру, часто встречается такой сюжет: открытие прекрасного сокровища, сокрытого ранее от взглядов людей, небольшой удачливой группой необычных путешественников, которых это открытие меняет навсегда.

Ах, как же мне повезло! Именно это побудило меня изучать физику, ведь возможность впервые открыть какой-то новый чудесный уголок природы очень романтична и обладает невероятной притягательной силой. Вся наша история состоит из таких моментов, когда поэзия природы сливается с поэзией человеческого существования.

Почти каждый эпизод из тех, о которых мне хочется рассказать, полон поэзии, но, чтобы увидеть ее, необходима верная перспектива. Сегодня, во втором десятилетии XXI века, мы могли бы с легкостью прийти к единому мнению о том, которая из великих теорий XX века самая красивая. Но, чтобы оценить подлинную драму научного развития, нужно понимать: во время своего создания красивые теории зачастую не выглядят такими привлекательными, как годы спустя, — примерно как хорошее вино или прошлая любовь.

Так получилось, что идеи Янга и Миллса, а также Швингера и остальных, основанные на математической поэзии калибровочной симметрии, не смогли в свое время вдохновить ученых или конкурировать с представлением о том, что квантовая теория поля и ее наиболее красивый живой пример — квантовая электродинамика — не является продуктивным подходом к описанию других взаимодействий в природе — слабого и сильного ядерных взаимодействий. По мнению многих, к подобным силам, действующим на малых расстояниях, соответствующих масштабу атомного ядра, должны были применяться новые правила, а старые методы были здесь неуместны.

Также и последующие попытки Намбу и Андерсона применить в субатомном царстве идеи физики материалов, известной также как многочастичная физика и физика конденсированных сред, были отброшены многими специалистами по физике элементарных частиц, которые глубоко сомневались в том, что это новое направление способно принести в «фундаментальную» физику какие бы то ни было новые озарения. Скепсис физического сообщества очаровательно выразил теоретик Виктор Вайскопф; говорят, он сказал на семинаре в Корнеллском университете:

«Специалисты по физике элементарных частиц сегодня в таком отчаянии, что вынуждены заимствовать новые идеи из физики твердого тела... Может, что-нибудь из этого и получится».

Следует признать, что для такого скепсиса были некоторые основания. В конце концов, Намбу в свое время утверждал, что спонтанное нарушение симметрии, возможно, объяснит большие и очень близкие массы протонов и нейтронов, и надеялся, что это произойдет в процессе поисков объяснения того факта, что пион намного легче этих частиц. Но идеи, которые он при этом позаимствовал, целиком опирались на представление о том, что визитной карточкой спонтанного нарушения симметрии является существование частиц с *нулевой* массой, а не очень малой.

Работа Андерсона, конечно, тоже представляла интерес. Но, поскольку написана она была в контексте нерелятивистского конденсированного вещества, а заодно допускала нарушение теоремы Голдстоуна из физики элементарных частиц, согласно которой нарушение симметрии и частицы с нулевой массой неразделимы, его утверждение о том, что состояния с нулевой массой исчезают в его примере (в электромагнетизме в сверхпроводниках), было также по большей части проигнорировано коллегами.

Однако Джулиан Швингер не отказался от идеи о том, что калибровочная теория Янга — Миллса способна объяснить ядерные взаимодействия, и продолжал утверждать, что янг-миллсовские разновидности фотонов могут быть массивными; правда, он не мог продемонстрировать, как такое может быть.

Работа Швингера привлекла внимание Питера Хиггса, молодого британского физика с мягкими манерами, преподававшего тогда математическую физику в Эдинбургском

университете. Никто бы не заподозрил в этом кротком молодом человеке революционера. Однако он все же был революционером, хотя и невольным, едва не упустившим свой шанс из-за близорукости редакторов одного из журналов.

В 1960 г. Хиггс только что получил место в университете и был приглашен поработать в комитете, который занимался организацией первой Летней школы шотландских университетов по физике. Проект вылился в достойную школу, посвященную разным областям физики. Приблизительно раз в четыре года в течение трех недель лучшие аспиранты и молодые доктора слушают лекции ведущих ученых по физике элементарных частиц, которые перемежаются трапезами, сдобренными хорошим вином, а под вечер и добрым виски. В том году среди студентов находились будущие нобелиаты Шелдон Глэшоу и Мартинус Вельтман, а еще Никола Кабиббо, который, по моему мнению, тоже должен был получить премию. Судя по всему, Хиггс, которому поручили роль виночерпия, заметил, что эти трое студентов никогда не появляются на утренних лекциях. Похоже, они проводили вечера за обсуждением физики и вином, потихоньку вынесенным с обеда или ужина. Тогда у Хиггса не было возможности присоединиться к этим дискуссиям, и потому он не узнал от Глэшоу о его новом предложении по объединению электромагнитного и слабого взаимодействий, статью о котором тот уже представил к публикации.

В шотландских летних школах есть собственная поэзия. Год за годом они перемещаются по стране и периодически возвращаются в красивый прибрежный город Сент-Эндрюс рядом со знаменитым Олд-Корсом — местом, где родился гольф. В 1980 г. в Сент-Эндрюсе Глэшоу, недавно удостоенный Нобелевской премии, и Герард 'т Хоофт, знаменитый

бывший студент Вельтмана, читали в этой школе лекции, и в бытность аспирантом мне повезло посетить их.

Я тогда приехал поздно, получил самую маленькую комнату, практически на чердаке, с видом на Олд-Корс и наслаждался не только физикой, но и алкоголем; кроме того, на площадке для мини-гольфа под названием «Гималаи» по соседству я с пользой для дела угощал дармовой выпивкой одного из лекторов — физика Грэма Росса из Оксфорда. 'т Хоофт был не только физиком почти невероятных способностей, но и прекрасным художником. В 1980 г. он выиграл конкурс Летней школы по дизайну футболок, и у меня до сих пор хранится подписанная им футболка. Не могу с ней расстаться, хотя аукцион на eBay и манит. (Через двадцать лет после той программы, в 2000 г., я вернулся в Летнюю школу уже преподавателем. В отличие от Глэшоу, 'т Хоофта, Вельтмана и Хиггса вернулся без Нобелевской премии; все же я получил наконец право носить килт. Еще одна галочка в списке того, что надо успеть в жизни.)

После работы в Летней школе в 1960 г. Хиггс начал изучать литературу по симметрии и ее нарушениям и разбирать статьи Намбу, Голдстоуна, Салама, Вайнберга и Андерсона. Задача примирения теоремы Голдстоуна с возможностью существования массивных векторных частиц Янга — Миллса, которые могли бы переносить сильное взаимодействие, показалась ему безнадежно сложной. Затем, в 1964 г., том самом волшебном году, когда Гелл-Манн ввел понятие кварков, Хиггс прочел две статьи, которые дали ему надежду.

Первой из них была статья Абрахама Клейна и Бена Ли; последний до своей гибели в автокатастрофе по дороге на физический семинар был одной из самых ярких восходящих звезд в мировой физике элементарных частиц. Авторы

предложили способ обойти теорему Голдстоуна и избавиться от безмассовых частиц в квантовых теориях поля, которых в реальности не наблюдалось.

Затем молодой физик из Гарварда Уолтер Гилберт, вскоре после этого решивший сменить царивший в физике элементарных частиц хаос на зеленые пастбища молекулярной биологии, — где в конечном итоге он тоже заработал Нобелевскую премию, но уже за участие в разработке технологии секвенирования ДНК, — написал статью, в которой показал, что предложенное Клейном и Ли решение порождает конфликт с теорией относительности и потому вызывает большие сомнения.

Как мы уже видели, калибровочные теории имеют интересное свойство: вы можете произвольно менять определение положительного и отрицательного заряда в каждой точке пространства, не меняя при этом никаких наблюдаемых физических свойств системы, если только позволите электромагнитному полю поддерживать необходимые взаимодействия и меняться так, чтобы надлежащим образом компенсировать эти локальные вариации. В результате вы можете проводить математические вычисления в любой калибровке, то есть с использованием любых конкретных локальных определений зарядов и полей, совместимых с симметрией. Любое симметричное преобразование будет переводить вас из одной калибровки в другую.

Несмотря на то что теория, возможно, будет выглядеть в этих разных калибровках очень по-разному, симметричность теории гарантирует, что расчеты любой физически измеримой величины не зависят от выбора калибровки, то есть видимые различия иллюзорны и не отражают лежащей в основе физики, которая определяет измеряемые величины всех физически наблюдаемых параметров. Поэтому

можно выбирать, в какой калибровке вычисления окажутся проще, с уверенностью, что при расчетах в любой другой калибровке предсказания для физически наблюдаемых величин получатся те же.

Познакомившись со статьями Швингера, Хиггс понял, что при некоторых выбранных калибровках может возникнуть тот же самый конфликт, на который указывал Гилберт в отношении гипотезы Клейна и Ли. Но этот видимый конфликт возникал лишь вследствие выбора калибровки, в других же калибровках он исчезал. А значит, он не отражал никакого реального конфликта с теорией относительности там, где речь шла о проверяемых физических предсказаниях. Может быть, в какой-нибудь калибровочной теории сделанное Клейном и Ли предложение по избавлению от частиц с нулевой массой, связанных со спонтанным нарушением симметрии, все же работает.

Хиггс заключил, что спонтанное нарушение симметрии в условиях квантовой теории поля, предусматривающей калибровочную симметрию, возможно в обход теоремы Голдстоуна с приданием массы векторным бозонам, переносящим сильное взаимодействие без всяких лишних безмассовых частиц. Это соответствовало соображениям Андерсона по электромагнетизму в сверхпроводниках в нерелятивистском случае. Иными словами, вполне возможно, что сильное взаимодействие имеет короткий радиус действия из-за спонтанного нарушения симметрии.

Хиггс потратил пару выходных, чтобы построить модель, в которой электромагнетизм добавлялся к модели, которой пользовался Голдстоун при исследовании спонтанного нарушения симметрии. Хиггс обнаружил ровно то, что ожидал: безмассовая в ином случае мода, которую предсказывала теорема Голдстоуна, стала вместо этого

дополнительной поляризационной степенью свободы фотона, который теперь обладал массой. Иными словами, нерелятивистские рассуждения Андерсона о сверхпроводниках действительно приводили к релятивистским квантовым полям. *Вселенная, в конечном итоге, могла вести себя как сверхпроводник.*

Когда Хиггс расписал свои выводы и представил статью в европейский журнал *Physics Letters*, в ответ он весьма оперативно получил отказ. Рецензент просто не считал, что содержание статьи имеет отношение к физике элементарных частиц. Поэтому Хиггс добавил несколько абзацев с замечаниями о возможных наблюдаемых следствиях из своей идеи и представил статью в американский журнал *Physical Review Letters*. В частности, он добавил фразу: «Стоит отметить, что важной особенностью теории данного типа является предсказание неполных мультиплетов скалярных и векторных бозонов».

На нормальном языке это означает: Хиггс продемонстрировал, что, хотя в его модели *можно* отказаться от безмассовой скалярной частицы (иначе говоря, бозона Голдстоуна) в пользу массивной векторной частицы (массивного фотона), там все равно будет существовать лишняя массивная скалярная (то есть с нулевым спином) частица-бозон, связанная с полем, конденсат которого, собственно, и нарушает симметрию. Так родился бозон Хиггса.

Physical Review Letters незамедлительно принял статью, но рецензент попросил Хиггса просмотреть работу Франсуа Энглера и Роберта Браута, полученную редакцией примерно за месяц до его статьи, и высказать свое мнение о том, как одна статья соотносится с другой. К удивлению Хиггса, оказалось, что авторы статьи независимо от него пришли приблизительно к тем же результатам. О сходстве

между статьями можно судить хотя бы по их названиям. Статья Хиггса называлась «Нарушение симметрий и массы калибровочных бозонов». Работа Энглера и Браута была озаглавлена «Нарушение симметрии и масса калибровочных векторных мезонов». Трудно представить себе более точное совпадение заголовков без прямого согласования.

Будто вдогонку этой замечательной случайности двадцать лет спустя Хиггс встретился с Намбу на какой-то конференции и узнал, что именно Намбу рецензировал обе статьи. Что может быть уместнее — человек, первым применивший нарушение симметрии и сверхпроводимость в физике элементарных частиц, рецензирует работы тех, кто хотел бы продемонстрировать, насколько дальновидна его идея. И, подобно Намбу, все авторы этих статей были сосредоточены на сильном взаимодействии и на возможности разобраться наконец, как протоны, нейтроны и мезоны могут обладать большими массами.

Дополнительно подтверждая, что время для этого открытия назрело, примерно через месяц еще одна группа ученых — Герард Гуральник, Ричард Хаген и Том Киббл — опубликовала статью, содержащую многие из этих идей.

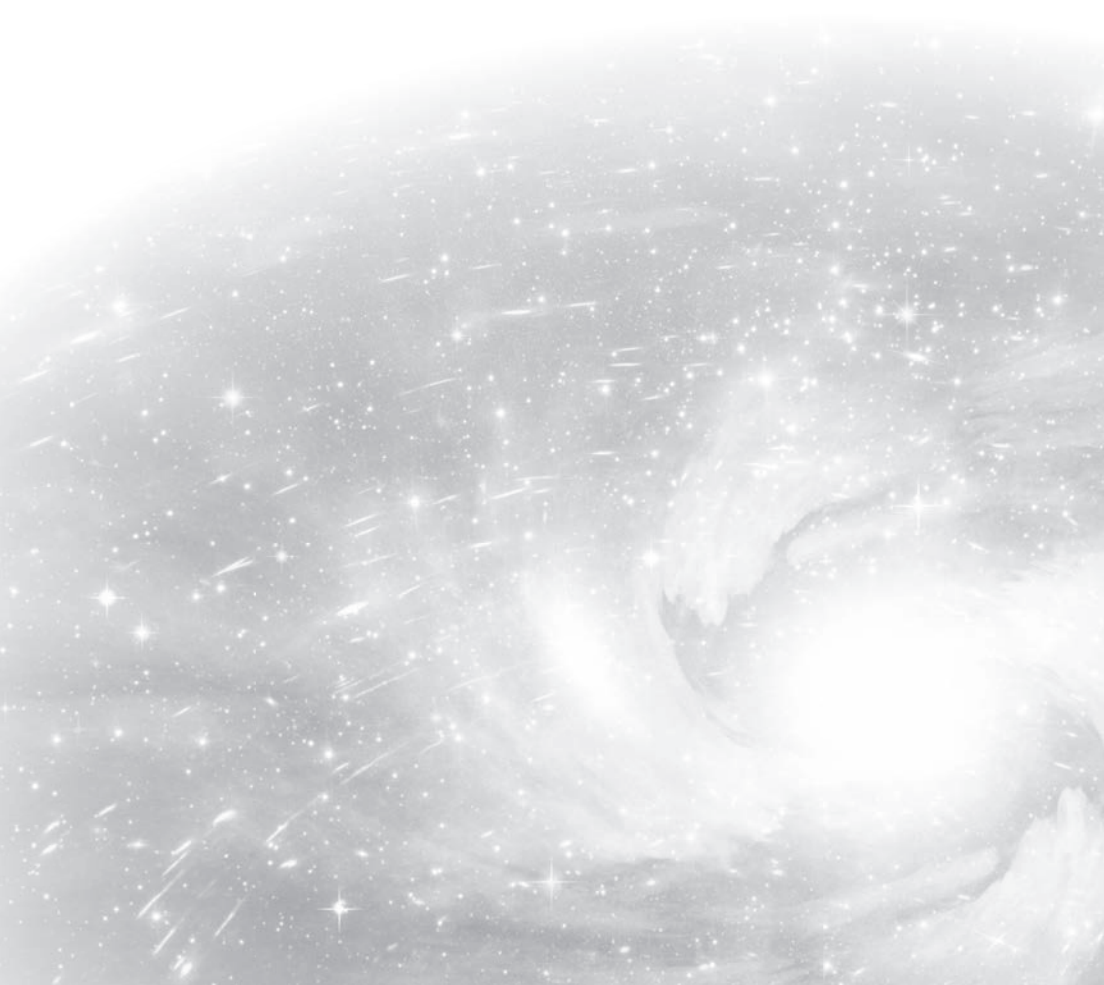
Вам, может быть, непонятно, почему мы называем известную частицу бозоном Хиггса, а не бозоном Хиггса — Браута — Энглера — Гуральника — Хагена — Киббла. Помимо очевидного ответа, что такое название трудно произнести, не сломав язык, можно отметить, что единственной из всех статей, где явно предсказывалось существование сопутствующего массивного скалярного бозона в массивных калибровочных теориях со спонтанным нарушением симметрии, была статья Хиггса. И что самое забавное, Хиггс включил в нее это дополнительное замечание только потому, что первоначальная версия статьи,

не содержащая такого замечания, была отвергнута редакцией!

Наконец завершающий поэтический штрих. Через пару лет после публикации первой статьи Хиггс написал более длинную работу, и его пригласили (в 1966 г.) выступить в нескольких местах в США, где он проводил академический отпуск. После выступления Хиггса в Гарварде, где на тот момент профессорствовал Шелдон Глэшоу, последний, говорят, похвалил Хиггса за придуманную им «прекрасную модель» и перешел к следующему вопросу. Он был настолько сосредоточен на сильном взаимодействии, что даже не понял, что гипотеза Хиггса может стать ключом к разрешению тех проблем теории слабого взаимодействия, о которых он сам говорил пятью годами ранее.

Часть третья

ОТКРОВЕНИЕ



ЧУЖОЕ МЕСТО В НУЖНОЕ ВРЕМЯ

Не обманывайтесь: худые сообщества развращают
добрые нравы.

1 Коринф. 15:33

Все шесть авторов статей, описывающих так называемый механизм Хиггса (хотя после недавней Нобелевской премии, которую Хиггс разделил с Энглером, некоторые называют его БЭХ-механизмом в честь Браута, Энглера и Хиггса), предполагали и надеялись, что их труд поможет физикам понять сильное взаимодействие в ядрах атомов. В их статьях любое обсуждение возможной экспериментальной проверки гипотезы относилось к сильному взаимодействию, и в частности к предположению Сакураи о том, что это взаимодействие переносят тяжелые векторные мезоны. Все они надеялись, что вот-вот появится теория сильного взаимодействия, которая объяснит массы ядер и близкодействующие ядерные силы.

Мне представляется, что, помимо общей для тогдашней ядерной физики увлеченности сильным ядерным взаимодействием, физики пытались применить свои идеи

к этой теории еще и по другой причине. С учетом радиуса и силы этого взаимодействия получалось, что массы новых янг-миллсовских частиц, необходимых для переноса сильного взаимодействия, должны быть сравнимы с массами самих протонов и нейтронов, а также других новых частиц, которые то и дело открывали на ускорителях. Поскольку экспериментальное подтверждение — высшая честь, которой может удостоиться теоретик, естественно было сосредоточиться на физике достижимых энергетических масштабов, где новые идеи — и новые частицы — можно было быстро проверить и исследовать на существующих установках и относительно быстро добиться славы, если не денег. Напротив, как ранее показал Швингер, любая теория про новые частицы, связанные со слабым взаимодействием, потребовала бы для них масс, на несколько порядков превосходящих доступные в то время в ускорителях. Очевидно, разрешения этой проблемы следовало ждать позже — по крайней мере, так считало большинство физиков.

Одним из ученых, увлеченных физикой сильного взаимодействия, был молодой теоретик Стивен Вайнберг. И в этом тоже есть поэзия. Вайнберг вырос в Нью-Йорке и учился в естественно-научной средней школе Бронкса, которую и окончил в 1950 г. Его одноклассником был Шелдон Глэшоу, и после окончания они вдвоем отправились в Корнеллский университет, где в течение первого семестра делили комнату в общежитии, пока их дороги не разошлись. Когда Глэшоу уехал в магистратуру в Гарвард, Вайнберг отправился в Копенгаген, где Глэшоу будет работать позже, уже после получения докторской степени, свою же диссертацию Вайнберг защитит в Принстоне. Оба они в начале 1960-х гг. были на факультете в Беркли и уехали оттуда в одном и том же 1966 г. в Гарвард; там Глэшоу занял пост

профессора, а Вайнберг — временную позицию на период отпуска в Беркли. Затем, в 1967 г., Вайнберг перебрался в Массачусетский технологический институт, но в 1973 г. вернулся в Гарвард и принял кафедру и кабинет, которые к тому моменту освободил Джулиан Швингер, бывший научный руководитель Глэшоу. (Заняв кабинет, Вайнберг нашел в шкафу пару туфель, оставленных Швингером, — откровенный вызов молодому ученому и предложение стать ему достойным преемником*. И Вайнбергу это удалось.) Когда Вайнберг в 1982 г. покинул Гарвард, кафедра и кабинет перешли к Глэшоу, но никаких туфель в шкафу после Вайнберга не осталось.

Жизни этих исследователей переплелись, возможно теснее, чем у какой бы то ни было другой пары ученых нового времени; тем не менее они образуют интересный контраст. У Глэшоу блестящие способности сочетаются с почти детским энтузиазмом по отношению к науке. Его сильные стороны — творческое начало и глубокое понимание экспериментального ландшафта, но в меньшей мере способность к точным и подробным расчетам. Вайнберга, напротив, можно, наверное, назвать самым серьезным и педантичным (в вопросах физики) среди всех физиков, кого мне довелось знать. Обладая чудесным ироничным чувством юмора, он никогда не подходит ни к одному к физическому проекту легкомысленно, без намерения овладеть соответствующей областью физики. Его учебники по физике — настоящие шедевры, а популярные книги доходчивы и полны мудрости. Любитель и знаток древней истории, Вайнберг умеет донести до читателя историческую

* Намек на английскую идиому *to be in my shoes*, означающую «быть в моей шкуре», «быть на моем месте». — *Прим. ред.*

перспективу не только того, что он делает, но и физических исследований в целом.

Подход Вайнберга к физике напоминает неуклонное движение парового катка. Во время моего пребывания в Гарварде мы, новоиспеченные доктора, называли его Большим Стивом. Когда он работал над задачей, лучшее, что вы могли сделать, — это убраться с его пути; в противном случае вам угрожала опасность быть раздавленным громадной мощью его интеллекта и энергии. Пока я не перебрался в Гарвард и был еще в Массачусетском технологическом, мой тогдашний приятель Лоуренс Холл учился в Гарварде. Он опережал меня в своей работе и выпустился из университета раньше. Так вот, он сказал мне, что сумел завершить свою работу, позволявшую получить зачет у Вайнберга, только потому, что Вайнберг совсем недавно (в 1979 г.) получил Нобелевскую премию и последовавшая за этим суматоха вынудила его несколько притормозить, так что Лоуренс успел закончить расчеты, не позволив Вайнбергу его обойти.

Одной из величайших удач в моей жизни была возможность тесно работать с Глэшоу и Вайнбергом в первые, самые важные для формирования ученого годы. После того как Глэшоу помог мне, вытащив из черной дыры математической физики, мы с ним сотрудничали в Гарварде и много лет после. Вайнберг научил меня многому из того, что я знаю о теории элементарных частиц. В МТИ не обязательно посещать занятия, достаточно сдавать экзамены, поэтому я, готовясь там к защите докторской степени, прослушал только один или два курса по физике. Но одним из преимуществ пребывания в МТИ было то, что я мог параллельно посещать занятия в Гарварде. Я записывался на все курсы, которые читал Вайнберг, — а если не записывался, то посещал просто так — начиная с квантовой

теории поля и далее. Глэшоу и Вайнберг стали для меня взаимно дополняющими друг друга ролевыми моделями. Я всеми силами старался подражать им — в чем-то одному, в чем-то другому — и при этом признавал, что в сравнении с ними мои «все силы», как правило, выглядели не слишком выигрышно.

Вайнберг испытывал — и испытывает до сих пор — широкий и непреходящий интерес ко всем подробностям квантовой теории поля. Подобно многим другим в начале 1960-х гг., он пытался сосредоточиться на том, как понять природу сильного взаимодействия на базе идеи симметрии, которая, в значительной степени благодаря работе Гелл-Манна, полностью доминировала тогда в этой области физики.

Вайнберг также размышлял о возможном применении идей нарушения симметрии к пониманию масс ядер, как предлагал Намбу; подобно Хиггсу, Вайнберг был сильно разочарован результатами Голдстоуна, согласно которым подобную физику всегда должны сопровождать безмассовые частицы. Поэтому Вайнберг решил, — как он делал почти всегда, когда по-настоящему интересовался какой-то физической идеей, — что должен доказать это самому себе. Так что в его следующей работе, написанной в соавторстве с Голдстоуном и Саламом, приводилось несколько независимых доказательств этой теоремы в контексте сильно взаимодействующих частиц и полей. Вайнберг был настолько подавлен невозможностью объяснить сильное взаимодействие через спонтанное нарушение симметрии, что поставил эпиграфом к статье ответ Лира Корделии: «Из ничего не выйдет ничего. Так объяснись». (Из моей книги «Вселенная из ничего» можно понять, почему я не слишком люблю эту цитату. Квантовая механика размывает грань между чем-то и ничем.)

Впоследствии Вайнберг узнал о выводах Хиггса (и коллег) о том, что можно избавиться от нежелательных безмассовых бозонов Голдстоуна, возникающих при нарушении симметрии, когда она является калибровочной. В этом подходе безмассовые бозоны Голдстоуна исчезают, а безмассовые в ином случае калибровочные бозоны становятся массивными. Однако на Вайнберга эти рассуждения особого впечатления не произвели — он, как и многие другие физики, рассматривал их всего лишь как интересную формальность.

Более того, в начале 1960-х гг. идея о том, что пион напоминает во многих отношениях бозон Голдстоуна, оказалась полезна при выводе некоторых приближенных формул для скорости протекания определенных реакций, вызываемых сильным взаимодействием. В результате мысль об избавлении от бозонов Голдстоуна в сильном взаимодействии отчасти потеряла привлекательность. Вайнберг потратил тогда несколько лет на исследование этих идей. Он построил теорию, по которой некоторые симметрии, связанные, как считалось, с сильным взаимодействием, могут спонтанно нарушаться, а различные участвующие в сильном взаимодействии векторные калибровочные частицы, переносящие сильное взаимодействие, могут обретать массу через механизм Хиггса. Проблема была в том, что он не мог примирить свои рассуждения с результатами наблюдений без ущерба для первоначальной калибровочной симметрии, которая защищала его теорию. Единственный способ избежать этого и сохранить первоначальную калибровочную симметрию, которая была ему необходима, состоял в том, чтобы некоторые векторные частицы были массивными, а остальные остались безмассовыми. Но это противоречило данным эксперимента.

Затем, в один прекрасный день 1967 г., по дороге в МТИ его вдруг озарило, буквально и метафорически. (Мне пришлось ездить со Стивом по Бостону, и, хотя я выжил и могу рассказать об этом, я понимаю, что когда он размышляет о физике, то в принципе перестает воспринимать большие массы, такие как соседние автомобили например.) Вайнберг внезапно понял, что, может быть, он *и все остальные* применяют верные идеи о спонтанном нарушении симметрии, но не к той задаче! В природе могло существовать два различных векторных бозона — один массивный, а другой с нулевой массой. Векторный бозон с нулевой массой может быть фотоном, а массивный (или массивные) — играть роль того самого массивного переносчика слабого взаимодействия, о котором десятью годами раньше рассуждал Швингер.

Если бы дело обстояло так, то слабое и электромагнитное взаимодействия можно было бы описывать объединенным набором калибровочных теорий, из которых одна соответствовала бы электромагнитному взаимодействию (с нарушенной симметрией), а вторая — слабому взаимодействию с нарушенной калибровочной симметрией, отчего у данного взаимодействия появляется несколько массивных переносчиков.

И в этом случае мир, в котором мы живем, был бы *в точности* похож на сверхпроводник.

Слабое взаимодействие является слабым из-за простой случайности: базовое состояние полей в нашей нынешней Вселенной нарушает калибровочную симметрию, которая в ином случае управляла бы симметрией слабого взаимодействия. Фотоноподобные калибровочные частицы получают большие массы, и, как и ожидал Швингер, слабое взаимодействие оказывается настолько близкодействующим,

что почти сходит на нет уже на расстояниях порядка размеров протонов и нейтронов. Это объясняет также, почему нейтронный распад происходит так медленно.

Массивные частицы, передающие слабое взаимодействие, должны выглядеть для нас в точности как выглядели бы фотоны для гипотетических физиков, живущих внутри сверхпроводника. Потому и различие между электромагнетизмом и слабым взаимодействием столь же иллюзорно, как и та разница, которую физики на ледяном кристалле морозного узора на оконном стекле заметили бы между силами, действующими вдоль ребра своего кристалла и поперек него. И только простой случайностью объясняется тот факт, что одна калибровочная симметрия нарушается в мире нашего опыта, а другая — нет.

Вайнберг хотел избежать рассуждений о частицах, участвующих в сильном взаимодействии, поскольку ситуация там по-прежнему была запутанной. Поэтому он решил заняться частицами, взаимодействующими только посредством слабого или электромагнитного взаимодействия, а именно электронами и нейтрино. Поскольку слабое взаимодействие превращает электроны в нейтрино, ему нужно было придумать такой набор заряженных векторных фотоноподобных частиц, который производил бы такую трансформацию. Эти частицы не что иное, как заряженные векторные бозоны, существование которых предположил Швингер; традиционно их называют W^+ - и W^- -бозонами.

Поскольку слабое взаимодействие смешивает друг с другом только левые электроны и нейтрино, один из типов калибровочной симметрии должен обуславливать взаимодействие с W -частицами только левых частиц. Но поскольку и левые, и правые электроны взаимодействуют с фотонами, калибровочная симметрия электромагнетизма

тоже должна быть включена в эту единую модель таким образом, чтобы левые электроны могли взаимодействовать и с фотонами, и с новыми заряженными W -бозонами, а правые электроны взаимодействовали бы только с фотонами, но не с W -частицами.

Математически единственным способом добиться этого — как выяснил Шелдон Глэшоу, размышляя об электрослабом объединении шестью годами ранее, — могло бы быть существование дополнительного *нейтрального* слабого бозона, с которым правые и левые электроны могли взаимодействовать, помимо взаимодействия с фотонами. Этот новый бозон Вайнберг назвал Z , от слова *zero*, нуль.

Далее, в природе должно существовать некое новое поле, которое образует конденсат в пустом пространстве, вызывающий спонтанное нарушение симметрий, управляющих слабым взаимодействием. Элементарная частица, связанная с этим полем, представляет собой массивный бозон Хиггса, тогда как остальные гипотетические бозоны Голдстоуна должны быть проглочены W - и Z -бозонами, чтобы придать им массу посредством предложенного Хиггсом механизма. При этом единственным калибровочным бозоном с нулевой массой остается фотон.

Но этого мало. В силу введенной им калибровочной симметрии новая хиггсовская частица у Вайнберга взаимодействует также с электронами, а когда образуется конденсат, появляются массы у электронов, а также W - и Z -частиц. Таким образом, эта модель не только объясняет массы калибровочных частиц, передающих слабое взаимодействие, и, следовательно, определяет силу этого взаимодействия, но вдобавок *то же самое* хиггсовское поле еще и придает массу электронам!

В этой модели присутствовали все ингредиенты, необходимые для объединения слабого и электромагнитного взаимодействий. Более того, если начать с калибровочной теории Янга — Миллса с безмассовыми калибровочными бозонами до нарушения симметрии, то можно было надеяться, что те же замечательные свойства калибровочных теорий, связанные с симметрией и впервые исследованные в квантовой электродинамике, позволят получить при помощи этой теории конечные разумные результаты. В то время как фундаментальная теория с массивными фотоподобными частицами обладала явными неустранимыми недостатками, была надежда на то, что, если массы возникают только после и в результате нарушения симметрии, эти недостатки, возможно, и не проявятся. Но в то время это была всего лишь надежда.

Ясно, что в реалистичной модели хиггсовская частица должна связываться и с другими частицами, задействованными в слабом взаимодействии, а не только с электроном. При отсутствии хиггсовского конденсата все эти частицы: протоны (или те частицы, из которых они состоят), мюоны и т. д. — все они обладали бы в точности нулевой массой. *Каждая деталь, отвечающая за наше существование*, — мало того, за самое существование массивных частиц, из которых все мы состоим, — должна, таким образом, возникнуть в результате природной случайности — образования в нашей Вселенной особого хиггсовского конденсата. Конкретные черты, делающие наш мир тем, что он есть, — все эти галактики, звезды, планеты, люди и взаимодействия между ними — выглядели бы совершенно по-другому, если бы такой конденсат не сформировался.

Или если бы он сформировался иначе.

Точно так же как мир, который видят вокруг себя ранним зимним утром воображаемые физики на ледяном кристалле разрисованного морозом окна, был бы совершенно иным, если бы кристалл выстроился в другом направлении, так и черты нашего мира, допускающие наше существование, критически зависят от природы хиггсовского конденсата. То, что в свойствах частиц и полей, образующих наш мир, возможно, представляется нам чем-то специфическим, на деле оказывается не более особенным, спланированным или значительным, чем случайная ориентация гребня этого ледяного кристалла, хотя существам, живущим на этом кристалле, она тоже может казаться неслучайной.

И еще немного поэзии. Уникальная модель Янга — Миллса, которая привлекла Вайнберга в 1967 г. и на которую годом позже наткнулся также Абдус Салам, была той самой моделью, которую предложил шестью годами ранее его старый университетский друг Шелдон Глэшоу, откликнувшийся на призыв Швингера найти симметрию, которая помогла бы объединить слабое и электромагнитное взаимодействия. Никакой другой вариант не мог бы математически воспроизвести то, что мы сегодня наблюдаем в мире. Все это время модель Глэшоу практически игнорировалась, поскольку тогда не было известно никакого механизма, способного придать слабым бозонам массы. Но теперь такой механизм появился, и это был механизм Хиггса.

Вайнберг и Глэшоу, жизни которых не раз пересекались начиная с детского возраста, позже разделили Нобелевскую премию между собой и с Саламом за *совершенно независимое* открытие величайшего объединения в теории физики со времен Максвелла, объединившего электричество и магнетизм, и Эйнштейна, объединившего пространство и время.

ТУМАН РАСХОДИТСЯ

Нет языка, и нет наречия, где не слышался бы
голос их.

Псалмы 18:4

Вы, наверное, думаете, что после выхода статьи Вайнберга физики всего мира устроили праздники с фейерверками. На самом же деле за следующие три года после публикации теории Вайнберга ни один физик, включая и самого Стивена, не нашел повода сослаться на эту статью — на сегодняшний день одну из самых цитируемых работ в физике элементарных частиц. Если в исследовании природы и было сделано великое открытие, то этого никто тогда еще не заметил.

В конце концов, максвелловское объединение электричества и магнетизма позволило сделать чудесное предсказание о том, что свет — это электромагнитная волна, скорость которой можно вычислить из первичных принципов, и — кто бы мог подумать! — измеренная скорость света оказалась равна предсказанной. Эйнштейновское объединение пространства и времени позволило предсказать замедление часов для движущихся наблюдателей, и — смотри-ка! — они

действительно замедляются, причем именно так, как предсказано. В 1967 г. объединение слабого и электромагнитного взаимодействий Глэшоу — Вайнберга — Салама предсказало три новых векторных бозона, которые были почти в сто раз тяжелее любой обнаруженной к тому времени частицы. Она предсказала также новые типы взаимодействия вещества с электронами и нейтрино благодаря новопредсказанной Z-частице, которую не только никто до той поры не видел, но само существование которой ставилось под сомнение данными многих экспериментов. Она также требовала существования нового и тоже никем не виданного до той поры массивного фундаментального скалярного бозона — частицы Хиггса, притом что никаких фундаментальных скалярных частиц на тот момент известно не было. И наконец, если говорить о ней как о квантовой теории, никто вообще не знал, имеет ли она смысл.

Поэтому несколько не удивительно, что эта идея не произвела сразу же эффекта разорвавшейся бомбы. Тем не менее не прошло и десяти лет, как все переменилось, и в физике элементарных частиц начался самый продуктивный в плане теории период после открытия квантовой механики. И хотя калибровочная теория слабого взаимодействия дала старт этому процессу, результат оказался гораздо масштабнее.



Первой трещинкой в дамбе, сдерживающей воды прогресса, стала в 1971 г. работа голландского магистранта Герарда 'т Хоофта. Я навсегда запомнил, как пишется его имя, потому что один из моих особенно талантливых и остроумных бывших коллег по Гарварду, покойный Сидни Коулмен, шутил, что если бы у Герарда были запонки с монограммой,

то и на них пришлось бы поставить апостроф. До 1971 г. многие крупнейшие теоретики мира пытались понять, пропадут ли расходимости — настоящее проклятие в большинстве квантовых теорий поля — в калибровочных теориях со спонтанным нарушением симметрии, как они пропадали в аналогичных теориях без нарушения симметрии. Но ответ постоянно ускользал. Интересно, что доказательство, которого не заметили другие, нашел молодой магистрант, работавший под руководством закаленного профессионала — Мартина Вельтмана. Нередко мы, физики, увидев какой-то новый результат, способны быстро вникнуть в детали и представить, как и сами могли бы сделать это открытие. Но многие озарения 'т Хоофта — а их было много, поскольку почти все новые идеи 1970-х гг. так или иначе проистекали из его теоретических изобретений, — исходили, кажется, из какого-то скрытого от глаз резервуара интуитивных знаний.

Еще одна замечательная черта Герарда — его мягкость, скромность и стеснительность. От человека, который прославился в своей области еще студентом, можно было бы ожидать некоторого чувства собственного превосходства. Но с самой первой нашей встречи — еще раз: я тогда был зеленым магистрантом — Герард относился ко мне как к интересному другу, и мне приятно сказать, что наша дружба продолжается. Я всегда стараюсь помнить о его отношении, когда встречаюсь с молодыми студентами; иногда они кажутся стеснительными или напуганными, но я всегда стараюсь следовать примеру Герарда и подражать его открытому великодушию.

Его научный руководитель Тини Вельтман, как его часто называли, производил совершенно противоположное впечатление. Не то чтобы с Тини нельзя было приятно

пообщаться. Это не так. Но он всегда с самого начала разговора давал мне ясно понять: что бы я ни сказал, я все равно недостаточно понимаю суть дела. Я всегда получал удовольствие от его интеллектуальных провокаций.

Важно отметить, что 'т Хоофт никогда не взялся бы за эту задачу, если бы Вельтман не был одержим ею, хотя большинство остальных ученых уже сдались и отказались от борьбы. Идею о том, что кому-то в конце концов удастся расширить методы, разработанные Фейнманом и другими учеными для обуздания квантовой электродинамики, и применить их к более сложным теориям, таким как теория Янга — Миллса со спонтанными нарушениями симметрии, многие специалисты считали попросту наивной. Но Вельтман упрямо продолжал работать над проектом, и он мудро подобрал себе в помощь магистранта, который к тому же оказался гением.

Потребовалось некоторое время, чтобы идеи 'т Хоофта и Вельтмана проникли в сознание их коллег, а новые методы, разработанные 'т Хоофтом, получили общее признание, но уже через год или около того физики согласились, что теория, предложенная Вайнбергом, а позже Саламом, имеет смысл. Цитирование статьи Вайнберга внезапно стало экспоненциально расти. Однако «имеет смысл» и «верна» — две разные вещи. Неужели природа действительно воспользовалась той самой теорией, что предложили Глэшоу, Вайнберг и Салам?

Довольно долго этот ключевой вопрос оставался открытым, и некоторое время даже казалось, что ответ должен быть «нет».

Важным нововведением этой теории было требование существования новой нейтральной частицы Z помимо заряженных частиц, предложенных несколькими годами ранее

Швингером и другими и необходимых для превращения нейтронов в протоны, а электронов в нейтрино. Оно означало, что должен существовать еще один тип слабого взаимодействия, не только для электронов и нейтрино, но и для протонов и нейтронов, передаваемый путем обмена этими новыми нейтральными частицами. В данном случае, как и в электромагнетизме, тип взаимодействующих частиц меняться не должен. Такие взаимодействия получили известность как взаимодействия посредством нейтральных токов, и очевидным способом проверки данной теории был поиск таких взаимодействий. А искать их лучше всего было в поведении тех единственных в природе частиц, которые чувствуют только слабое взаимодействие, а именно нейтрино.

Возможно, вы помните, что предсказание нейтральных токов было одной из причин, по которым не сработала гипотеза, предложенная Глэшоу в 1961 г. Но модель Глэшоу не была полноценной теорией. Массы частиц просто вставлялись в уравнения вручную, а потому контролировать квантовые поправки было невозможно. Однако, когда Вайнберг и Салам предложили свою модель для электрослабого объединения, уже имелись все необходимые для детальных предсказаний элементы. Масса Z-частицы была предсказана и, как показал 'т Хоофт, появилась возможность надежно рассчитать все квантовые поправки, в точности так, как это делалось для квантовой электродинамики.

Это было и хорошо и плохо, потому что не оставалось никакого места для маневра на случай каких-либо расхождений с данными наблюдений. И в 1967 г. такие расхождения действительно обнаружили. При высокоэнергетических столкновениях нейтрино с протонами не наблюдалось никаких нейтральных токов, хотя верхний предел устанавливался на уровне примерно десяти процентов от частоты

более знакомых слабых взаимодействий нейтрино и протонов со сменой знака, таких как нейтронный распад. Перспективы смотрелись печально, и большинство физиков пришли к выводу, что слабых нейтральных токов не существует.

Вайнберг, лично заинтересованный в успехе этого квеста, в 1971 г. разумно заявил, что пространство для маневра все же есть. Но большинство остальных членов сообщества с такой позицией не согласились.

В начале 1970-х гг. в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) были проведены новые эксперименты на протонном ускорителе, в которых протонами высоких энергий бомбардировали длинную мишень. Большинство частиц, получившихся при столкновении, поглощались мишенью, но нейтрино вылетали с другого конца — их способность к взаимодействию настолько слаба, что они могли пройти мишень насквозь без поглощения. Получившийся пучок энергичных нейтрино затем попадал в размещенный на его пути детектор, способный зарегистрировать те немногочисленные события, в которых нейтрино взаимодействовали с веществом детектора.

Был построен новый громадный детектор, получивший название «Гаргамель» в честь великанши — матери Гаргантюа из романа французского писателя Рабле. Эта «пузырьковая камера» размером пять на два метра была наполнена перегретой жидкостью, в которой при прохождении энергичных заряженных частиц оставался след из пузырьков, чем-то напоминающий туманный след невидимого самолета высоко в небе.

Интересно, что, когда экспериментаторы, построившие «Гаргамель», встретились в 1968 г., чтобы обсудить планы экспериментов с нейтрино, идея поиска нейтральных токов

даже не упоминалась — ясное свидетельство того, что многие физики считали этот вопрос решенным. Гораздо больший интерес для них представляла возможность развить полученные незадолго до того неожиданные результаты экспериментов на Стэнфордском линейном ускорителе SLAC, где электроны высоких энергий использовались как зонды для исследования строения протонов. Использование в этом качестве нейтрино могло повысить точность измерений, поскольку нейтрино не заряжены.

Однако после результатов 'т Хоофта и Вельтмана, в 1972 г., экспериментаторы начали всерьез воспринимать описание слабого взаимодействия, данное калибровочной теорией, и в первую очередь гипотезой Глэшоу — Вайнберга — Салама. А значит, пора было заняться поисками нейтральных токов. У группы, работавшей с детектором «Гаргамель», в принципе было все необходимое для этого, хотя сам детектор конструировался не для этой задачи.

Большинство энергичных нейтрино в пучке при взаимодействии с протонами мишени должны были превращаться в мюоны — более тяжелые аналоги электронов. Эти мюоны вылетали из мишени, оставляя за собой длинный след, характерный для заряженной частицы, до самой кромки детектора. Протоны превращались в нейтроны, которые сами по себе не оставляют следов, но, сталкиваясь с ядрами, порождают короткий «ливень» заряженных частиц, оставляющих следы. Таким образом, эксперимент был нацелен на регистрацию мюонных следов с сопутствующим коротким ливнем заряженных частиц; они регистрировались как отдельные сигналы, говорящие в то же время об одном акте слабого взаимодействия.

Однако иногда нейтрино, провзаимодействовав с веществом вне детектора, порождало нейтрон, который, влетев

в детектор, мог вступить там во взаимодействие. Такие события должны были оставлять след в виде одного только ливня сильно взаимодействующих частиц, порожденного нейтроном, без сопутствующего ему мюонного следа.

Когда на детекторе «Гаргамель» начался поиск нейтральных токов, внимание ученых сосредоточилось именно на таких изолированных каскадах заряженных частиц без сопутствующего им мюона. В событиях, связанных с нейтральными токами, нейтрино, взаимодействующее с нейтроном или протоном в детекторе, не превращается в заряженный мюон, но просто упруго отскакивает и уходит за пределы детектора, не оставив следа. Наблюдать при этом можно только каскад частиц отдачи — ту же сигнатуру, что остается после более обычных нейтринных взаимодействий вне детектора, порождающих нейтроны, которые попадают в детектор и порождают ливень ядерных частиц.

Таким образом, задачей эксперимента, если ставить целью однозначное обнаружение нейтральных токов, было отличить события, порождаемые нейтрино, от аналогичных событий, порождаемых нейтронами. (Эта же задача представляет главную сложность для экспериментаторов при поиске любых частиц, вступающих в слабые взаимодействия, включая и гипотетические частицы темного вещества, поиск которых сегодня идет в подземных детекторах по всему миру.)

Первый единичный электрон отдачи без каких бы то ни было сопутствующих ему следов заряженных частиц в детекторе удалось пронаблюдать в 1973 г. Такой электрон мог возникнуть в результате более редкого, но предсказанного для нейтральных токов столкновения нейтрино с электроном вместо протона или нейтрона. Вообще-то

единичного события недостаточно, чтобы с определенностью заявить о новом открытии в физике элементарных частиц. Однако этот результат дал надежду, и к марту 1973 г. тщательный анализ нейтронного фона и наблюдавшихся изолированных ливней частиц, похоже, уже подтверждал, что нейтральные токи слабого взаимодействия действительно существуют. Тем не менее только к июлю 1973 г. исследователи в ЦЕРН выполнили все необходимые проверки, чтобы уверенно заявить о регистрации нейтральных токов, что они и сделали в августе на конференции в Бонне.

История могла бы на этом и закончиться, но, к несчастью, вскоре после этого другая группа ученых, занятая поисками нейтральных токов, перепроверила их данные на своей установке и обнаружила, что предыдущий сигнал, означавший наличие нейтральных токов, куда-то исчез. Это породило немалую суматоху и скепсис в физическом сообществе, а нейтральные токи, казалось, вновь попали под подозрение. В конце концов группа, работавшая на «Гаргамели», повторила все с начала, проверила детектор непосредственно на протонном пучке и собрала намного больше данных. Почти год спустя, в июне 1974 г., группа представила на очередной конференции неопровержимые доказательства существования сигнала. Тем временем конкурирующая группа нашла причину ошибки и подтвердила результат «Гаргамели». Глэшоу, Вайнберг и Салам были оправданны.

Нейтральные токи пробили себе дорогу, и уже казалось, что замечательное объединение слабого и электромагнитного взаимодействий вот-вот случится. Но оставались еще две нерешенные проблемы, которые требовали внимания.

Открытие нейтральных токов при нейтринном рассеивании подтвердило идею о существовании Z-частицы,

но это никак не гарантировало, что слабое взаимодействие полностью соответствует образу, который предложили Глэшоу, Вайнберг и Салам и в котором слабое и электромагнитное взаимодействия были едины. Чтобы разобраться в этом, требовался эксперимент с использованием частицы, принимающей участие как в слабом, так и в электромагнитном взаимодействии. Электрон идеален в этом отношении, поскольку участвует только в этих двух взаимодействиях.

Когда электроны взаимодействуют с другими зарядами посредством электромагнитного притяжения, левые и правые электроны ведут себя одинаково. Однако теория Вайнберга — Глэшоу — Салама требовала, чтобы слабые взаимодействия для левых и правых частиц проходили по-разному. Из этого следовало, что тщательные измерения рассеяния поляризованных электронов — электронов, заранее приведенных в левое или правое состояние при помощи магнитных полей, — на разных мишенях должно было бы, по идее, выявить нарушение симметрии правого и левого, но не настолько резкое, как асимметрия, наблюдавшаяся в нейтринном рассеянии, потому что нейтрино всегда чисто левое. Уровень нарушения при рассеянии электронов, если он существует, должен был бы отражать степень, в которой слабое взаимодействие и электромагнетизм смешаны в объединенной теории.

На самом деле идею проверки такой интерференции с использованием рассеяния электронов предложил еще в 1958 г. замечательный советский физик Яков Зельдович. Но прошло двадцать лет, прежде чем появилась техническая возможность ставить эксперименты с достаточной чувствительностью. Так что в случае с открытием нейтральных токов дорога к успеху была полна ухабов и тупиков.

Одна из причин, по которым проверка этой идеи потребовала так много времени, состояла в том, что слабое взаимодействие и правда очень слабое. Поскольку доминирующим способом взаимодействия электронов с веществом является электромагнитное взаимодействие, предсказанная асимметрия правого и левого, возникающая вследствие обмена Z -частицей, мала — меньше одной десятичной. Для проверки наличия такой асимметрии нужен был пучок одновременно интенсивный и с хорошей известной первоначальной поляризацией.

Лучше всего для этих экспериментов подходил Стэнфордский линейный ускоритель. Он построен в 1962 г. и был самой длинной — две мили — из когда-либо построенных человеком столь прямолинейных конструкций. В 1970 г. в нем появились поляризованные пучки, но только в 1978 г. удалось разработать и поставить эксперимент с чувствительностью, достаточной для поиска влияния слабого взаимодействия на рассеяние электронов.

Хотя успешное наблюдение нейтральных токов в 1974 г. стало началом широкого признания теории Вайнберга — Глэшоу — Салама физиками-теоретиками, эксперимент SLAC 1978 г. был необычайно важен; дело в том, что в 1977 г. два эксперимента в области атомной физики дали результаты, которые, если бы они подтвердились, однозначно опровергли бы эту теорию.

В нашей истории до сих пор принципиальную роль играл свет, освещавший (простите за каламбур) наши представления не только об электричестве и магнетизме, но и о пространстве, времени и в конечном итоге о природе квантового мира. Так что было понятно, что свет способен помочь разобраться и с электрослабым объединением.

Первым большим успехом квантовой электродинамики стало верное предсказание спектра водорода, а со временем и других атомов. Но если электроны ощущают и слабое взаимодействие, то это даст небольшую добавочную силу между электронами и ядрами, которая должна изменить — хотя и очень слабо — характеристики их атомных орбит. Как правило, эту разницу заметить невозможно, поскольку слабые эффекты тонут в электромагнитных. Но слабое взаимодействие нарушает четность, так что те самые поправки к электромагнитному взаимодействию от слабых нейтральных токов, которые исследовали при помощи поляризованных электронных пучков, могут дать в атомах новые эффекты, которых не было бы, если бы действовал один только электромагнетизм.

В частности, для тяжелых атомов теория Вайнберга — Салама предсказывала, что если сквозь газ из атомов пропустить поляризованный свет, то направление поляризации света повернется примерно на одну миллионную долю градуса из-за нарушающего четность действия нейтральных токов в атомах, сквозь которые прошел свет.

В 1977 г. статьи с результатами двух независимых экспериментов в области атомной физики, проведенных в Сиэтле и в Оксфорде, были опубликованы подряд в журнале *Physical Review Letters*. Результаты были удручающие. Никакого оптического поворота не удалось увидеть на масштабе, вдесятеро меньшем, чем тот, что предсказывала теория электрослабого взаимодействия. Если бы только один эксперимент дал такой результат, он, скорее всего, показался бы сомнительным. Но одинаковый результат двух независимых экспериментов на разном оборудовании выглядел очень убедительно. Казалось, теория опровергнута.

Тем не менее проект SLAC, начавшийся тремя годами ранее, шел полным ходом, и, поскольку подготовка к эксперименту уже началась, его проведение было утверждено и первые данные ожидалось в начале 1978 г. Нулевой результат предыдущих опытов побудил стэнфордских ученых добавить в свой эксперимент несколько дополнительных «звоночков», чтобы в том случае, если никакого эффекта не обнаружится, была бы гарантия, что они *могли бы* его заметить, если бы он был.

Уже через два месяца после старта эксперимент начал демонстрировать явные признаки нарушения четности, и к июню 1978 г. ученые объявили ненулевые результаты его работы, согласующиеся с предсказаниями модели Глэшоу — Вайнберга — Салама, основанной на измеренном рассеянии нейтрино нейтральными токами, что позволило, в свою очередь, измерить силу Z-взаимодействия.

Тем не менее вопросы оставались, особенно с учетом явного расхождения этих результатов с результатами Сиэтла и Оксфорда. В Калтехе на одном из семинаров по этому вопросу Ричард Фейнман в очень типичной для него манере сразу обратил внимание на ключевой экспериментальный вопрос и поинтересовался, проверяли ли экспериментаторы на SLAC, одинаково ли хорошо детектор отзывается на левые и правые электроны. Оказалось, что не проверяли, но теоретические соображения и не давали им оснований считать, что детекторы могут по-разному вести себя при пучках электронов с разной поляризацией. (Как известно, восемь лет спустя Фейнман сумеет разобраться и в другой сложной проблеме, связанной с трагическим взрывом «Челленджера»; тогда он просто продемонстрировал разрушение уплотнительного кольца и комиссии по расследованию, и публике, наблюдавшей за происходящим по телевизору.)

До осени авторы эксперимента SLAC постарались исключить и этот, и другие поводы для беспокойства и осенью объявили окончательный результат, соответствующий предсказанию Глэшоу — Вайнберга — Салама с погрешностью менее 10%. Электрослабое объединение получило подтверждение!

Я по сей день не знаю, есть ли у кого-нибудь хорошее объяснение, почему первоначальные результаты у атомных физиков оказались ошибочными (позже те же эксперименты давали результаты, соответствующие теории Глэшоу — Вайнберга — Салама); можно лишь сказать, что физические эксперименты и теоретическая интерпретация результатов этих экспериментов — дело сложное.

Как бы то ни было, всего год спустя, в октябре 1979 г., Шелдон Глэшоу, Абдус Салам и Стивен Вайнберг были удостоены Нобелевской премии за теорию электрослабого взаимодействия, получившую теперь экспериментальное подтверждение и объединившую две из четырех сил природы, на основе одной фундаментальной симметрии — калибровочной инвариантности. Если бы калибровочная симметрия не нарушалась скрытым от глаз образом, слабое и электромагнитное взаимодействия выглядели бы совершенно одинаково. Но тогда все частицы, из которых мы состоим, не имели бы массы и нас бы здесь не было, чтобы это заметить...

Это, однако, еще не конец нашей истории. Два из четырех — это всего лишь два из четырех. Сильное ядерное взаимодействие, исследованием которого в значительной степени мотивировалась работа, приведшая в конечном итоге к электрослабому объединению, продолжало упорно сопротивляться всем попыткам объяснения даже тогда, когда теория электрослабого взаимодействия окончательно

оформилась. Ни одно объяснение сильного ядерного взаимодействия через спонтанное нарушение калибровочных симметрий не выдерживало испытания экспериментом.

Таким образом, пока ученые-философы XX столетия пробирались — нередко весьма извилистыми и слабо освещенными путями — к выходу из нашей пещеры теней, чтобы хотя бы одним глазком взглянуть на скрытую в обычных условиях под поверхностью вещей реальность, на постепенно проступающем прекрасном гобелене природы все еще не хватало одной силы, необходимой для понимания строения вещества на фундаментальном уровне.

СВОБОДЕН НАКОНЕЦ

...отпусти народ мой...

Исход 9:1

Долгая дорога к электрослабому объединению стала демонстрацией интеллектуального упорства и изобретательности. Но она же была и вынужденным отступлением. Чуть ли не все основные идеи, предложенные Янгом, Миллсом, Юкавой, Хиггсом и другими учеными, приведшие в конечном итоге к появлению этой теории, были разработаны в процессе безуспешной на первый взгляд борьбы за понимание мощнейшей силы природы — сильного ядерного взаимодействия. Вспомним, что эта сила и проявляющие ее сильно взаимодействующие частицы настолько запутали физиков, что в 1960-е гг. многие из них совсем потеряли надежду когда-либо объяснить это взаимодействие методами квантовой теории поля, которая к тому времени так успешно описывала электромагнетизм и слабое взаимодействие.

Был, правда, один успех, связанный с гипотезой Гелл-Манна и Цвейга о том, что все сильно взаимодействующие частицы, наблюдавшиеся до того момента, включая протон

и нейтрон, можно интерпретировать как состоящие из более фундаментальных объектов, которые, как я уже говорил, Гелл-Манн назвал кварками. Все известные, а заодно и неизвестные на тот момент сильно взаимодействующие частицы можно было без труда классифицировать, если считать, что они состоят из кварков. Более того, аргументы от симметрии, побудившие, в частности, Гелл-Манна выдвинуть свою модель, стали основой для осмысления прежде непонятных данных по реакциям сильно взаимодействующего вещества.

Тем не менее Гелл-Манн допускал, что его схема может быть всего лишь математической конструкцией, полезной для классификации, а на самом деле кварков не существует и за этим термином не стоит реальных частиц. В конце концов, ни на одном ускорителе и ни в одном эксперименте с космическими лучами никогда не наблюдали ни одного свободного кварка. Вероятно также, что Гелл-Манн находился под влиянием популярной идеи о том, что квантовая теория поля, а следовательно, и понятие элементарных частиц как таковых не работает в ядерных масштабах. Даже в 1972 г. он заявлял: «Позвольте подчеркнуть тот главный момент, что, вполне возможно, нам удастся построить исчерпывающую теорию адронов, основанную на кварках и некоем клее... Но это совершенно не означает никакого конфликта с бутстрап-теорией, поскольку сущности, с которых мы начинаем, вымышленные».

С этой точки зрения попытки описать сильное взаимодействие при помощи калибровочной квантовой теории поля Янга — Миллса, в которой взаимодействие переносится реальными калибровочными частицами, предпринимаются зря. Это просто казалось невозможным. Сильное взаимодействие работало, судя по всему, только на ядерных

масштабах, так что если уж описывать его калибровочной теорией, то фотоподобные частицы, которые будут переносить это взаимодействие, должны быть тяжелыми. Но при этом не было данных в пользу хиггсовского механизма с его массивными сильно взаимодействующими хиггсopodobными частицами, которые легко должны были бы обнаруживаться в экспериментах. Обобщая, можно сказать, что взаимодействие было, попросту говоря, настолько сильным, что, даже если бы оно описывалось калибровочной теорией, все методы квантовой теории поля, придуманные для вывода предсказаний и замечательно работавшие с другими силами, не сработали бы в применении к сильному взаимодействию. Вот почему Гелл-Манн в приведенной цитате говорит о бутстрапе — имеется в виду дзеноподобная идея о том, что по-настоящему фундаментальных частиц просто не существует. Аплодисменты без рук, пожалуйста.

Всякий раз, когда теория, как в данном случае, заходит в тупик, очень полезно использовать эксперимент в качестве ориентира, и как раз это произошло в 1968 г. Серия основополагающих экспериментов, которые провели Генри Кендалл, Джерри Фридман и Ричард Тейлор с использованием новопостроенного ускорителя SLAC, на котором электроны высоких энергий рассеивались на протонах и нейтронах, обнаружила нечто замечательное. Выяснилось, что протоны и нейтроны действительно имеют некую субструктуру, но она была очень странной. Столкновения демонстрировали свойства, которых никто не ожидал. Указывали ли они на кварки?

Теоретики не замедлили прийти на помощь. Джеймс Бьёркен продемонстрировал, что явления, которые наблюдали экспериментаторы и которые стали называть скейлингом, можно понять, если считать, что протоны и нейтроны

состоят из фактически не взаимодействующих точечных частиц. Затем Фейнман интерпретировал эти объекты как реальные частицы, которые он назвал партонами, и предположил, что в них можно распознать Гелл-Манновы кварки.

Однако у этой картины была одна по-настоящему крупная проблема. Если все сильно взаимодействующие частицы состоят из кварков, то кварки, безусловно, должны и сами участвовать в сильном взаимодействии. Почему же все выглядит так, будто они почти свободны внутри протонов и нейтронов и при этом не вступают в сильное взаимодействие друг с другом?

Более того, в 1965 г. Намбу, Хан Му Юн и Оскар Гринберг предположили и убедительно обосновали, что если сильно взаимодействующие частицы построены из кварков и являются фермионами, как электроны, то Гелл-Маннова классификация известных частиц по различным сочетаниям кварков в них получится непротиворечивой только в том случае, если кварки обладают каким-то новым видом внутреннего заряда — новым калибровочным зарядом Янга — Милса. Из этого следовало, что они вступают в сильное взаимодействие посредством нового набора калибровочных бозонов, которые тогда называли глюонами. Но где эти глюоны, и где эти кварки, и почему нет никаких свидетельств сильного взаимодействия кварков внутри протонов и нейтронов, если они действительно совпадают с партонами Фейнмана?

Еще одна проблема с кварками состояла в том, что поскольку протоны и нейтроны участвуют в слабых взаимодействиях и при этом состоят из кварков, то кварки тоже, по идее, должны участвовать не только в сильных, но и в слабых взаимодействиях. Гелл-Манн в свое время определил три разных типа кварков, из которых, по его

мнению, строились все известные на тот момент сильно взаимодействующие частицы. Мезоны можно было сконструировать из пар кварк — антикварк. Протоны и нейтроны могли состоять из трех кварков с дробными зарядами, которые Гелл-Манн бесхитростно назвал верхними (u, up) и нижними (d, down) кварками. Протон включал в себя два u-кварка и один d-кварк, а нейтрон — два d-кварка и один u-кварк. В дополнение к этим двум типам кварков еще один тип — более тяжелая версия d-кварка — требовался для построения экзотических новооткрытых элементарных частиц. Гелл-Манн назвал этот кварк странным (s, strange); при этом говорилось, что частицы, в которых s-кварк содержится, обладают «странностью».

Когда впервые появилась гипотеза о нейтральных токах как составной части слабого взаимодействия, возникла проблема. При взаимодействии с Z-частицами u-, d- и s-кварки могли оставаться u-, d- и s-кварками и до, и после взаимодействия посредством нейтрального тока, точно так же как электроны остаются электронами и до, и после такого взаимодействия. Однако поскольку d- и s-кварки обладают в точности одинаковыми электрическим зарядом и изотопическим спином, ничто не должно мешать s-кварку превратиться в d-кварк при взаимодействии посредством Z-частицы. Это позволило бы частицам, включающим в себя s-кварки, распадаться с образованием частиц, в состав которых входят d-кварки. Но никаких подобных «меняющих странность» процессов не наблюдалось, несмотря на высокую чувствительность экспериментов. Что-то было не так.

Это отсутствие «меняющих странность нейтральных токов» сумел блестяще объяснить, по крайней мере в принципе, Шелдон Глэшоу в соавторстве с Джоном Илиопулосом и Лучано Майани в 1970 г. Эти ученые

восприняли кварковую модель всерьез и предположили, что если существует четвертый кварк, получивший название очарованного (c , charm), с таким же зарядом, как у u -кварка, то при вычислении частоты превращения s -кварка в d -кварк произойдет замечательное математическое сокращение — и изменяющие странность нейтральные токи будут подавлены, в полном согласии с результатами экспериментов.

Более того, из этой схемы начинала вырисовываться красивая симметрия между кварками и такими частицами, как электроны и мюоны, в которой все их можно было разбить на пары, связанные со слабым взаимодействием. Парой для электрона при этом становилось его собственное нейтрино, и для мюона аналогично. Верхний и нижний кварки также образовывали пару, а очарованный и странный кварки — вторую. Тогда W -частицы, взаимодействуя с одной из частиц в каждой паре, превращали бы их во вторую частицу той же пары.

Однако ни один из приведенных аргументов не решал центральной проблемы сильного взаимодействия между кварками. Почему никто никогда не видел ни одного кварка? И если сильное взаимодействие действительно описывается калибровочной теорией с глюонами в качестве калибровочных частиц, то как, хотя бы в принципе, можно увидеть глюон? Наконец, если глюоны действительно не имеют массы, то почему сильное взаимодействие имеет такой малый радиус действия?

Эти проблемы, по мнению некоторых ученых, указывали на то, что квантовая теория поля — негодный подход к пониманию сильного взаимодействия. Фримен Дайсон, сыгравший такую важную роль в разработке первой успешной квантовой теории поля — квантовой электродинамики,

утверждал, имея в виду сильное взаимодействие: «В ближайшие сто лет верная теория не будет найдена».

Одним из тех, кто был убежден, что квантовая теория поля обречена, был блестящий молодой теоретик Дэвид Гросс. Как ученик Джеффри Чу — автора бутстрап-гипотезы о ядерной демократии, в которой элементарные частицы представляли собой всего лишь иллюзию, прикрывающую структуру, в которой реальны были только симметрии, но не частицы, — Гросс был прекрасно подготовлен и решительно настроен прикончить квантовую теорию поля раз и навсегда.

Не забывайте, что даже в конце 1965 г., когда Ричард Фейнман получал свою Нобелевскую премию, процедура, которую он и другие ученые разработали для избавления от расходимостей в квантовой теории поля, все еще считалась своего рода фокусом; многие полагали, что на малых масштабах что-то капитально не так с картиной, которую представляет квантовая теория поля.

В 1950-е гг. советский физик Лев Ландау показал, что электрический заряд электрона зависит от масштаба, на котором вы его измеряете. Виртуальные частицы выскакивают из ниоткуда в пустом пространстве, так что электроны и все остальные элементарные частицы окружены облаком виртуальных пар частица — античастица. Эти пары экранируют заряд в точности так же, как экранируется заряд в диэлектрических материалах. Положительно заряженные виртуальные частицы стремятся теснее окружить отрицательный заряд, поэтому на некотором расстоянии физические эффекты исходного отрицательного заряда снижаются.

Это означало, по мнению Ландау, что чем ближе подходишь к электрону, тем больше будет казаться его реальный

заряд. Если при измерении на больших расстояниях мы получаем для заряда электрона некую конкретную величину, как и происходит на самом деле, то это должно означать, что «чистый» заряд на электроны, то есть заряд на фундаментальной частице, рассматриваемый без учета всей бесконечной оболочки в виде пар частица — античастица, окружающих ее на все более мелких масштабах, должен быть бесконечным. Ясно, что с этой картиной что-то откровенно не так.

Гросс находился под влиянием не только своего научного руководителя, но и преобладающих взглядов того времени, в первую очередь аргументов Гелл-Манна, единолично доминировавшего в теоретической физике конца 1950-х — начала 1960-х. Гелл-Манн считал, что нужно использовать алгебраические соотношения, возникающие из размышлений о теориях поля, а затем сохранить эти соотношения, отбросив при этом теорию поля. Он заявлял, очень по-гелл-манновски описывая ситуацию: «Мы могли бы сравнить этот процесс с методом, который иногда используется во французской кухне: кусок фазаньего мяса готовится между двумя ломтиками телятины, которые затем выбрасывают».

Таким образом, можно было вычленить потенциально полезные для предсказаний свойства кварков, а затем игнорировать возможность реального существования кварков. Однако Гросса уже не устраивало простое использование идей, связанных с глобальными симметриями и алгебрами, он хотел исследовать динамику, которая могла бы по-настоящему описывать физические процессы внутри сильно взаимодействующих частиц. Гросс и его соавтор Кёртис Каллан опирались на более раннюю работу Джеймса Бьёркена и хотели показать, что заряженные частицы, расположенные,

судя по всему, внутри протонов и нейтронов, должны иметь спин $\frac{1}{2}$, то есть точно такой же, как у электронов. Позже, уже с другими соавторами, Гросс показал, что при аналогичном анализе рассеяния нейтрино на протонах и нейтронах данные ЦЕРН демонстрируют, что эти компоненты выглядят в точности как кварки, существование которых предположил в свое время Гелл-Манн.

Если нечто крикает как утка и ходит как утка, то это, вероятно, и есть утка. Так что у Гросса и других ученых реальность кварков теперь сомнений не вызывала.

Но как бы ни были убеждены Гросс и другие в реальности кварков, они были в равной мере убеждены, что из этого вытекает невозможность для полевой теории дать корректное описание сильного взаимодействия. Результаты эксперимента требовали, чтобы компоненты практически не взаимодействовали между собой и, в частности, не вступали бы в сильное взаимодействие.

В 1969 г. коллеги Гросса по Принстону Кёртис Каллан и Курт Симанзик заново открыли систему уравнений, которую до них исследовал Ландау, а затем Гелл-Манн и Фрэнсис Лоу, описывавшую, как величины в квантовой теории поля изменялись бы при изменении масштаба. Если партоны, существование которых вытекало из экспериментов на SLAC, вообще вступают в какие-либо взаимодействия — как должны, по идее, вести себя кварки, — то наблюдались бы рассчитанные Бьёркеном измеримые отклонения от скейлинга, и результаты, которые Гросс с соавторами вывели из сравнения теории с данными экспериментов на SLAC, тоже потребовалось бы модифицировать.

В следующие два года, учитывая результаты 'т Хоофта и Вельтмана и растущий успех предсказаний теории слабых и электромагнитных взаимодействий, все больше ученых

вновь стали обращать внимание на квантовую теорию поля. Гросс решил доказать с высокой общностью, что ни одна разумная квантовая теория поля ни при каких условиях не может воспроизвести наблюдаемые на SLAC экспериментальные результаты, связанные с природой протонов и нейтронов. Тем самым он надеялся прикончить целое направление в попытках объяснения сильного взаимодействия. Во-первых, он собирался доказать, что единственный способ объяснить результаты SLAC — это сделать так, чтобы каким-то образом на коротких расстояниях сила квантово-полевых взаимодействий падала бы до нуля, то есть чтобы поля фактически прекращали взаимодействовать на коротких расстояниях. После этого он рассчитывал показать, что ни одна квантовая теория поля не в состоянии этого обеспечить.

Не забывайте: Ландау показал, что квантовая электродинамика — классическая непротиворечивая квантовая теория поля — ведет себя в точности противоположным образом. Сила электрических зарядов из-за окружающего их облака виртуальных частиц и античастиц возрастает, по мере того как уменьшается масштаб, на котором происходит зондирование частиц (таких как электроны).

В начале 1973 г. Гросс и его соавтор Джорджо Паризи завершили первую часть работы, а именно доказали, что если сильное ядерное взаимодействие описывается любого рода фундаментальной квантовой теорией поля, то скейлинг, наблюдаемый на SLAC, требует, чтобы сильное взаимодействие компонентов протона сходило на нет на малых масштабах.

Далее, Гросс попытался показать, что никакие теории поля на самом деле не ведут себя так, чтобы сила взаимодействия на малых расстояниях сходила на нет; такое поведение он назвал асимптотической свободой. С помощью

Сидни Коулмана из Гарварда, посещавшего как раз в то время Принстон, Гросс сумел провести это доказательство для всех разумных квантовых теорий поля, за исключением калибровочных теорий типа теории Янга — Миллса.

В этот момент Гросс взял к себе нового студента — двадцатидвухлетнего Фрэнка Вильчека, который приехал в Принстон из Чикагского университета, чтобы изучать математику, но после курса теории поля, который читал Гросс, переключился на физику.

Гросс был либо удачлив, либо проницателен, поскольку ему довелось быть научным руководителем дипломных работ двух самых, вероятно, замечательных умов среди физиков моего поколения — Фрэнка Вильчека и Эдварда Виттена. Виттен стал одним из лидеров революции в физике 1980-х и 1990-х гг., связанной с теорией струн, и единственным физиком, удостоенным престижной Филдсовской медали — высшей награды для математиков. Вильчек, вероятно, один из немногих подлинных физиков-универсалов. В начале 1980-х гг. мы с Фрэнком подружились и часто работали в соавторстве, и он не только один из самых изобретательных физиков, с какими мне приходилось работать, но и обладает поистине энциклопедическими знаниями в своей области. Он прочел едва ли не все когда-либо написанные труды по физике и впитал почерпнутую из них информацию. За прошедшие годы он сделал множество фундаментальных открытий не только в физике элементарных частиц, но также в космологии и материаловедении.

Гросс поручил Вильчеку исследовать вместе с ним единственную оставшуюся брешь в своем доказательстве и определить, как меняется сила взаимодействия в теориях Янга — Миллса по мере уменьшения расстояния, чтобы доказать, что и в этих теориях тоже не наблюдается

асимптотической свободы. Они решили явно и непосредственно просчитать поведение взаимодействий в этих теориях на все меньших и меньших масштабах.

Это была сложнейшая задача. С тех пор были разработаны инструменты, позволяющие провести такой расчет в виде домашней работы на выпускном курсе. К тому же считать всегда проще, если знаешь, как знаем мы сегодня, каким должен быть ответ. После нескольких сумбурных месяцев, многочисленных фальстартов и численных ошибок в феврале 1973 г. они завершили расчет и обнаружили, к великому удивлению Гросса, что на самом деле теории Янга — Миллса *обладают* асимптотической свободой: сила взаимодействия в них действительно стремится к нулю, по мере того как взаимодействующие частицы сближаются. Позже в своей нобелевской лекции Гросс сказал: «Для меня открытие асимптотической свободы было совершенно неожиданным. Подобно атеисту, который только что услышал голос из неопалимой купины, я тут же обратился в истинную веру».

Сидни Коулман поручил своему студенту Дэвиду Политцеру проделать аналогичные вычисления; его независимый результат совпал с результатом Гросса и Вильчека и был получен примерно в то же время. То, что результаты совпали, дало обеим группам дополнительную уверенность в их достоверности.

Мало того, что теории Янга — Миллса оказались асимптотически свободными, выяснилось, что это единственный класс теорий поля, обладающий этим свойством. Это побудило Гросса и Вильчека предположить в первых строках их совместной эпохальной статьи, что теория Янга — Миллса, возможно, и правда объясняет сильное взаимодействие с учетом этой ее уникальности и того, что экспериментальные результаты SLAC 1968 г., по-видимому,

делают асимптотическую свободу неизменным требованием к любой теории сильного взаимодействия.

Которая из теорий Янга — Миллса верна, предстояло еще определить, как и понять, почему безмассовые калибровочные частицы, которые служат визитной карточкой теорий Янга — Миллса, никому никогда не попадались на глаза. И связанный с этим, возможно, самый важный и давний вопрос: а где же кварки?

Но, прежде чем я перейду к этим вопросам, еще один момент. Вас, возможно, интересует, почему поведение теорий Янга — Миллса так отличается от поведения их более простого сородича — квантовой электродинамики, для которой Ландау показал, что сила взаимодействия между электрическими зарядами возрастает на малых масштабах.

Ключевой момент здесь довольно тонкий и кроется в природе безмассовых калибровочных частиц в теории Янга — Миллса. В отличие от фотонов в электродинамике, не имеющих электрического заряда, глюоны — предсказанные переносчики сильного взаимодействия — обладают зарядами Янга — Миллса и потому взаимодействуют друг с другом. Но, поскольку теории Янга — Миллса сложнее квантовой электродинамики, заряды на глюонах тоже сложнее, чем простые электрические заряды на электронах. Каждый глюон похож не только на заряженную частицу, но и на маленький заряженный магнит.

Если поднести маленький магнитик к железному предмету, железо намагнитится и в результате вы получите более мощный магнит. Что-то аналогичное происходит и в теориях Янга — Миллса. Если у меня имеется некая частица с зарядом Янга — Миллса, скажем кварк, то кварки и антикварки могут возникать в вакууме вокруг этого заряда и экранировать его, как происходит в электромагнетизме.

Но глюоны тоже могут выскакивать из вакуума, и поскольку они работают как маленькие магнетики, то стремятся выстроиться в направлении поля, порождаемого первоначальным кварком. Это увеличивает силу поля, что, в свою очередь, побуждает новые глюоны выскакивать из вакуума, что увеличивает силу поля, и т. д.

В результате чем глубже вы проникаете внутрь виртуального глюонного облака, то есть чем ближе подбираетесь к кварку, тем слабее будет казаться поле. В конечном итоге, когда вы сблизите два кварка, взаимодействие между ними станет настолько слабым, что они начнут вести себя так, будто вовсе не взаимодействуют, — а это главная отличительная черта асимптотической свободы.

Я воспользовался здесь глюонами и кварками как своеобразными ярлычками, но следует заметить, что асимптотическая свобода не указывала однозначно на какую-то конкретную теорию Янга — Миллса. Однако Гросс и Вильчек признавали, что естественным кандидатом была та теория Янга — Миллса, которую Гринберг и другие постулировали как необходимую для того, чтобы кварковая гипотеза Гелл-Манна объясняла наблюдаемую природу элементарных частиц. В этой теории каждый кварк несет на себе один из трех различных типов заряда, которые обозначаются, за отсутствием более подходящих названий, цветами: красный, зеленый и синий. Именно из-за такой терминологии Гелл-Манн пустил в обращение для этой теории Янга — Миллса название «квантовая хромодинамика» — квантовая теория цветных зарядов, по аналогии с квантовой электродинамикой — квантовой теорией электрических зарядов.

Гросс и Вильчек исходили из того, что квантовая хромодинамика является *корректной* калибровочной теорией сильного взаимодействия кварков, поскольку

наблюдательные данные говорили в пользу подобной симметрии, связанной с кварками.

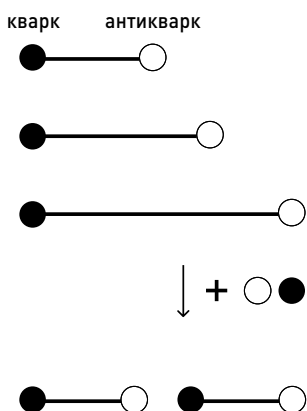
Не более чем через год после этих теоретических достижений замечательная идея асимптотической свободы получила столь же замечательное экспериментальное подкрепление. Эксперименты на SLAC и еще на одном ускорителе в Брукхейвене на Лонг-Айленде привели к поразительному и неожиданному открытию новой массивной элементарной частицы, причем было похоже, что частица эта включает в себя новый кварк — тот самый очарованный кварк, что был предсказан Глэшоу и его коллегами четырем годами раньше.

Но в этом открытии была своя загадка, поскольку новая частица жила намного дольше, чем можно было ожидать на основании измеренного времени жизни более легких нестабильных сильно взаимодействующих частиц. Открывшие новую частицу экспериментаторы говорили, что ее обнаружение было подобно тому, как случайно встретить в джунглях новый вид людей, живущих не до ста, а до десяти тысяч лет.

Если бы это открытие было сделано хотя бы на пять лет раньше, оно показалось бы необъяснимым. Но в данном случае судьба благоприятствовала подготовленному разуму. Том Аппельквист и Дэвид Политцер, работавшие в то время в Гарварде, быстро поняли, что если асимптотическая свобода действительно является свойством сильного взаимодействия, то можно показать, что взаимодействия, управляющие более массивными кварками, должны быть слабее взаимодействий, управляющих более легкими и более знакомыми кварками. А более слабое взаимодействие означает, что частицы распадаются медленнее. То, что могло казаться загадкой, в данной ситуации служило подтверждением новой идеи асимптотической свободы. Казалось, все встало на свои места.

За исключением всего одной, но весьма существенной вещи. Если теория квантовой хромодинамики — это теория взаимодействий между кварками и глюонами, то где, собственно, сами кварки и глюоны? Как так получается, что никто и никогда не видел их в эксперименте?

Ответить на этот вопрос помогла асимптотическая свобода, предоставившая ключевое свидетельство. Если сильное взаимодействие ослабевает по мере приближения к кварку, то, напротив, по мере отдаления от кварка оно должно усиливаться. Представьте тогда, что произойдет, если я попытаюсь растащить кварк и антикварк, связанные сильным взаимодействием. Когда я начинаю их растаскивать, мне требуется все больше и больше энергии, поскольку сила притяжения между ними возрастает с расстоянием. Со временем поля вокруг кварков накопят так много энергии, что энергетически выгодным станет появление из вакуума новой пары кварк — антикварк, каждый член которой свяжется с одной из первоначальных частиц. Этот процесс схематически показан на рисунке.



Это похоже на растягивание резиновой ленты. В конце концов лента, вместо того чтобы растягиваться до бесконечности, разорвется на две части. Каждый кусок ее в данном случае будет символизировать новую связанную пару кварк — антикварк.

Что это должно означать для экспериментаторов? Ну, если я ускоряю частицу, к примеру электрон, и она сталкивается с кварком внутри протона, то кварк будет выбит из протона наружу. Но, когда кварк начинает выходить из протона, его взаимодействие с остающимися кварками усилится, и в конечном итоге станет энергетически выгодно, чтобы из вакуума выскочила пара кварк — антикварк и ее составляющие связались как с выбитым кварком, так и с его остающимися собратьями. Это означает, что возникнет ливень сильно взаимодействующих частиц, таких как протоны, нейтроны, пионы и т. д., движущийся вдоль траектории первоначального выбитого кварка, и аналогичный ливень сильно взаимодействующих частиц в направлении движения оставшихся от протона исходных кварков. А потому никто и никогда не увидит кварки по отдельности.

Аналогично, если частица сталкивается с кварком, то при отскоке кварк иногда, прежде чем связаться с появившимся из вакуума антикварком, испускает глюон. Далее, поскольку глюоны взаимодействуют и с кварками, и между собой, новый глюон может испустить еще несколько глюонов. Эти глюоны, в свою очередь, также будут окружены новыми кварками, возникшими из вакуума, и породят новые сильно взаимодействующие частицы, движущиеся вдоль направлений движения каждого из первоначальных глюонов. В этом случае можно ожидать увидеть в некоторых случаях не одиночный ливень, движущийся в направлении движения первоначального кварка, а несколько таких

ливней, соответствующих каждому из новых глюонов, испущенных по пути.

Поскольку квантовая хромодинамика — конкретная, вполне определенная теория, по ней можно предсказать частоту, с которой кварки будут испускать глюоны, и частоту, с которой можно будет увидеть одиночный ливень частиц, или, как принято говорить, струю, выброшенную при столкновении электрона с протоном или нейтроном, а также частоту, с которой можно будет увидеть две струи, и т. д. Со временем, когда ускорители стали достаточно мощными, чтобы наблюдать на них все эти процессы, экспериментально наблюдаемые частоты в точности совпали с предсказаниями теории.

Есть все основания считать, что эта картина свободных кварков и глюонов, которые быстро связываются с новыми кварками и антикварками, так что никто и никогда не сможет наблюдать свободный кварк или глюон, соответствует действительности. Это явление называется *конфайнментом*, или невылетанием кварков, поскольку кварки и глюоны всегда заключены внутри сильно взаимодействующих частиц, таких как протоны и нейтроны, и не могут вылететь из них, без того чтобы не оказаться заключенными внутри вновь созданных сильно взаимодействующих частиц.

Поскольку реальные процессы, за счет которых кварки оказываются заключенными внутри частиц, протекают, когда взаимодействие становится все сильнее и сильнее по мере удаления кварка от его первоначальных компаньонов, стандартные вычислительные методы квантовой теории поля, пригодные для не слишком сильных взаимодействий, перестают работать. Так что эта проверенная экспериментом картина не может в настоящий момент быть полностью подтверждена точными расчетами.

Сможем ли мы когда-нибудь разработать математические инструменты, необходимые для того, чтобы, отталкиваясь от первичных принципов, аналитически продемонстрировать, что конфайнмент действительно представляет собой математическое свойство квантовой хромодинамики? Это вопрос на миллион долларов, причем в буквальном смысле. Математический институт Клэя объявил приз в миллион долларов за строгое математическое доказательство того, что квантовая хромодинамика действительно не допускает появления свободных кварков или глюонов. Хотя ни одного претендента на приз пока не объявилось, у нас все же есть сильные косвенные свидетельства в пользу этой идеи, причем исходят они не только из экспериментальных наблюдений, но и из численных моделей, которые с хорошей точностью соответствуют сложным взаимодействиям квантовой хромодинамики. Это внушает оптимизм, хотя ничего и не гарантирует. Нам еще предстоит подтвердить, что это свойство теории, а не компьютерной модели. Однако для физиков, хотя, может быть, и не для математиков, это выглядит достаточно убедительно.

Последнее прямое подтверждение того, что квантовая хромодинамика верна, пришло из той области, где точные расчеты возможны. Поскольку кварки на коротких расстояниях не абсолютно свободны, то, как я уже упоминал, должны иметь место вычислимые поправки к экзотическим явлениям скейлинга при высокоэнергетических столкновениях электронов с протонами и нейтронами, которые первоначально наблюдались на SLAC. Идеальный скейлинг требовал бы абсолютно невзаимодействующих частиц. Поправки, которые можно рассчитать на основе квантовой хромодинамики, должны наблюдаться только в куда более чувствительных экспериментах, чем те, что первоначально

проводились на SLAC. Их проверка стала возможна лишь после разработки новых ускорителей высоких энергий. Спустя примерно тридцать лет было собрано достаточно данных, чтобы убедиться в соответствии теоретических предсказаний и эксперимента с точностью 1%, и квантовая хромодинамика как теория сильного взаимодействия получила наконец точное подтверждение в своих деталях.

В 2004 г. Гросс, Вильчек и Политцер были наконец удостоены Нобелевской премии за открытие асимптотической свободы. Экспериментаторы, первыми обнаружившие сейлинг на SLAC, — а это было ключевое наблюдение, подтолкнувшее теоретиков в верном направлении, — получили Нобелевскую премию гораздо раньше, в 1990 г. А экспериментаторы, открывшие очарованный кварк в 1974 г., получили Нобелевку всего через два года, в 1976 г.

Но самая большая награда — это, как говорил Ричард Фейнман, не признание в форме медали или денежной премии и даже не похвала из уст коллег или публики, но счастье реально узнать о природе нечто новое.



В этом смысле 1970-е гг. были, возможно, богатейшим десятилетием XX века, если не всей истории физики. В 1970 г. только один тип фундаментальных взаимодействий мы понимали полностью, то есть как квантовую теорию, и это была квантовая электродинамика. К 1979 г. мы разработали и экспериментально проверили величайшее, возможно, теоретическое сооружение, созданное до сего момента человеческим разумом, — Стандартную модель физики элементарных частиц, точно описывающую три из четырех известных взаимодействий в природе. Путь к этой вершине охватывает всю историю современной физики,

начиная с исследования природы движущихся тел Галилеем и последовавшие открытие законов движения Ньютоном, экспериментальное и теоретическое исследование природы электромагнетизма, объединение пространства и времени Эйнштейном, открытие ядра, квантовой механики, протонов, нейтронов, открытие собственно слабого и сильного взаимодействий.

Но самой замечательной чертой на этом долгом пути к свету было то, насколько фундаментальная природа реальности не похожа на те тени реальности, которые мы ежедневно видим вокруг себя, и насколько фундаментальные величины, управляющие, на первый взгляд, нашим существованием, на самом деле вовсе не фундаментальны.

Основными составляющими наблюдаемого вещества являются частицы, которые никому и никогда не удавалось наблюдать непосредственно и которые, если мы правы, никогда и никому не удастся наблюдать непосредственно, — кварки и глюоны. Свойства сил, управляющих взаимодействиями этих частиц, а также частиц, которые более столетия лежали в основе экспериментальной физики, — электронов, на фундаментальном уровне тоже радикально отличаются от свойств, которые мы наблюдаем непосредственно и от которых зависит наше существование. Сильное взаимодействие между протонами и нейтронами — это всего лишь дальнедействующий остаток от лежащего в его основе взаимодействия между кварками, фундаментальные свойства которых маскируются сложными взаимодействиями внутри ядра. Слабое и электромагнитное взаимодействия, которые на поверхности кардинально различаются: одно — близкодействующее, другое — дальнедействующее и вдобавок в тысячи раз сильнее первого, — на самом деле

теснейшим образом связаны и отражают, по существу, разные грани одного и того же целого.

Это целое скрыто от нас из-за природной случайности, мы называем ее спонтанным нарушением симметрии, и она делает эти два взаимодействия — слабое и электромагнитное — отличными друг от друга в мире нашего опыта, скрывает их подлинную природу. Более того, свойства частиц, порождающих характеристики того прекрасного мира, который мы видим вокруг себя, возникают лишь благодаря этому спонтанному нарушению симметрии, которое оставляет безмассовой лишь одну частицу — фотон. Если бы нарушения симметрии не случилось и фундаментальные симметрии взаимодействий, управляющих веществом, проявлялись бы явно, — а это, в свою очередь, означало бы, что частицы, передающие слабое взаимодействие, тоже не имели бы массы, как и большинство частиц, из которых мы состоим, — то не появилось бы ничего из того, что мы видим сегодня во Вселенной: галактик и звезд, планет и людей, птиц и пчел, ученых и политиков.

Более того, мы уже знаем, что даже те частицы, из которых мы состоим, — не всё, что существует в природе. Наблюдаемые частицы объединяются в простые группы, или семейства. Из верхних и нижних кварков образуются протоны и нейтроны. Рядом с ними можно обнаружить электрон и его партнера — электронное нейтрино. Далее, по причинам, которых мы по-прежнему не понимаем, существует более тяжелое семейство, в которое входят очарованный и странный кварки, с одной стороны, и мюон со своим нейтрино — с другой. И наконец, как подтвердили эксперименты в последние десять — двадцать лет, существует третье семейство, в которое входят два новых типа кварков, называемых «преlestным» (b, beauty) и «истинным» (t, truth),

а также сопутствующая им тяжелая версия электрона, называемая таоном (тау-частицей), со своим тау-нейтрино.

Помимо этих частиц, как я скоро расскажу, у нас есть все основания подозревать существование других элементарных частиц, которых пока никто не видел. Эти частицы, образующие, как мы считаем, загадочное темное вещество, на которое приходится большая часть массы нашей Галактики и всех видимых галактик, могут оказаться невидимыми для наших телескопов, но наблюдения и теории указывают на то, что галактики и звезды не смогли бы сформироваться без темного вещества.

И в самой основе сил, управляющих динамическим поведением всего, что доступно нашему взору, лежит очень красивая математическая конструкция, называемая калибровочной симметрией. Все известные нам взаимодействия — сильное, слабое, электромагнитное и даже гравитационное — обладают этим математическим свойством, и для первых трех из них именно оно гарантирует, что наши теории имеют математический смысл, а противные квантовые расходимости исчезают из расчетов всех величин, которые можно сравнить с экспериментально полученными данными.

За исключением электромагнетизма, все симметрии всех остальных взаимодействий остаются полностью скрытыми от наших глаз. Калибровочная симметрия сильного взаимодействия скрыта потому, что конфайнмент, предположительно, прячет от нас фундаментальные частицы, через которые эта симметрия проявляется. Калибровочная симметрия слабого взаимодействия не проявляется открыто в мире, где мы живем, потому что она спонтанно нарушена, в результате чего частицы W и Z стали чрезвычайно массивными.



Тени на стене повседневной жизни — действительно всего лишь тени. И в этом лейтмотив величайшей из когда-либо рассказанных историй, которая медленно разворачивается вот уже более двух тысяч лет с тех пор, как Платон впервые представил эту идею в своей аналогии с пещерой.

Но какой бы замечательной ни была эта история, две серьезнейшие проблемы никуда не делись. Два действующих лица нашего рассказа таковы, что до недавних пор можно было думать, что ее ключевые аспекты — всего лишь сказка, придуманная теоретиками с чрезмерно разыгравшимся воображением.

Во-первых, постулированные в 1960 г. для объяснения слабого взаимодействия W- и Z-частицы, почти в сто раз более массивные, чем протоны и нейтроны, оставались до недавнего времени всего лишь теоретическими конструктами, хотя косвенных свидетельств их существования хватало с избытком. Мало того, было предсказано существование невидимого поля — поля Хиггса, которое пронизывает все пространство, маскируя истинную природу реальности и делая возможным наше существование благодаря спонтанному нарушению симметрии между слабым и электромагнитным взаимодействиями.

Кажется сомнительным делом превозносить историю, которая, по ее же собственному заявлению, описывает, почему мы существуем, но в то же время указывает на невидимое поле, пронизывающее все пространство. Это больше напоминает религиозное торжество, а не научное. Чтобы надежно убедиться, что наши представления соответствуют реальности, а не тому, какой мы *хотели бы* эту реальность видеть, чтобы сохранить достоинство науки, мы просто *должны были* открыть хиггсовское поле. Только тогда мы

смогли бы до конца разобраться, правда ли, что особенности нашего мира, которые мы столь ценим, — на самом деле не более чем особенности случайного ледяного кристалла в морозном узоре на окне. Или, если выражаться точнее, не превосходят по значимости разницы между сверхпроводящим состоянием проводника в лаборатории и нормальным сопротивлением проводов в моем компьютере.

Для решения этой задачи экспериментаторам пришлось приложить не меньше усилий, чем ранее теоретикам для разработки самой теории. Во многих отношениях задача эта была более масштабной: на ее решение ушло более пятидесяти лет и потребовалось создание самого сложного прибора, который когда-либо пытался построить человек.

ПОБЕЖДАЯ ВАКУУМ

...кто ударит тебя в правую щеку твою, обрати к нему и другую...

Мф 5:39

К концу 1970-х гг. теоретики оказались на коне, они ликовали и праздновали триумф. Если путь к Стандартной модели был преодолен так стремительно, то какие еще новые миры ожидают ученых? Мечты о теории всего, давно дремавшие, вновь стали просыпаться, и не только в сумеречных уголках коллективного подсознания теоретиков.

Однако калибровочные частицы W и Z по-прежнему никому не удавалось увидеть, и непосредственное их наблюдение все еще казалось устрашающе сложной задачей. Теория давала точное предсказание их масс — приблизительно в девяносто раз больше массы протона. Сложность получения этих частиц была обусловлена простым физическим обстоятельством.

Фундаментальное уравнение теории относительности Эйнштейна, $E = mc^2$, говорит, что можно превратить энергию в массу, разогнав частицы до энергий, многократно

превышающих их массу покоя. После этого можно направить их в мишень и посмотреть, что получится.

Проблема в том, что энергия, которая доступна для порождения новых частиц при столкновениях со стационарной мишенью, соответствует так называемой энергии центра масс. Для тех, кто не испугается лишней формулы, скажу, что она равна квадратному корню из удвоенного произведения энергии ускоренной частицы и энергии частицы мишени, связанной с ее массой покоя. Представьте, что вы разогнали частицу до стократной энергии массы покоя протона, которая составляет примерно один гигаэлектронвольт (1 ГэВ). Тогда при столкновении со стационарными протонами в мишени энергия центра масс, доступная для создания новых частиц, составит лишь около 14 ГэВ. Эта величина чуть больше энергии центра масс, доступной в самом мощном ускорителе частиц в 1972 г.

Чтобы получить энергии, требуемые для образования массивных частиц, таких как W - и Z -бозоны, необходимо столкнуть два встречных пучка частиц. В этом случае полная энергия центра масс будет равняться просто удвоенной энергии каждого пучка в отдельности. Если каждый из двух сталкивающихся пучков имеет энергию, в сто раз превышающую массу покоя протона, то столкновение даст 200 ГэВ энергии, доступной для превращения в массу новых частиц.

Зачем же тогда строить ускорители со стационарными мишенями вместо коллайдеров? Ответ прост. Если я стреляю пулей в дверь амбара, то более или менее гарантированно во что-нибудь попаду. Однако если я стреляю пулей в другую пулю, летящую навстречу, то мне нужно быть намного более искусным стрелком, чем кто-либо на этом свете, и иметь лучшее ружье, чем любое из произведенных до сих пор, чтобы гарантированно в эту пулю попасть.

Именно такая задача встала перед экспериментаторами в 1976 г., когда наконец они стали воспринимать электрослабую модель достаточно серьезно, чтобы считать, что ее проверка стоит времени, усилий и денег, которые на это потребуются.

Однако никто не знал тогда, как построить установку, позволяющую получить нужную энергию. Ускорять отдельные пучки частиц или античастиц до высоких энергий тогда уже научились. К 1976 г. протоны удавалось разогнать до 500 ГэВ, а электроны — до 50 ГэВ. При более низких энергиях удавалось успешно организовать столкновения электронов и их античастиц, именно так в 1974 г. были открыты новые частицы, содержащие очарованные кварк и антикварк.

Протоны имеют большую массу и, следовательно, большую энергию покоя, поэтому их проще разогнать до высоких энергий. В 1976 г. в ЦЕРН в Женеве был запущен Протонный суперсинхротрон (SPS) — традиционный ускоритель с фиксированной мишенью, работающий с протонным пучком с энергией 400 ГэВ. Однако к моменту его пуска на другом ускорителе в лаборатории имени Ферми возле Чикаго были уже получены протонные пучки с энергией 500 ГэВ. В июне того же года физики Карло Руббиа, Питер Макинтайр и Дэвид Клайн выдвинули на конференции по нейтринно смелое предложение: превратить SPS в машину для столкновений протонов с их античастицами — антипротонами, что потенциально должно было позволить ЦЕРН получить W- и Z-частицы.

Их дерзкая идея состояла в том, чтобы использовать один и тот же кольцевой туннель для ускорения протонов в одном направлении и антипротонов — в другом. Поскольку эти две частицы имеют противоположные электрические

заряды, один и тот же ускоряющий механизм будет оказывать на них противоположное действие. Таким образом, на одном ускорителе принципиально возможно получить два высокоэнергетических пучка, циркулирующих по кольцу в противоположных направлениях.

Логика такого предложения была достаточно прозрачна, но с ее воплощением дело обстояло намного хуже. Прежде всего, учитывая силу слабого взаимодействия, для получения даже нескольких W- и Z-частиц потребовалось бы столкновение сотен миллиардов пар протонов и антипротонов. Но никому еще не удавалось получить и собрать достаточно антипротонов, чтобы сформировать из них пучок в ускорителе.

Далее, вам, наверное, представляется, что если два пучка движутся по одному и тому же туннелю в противоположных направлениях, то частицы в них будут сталкиваться друг с другом на всем протяжении туннеля, а не в детекторах, специально разработанных для регистрации и измерения характеристик продуктов столкновений. Однако на самом деле все обстояло совершенно не так. Сечение даже небольшого туннеля в сравнении с размером области, в которой протон и антипротон могут столкнуться, выглядит настолько огромным, что возникла обратная проблема. Казалось невозможным получить достаточно антипротонов и обеспечить, чтобы они и протоны во встречном пучке были достаточно сжаты, чтобы при сведении обоих пучков, направляемых мощными магнитами, наблюдались бы хоть какие-то столкновения.

Убедить директорат ЦЕРН переделать один из самых мощных в мире ускорителей, построенный в кольцевом туннеле длиной почти восемь километров на француско-швейцарской границе, в коллайдер нового типа было бы трудной

задачей для большинства людей, но Карло Руббиа — воплощение харизматичной стихии — был на это вполне способен. Мало кто из тех, кто умудрился встать на пути Руббиа, не пожалел об этом впоследствии. На протяжении восемнадцати лет он еженедельно летал между ЦЕРН и Гарвардом, где был профессором. Его кабинет располагался двумя этажами ниже моего, но я всегда знал, когда он находился в городе, потому что мне его было слышно. Помимо того, что идея Руббиа была хороша, пробивая ее, он, по существу, предлагал ЦЕРН превратить SPS из отстающей машины в самый впечатляющий ускоритель мира. Шелдон Глэшоу сказал директорату Центра, побуждая их двигаться вперед: «Вы хотите ходить не спеша — или вы хотите летать?»

И все же, чтобы летать, нужны крылья, и разработка нового метода создания, хранения, разгона и фокусировки пучка антипротонов выпала на долю блестящего физика-ускорительщика из ЦЕРН Симона ван дер Мера. Его метод был настолько хитроумен, что многие физики, впервые услышав о нем, думали, что он нарушает некоторые фундаментальные принципы термодинамики. Характеристики частиц в пучке должны были измеряться в одном месте кольцевого туннеля, после чего на магниты дальше по туннелю поступал сигнал дать множество мелких корректирующих толчков пролетающим частицам пучка, слегка меняя таким образом энергии и импульсы попутных частиц, чтобы все они в итоге сфокусировались в узкий пучок. Этот метод, получивший название стохастического охлаждения, помогал добиться того, чтобы частицы, слегка отклонившиеся от центральной оси пучка, направлялись бы обратно в его середину.

Совместными усилиями ван дер Мер и Руббиа упорно проталкивали проект, и к 1981 г. коллайдер уже работал,

как и планировалось, а Руббиа собрал крупнейшую физическую коллаборацию в истории и построил большой детектор, способный разобраться в миллиардах столкновений протонов с антипротонами в поисках горстки возможных W - и Z -частиц. Однако команда Руббиа была не единственной, кто занимался охотой на эти частицы. В ЦЕРН была собрана еще одна коллаборация и построен еще один детектор. В таких важных экспериментах избыточность представлялась вполне уместной.

Отыскать нужный сигнал среди необъятного фона в этих экспериментах было непросто. Не забывайте, что протоны состоят не из одного кварка и в единичном столкновении протона с антипротоном может произойти множество разных вещей. Более того, ни W -, ни Z -частицы нельзя наблюдать непосредственно, а только по продуктам их распада, в случае W -бозона это электроны и нейтрино. Нейтрино тоже невозможно наблюдать непосредственно. Экспериментаторам следовало суммировать полную энергию и импульс всех исходящих частиц в каждом перспективном событии и искать случаи с большим количеством «пропавшей энергии» — это сигнализировало бы об образовании нейтрино.

К декабрю 1982 г. Руббиа и его коллегам удалось пронаблюдать событие, которое можно было считать кандидатом на обнаружение W -частицы. Руббиа не терпелось опубликовать статью на базе этого единственного события, но его коллеги были осторожнее, и не без оснований. За Руббиа числилась целая серия открытий, которые впоследствии не всегда находили подтверждение. Но пока суд да дело, он по секрету сообщил подробности полученных результатов коллегам по всему миру.

За несколько следующих недель его команда UA1 получила свидетельства еще пяти событий — кандидатов

на обнаружение W -бозона, а физики его коллаборации разработали несколько куда более строгих тестов, позволявших надежно подтвердить реальность этих кандидатов. 20 января 1983 г. Руббиа провел в ЦЕРН блестящий и надолго запомнившийся семинар, где и представил полученные результаты. Ему аплодировали стоя, что ясно показывало: полученные данные убедили физическое сообщество. Через несколько дней Руббиа подал в журнал *Physics Letters* статью, в которой объявил об обнаружении шести W -событий. W -частица была обнаружена, и масса ее в точности соответствовала предсказанной.

Однако поиск на этом не закончился. Предстояло еще обнаружить Z -бозон. Предсказанная для нее масса была немного больше, чем у W -бозона, а потому получить ее сигнал было немного сложнее. Тем не менее примерно через месяц после объявления об открытии W -бозона оба эксперимента начали поставлять данные о Z -событиях, и на базе одного такого четкого события 27 мая того же года Руббиа объявил об открытии Z -частицы.

Калибровочные бозоны электрослабой модели были найдены. Значение этих открытий для укрепления эмпирической базы Стандартной модели лишний раз подчеркнуто тем, что чуть более чем через год после объявления об этих открытиях Руббиа и его коллега по ускорителю ван дер Мер были удостоены Нобелевской премии по физике. Хотя в строительстве и эксплуатации ускорителя и детекторов участвовало огромное количество людей, мало кто осмелился бы отрицать, что без упорства и настойчивости Руббиа и без хитроумного изобретения ван дер Мера это открытие было бы невозможно.

Итак, остался последний не найденный святой Грааль — предсказанная частица Хиггса. В отличие от W - и Z -бозонов,

масса бозона Хиггса *не устанавливается* теорией. Ее связи с веществом и с калибровочными бозонами были предсказаны, поскольку эти связи позволяют фоновому хиггсовскому полю, предположительно существующему в природе, разрушать калибровочную симметрию и придавать массу не только W- и Z-частицам, но и электронам, мюонам и кваркам — вообще всем фундаментальным частицам Стандартной модели, за исключением нейтрино и фотона. Однако ни масса частицы Хиггса, ни сила ее самовзаимодействий по отдельности не определялись заранее по существовавшим на тот момент измерениям. Теория лишь связывала отношение этих величин с измеренной силой слабого взаимодействия между известными частицами.

По консервативным оценкам возможной величины силы самовзаимодействия частицы Хиггса ее масса столь же сдержанно оценивалась как лежащая в диапазоне от 2 до 2000 ГэВ. Верхний предел определялся тем, что, если самосвязывание частицы Хиггса окажется слишком сильным, теория станет относиться уже к сильному взаимодействию и многие расчеты, выполненные с использованием простейшей модели бозона Хиггса, окажутся неверны.

Помимо важной роли бозона Хиггса в разрушении электрослабой симметрии и придании массы другим элементарным частицам, остальные количественные характеристики этой частицы оставались на тот момент экспериментально практически не определенными. Вероятно, именно поэтому Шелдон Глэшоу в 1980-е гг. называл бозон Хиггса «туалетом» современной физики: все знали, что он безусловно существует, но никто не хотел подробно обсуждать его публично.

То, что Стандартная модель не устанавливала заранее многие детали хиггсовского сектора, не мешало большому

числу теоретиков предлагать модели, «предсказывавшие» массу частицы Хиггса на основании неких новых теоретических идей. В начале 1980-х гг. всякий раз, когда ускорители повышали доступные ученым энергии, выходили новые физические статьи с предсказаниями, согласно которым частица Хиггса должна непременно обнаружиться, как только новая машина будет включена. Затем этот новый порог преодолевался, но, вопреки предсказаниям, ничего не наблюдалось. Становилось ясно, что для исследования всего возможного пространства параметров придется строить принципиально новый ускоритель.

Все описываемое время я был убежден, что частицы Хиггса не существует. Спонтанное нарушение электрослабой калибровочной симметрии определенно имеет место, потому что W - и Z -частицы существуют и имеют массу, но введение в картину нового фундаментального скалярного поля, придуманного специально для выполнения этой задачи, казалось мне искусственным. Во-первых, никакого другого фундаментального скалярного поля в природном зоопарке частиц никогда не наблюдалось. Во-вторых, я считал, что с учетом всей той неизвестной физики, которую нам только предстояло открыть на малых масштабах, природа могла бы придумать куда более хитрый и неожиданный способ нарушения калибровочной симметрии. Стоит постулировать существование частицы Хиггса, и встает следующий очевидный вопрос: «А почему так?» Или конкретнее: «Откуда берется нужная динамика, которая заставляет его сконденсироваться именно на этом масштабе, именно с этой массой?» Я считал, что природа нашла бы способ разбить теорию без такого произвола, и я весьма решительно выражал это свое убеждение, когда проходил собеседование как кандидат в члены

Гарвардского общества исследователей после получения докторской степени.

А теперь давайте вспомним, что следует из существования механизма Хиггса. Этот механизм требует существования в природе не только новой частицы, но и невидимого фонового поля, которое должно пронизывать все пространство. Он подразумевает также, что все частицы — не только W - и Z -бозоны, но также и электроны, и кварки — в фундаментальной теории являются безмассовыми. Эти частицы взаимодействуют с фоновым хиггсовским полем и испытывают затем своего рода сопротивление движению, замедляющее их до субсветовых скоростей, — так пловец в патоке будет плыть медленнее, чем в воде. А двигаясь с субсветовой скоростью, частицы ведут себя так, будто обладают массой. Те частицы, которые сильнее взаимодействуют с этим фоновым полем, испытывают большее сопротивление и ведут себя так, будто они более массивны, — так, автомобиль, съехавший с асфальта в грязь, становится труднее толкать, чем по дороге, и толкающим он будет казаться тяжелее.

Все это очень сильное утверждение о природе реальности. Помня, что в сверхпроводниках образующийся конденсат представляет собой сложное состояние связанных пар электронов, я скептически относился к тому, что на фундаментальных масштабах в пустом пространстве все может работать намного проще и чище.

Но как можно исследовать столь замечательное утверждение? Мы используем для этого центральное свойство квантовой теории поля, которым воспользовался и Хиггс, когда предлагал свою идею. Для каждого нового поля в природе должен существовать по крайней мере один новый тип элементарных частиц с этим полем. Но как получить

эти частицы, если фоновое поле заполняет собой все пространство?

Очень просто. Мы *отшлепаем* вакуум.

Я имею в виду, что, если мы сможем сфокусировать достаточно энергии в одной точке пространства, мы можем тем самым спровоцировать появление реальных частиц Хиггса, и их можно будет измерить. Это можно представить примерно так. Говоря языком физики элементарных частиц, используя фейнмановские диаграммы, мы можем считать, что виртуальная частица Хиггса появляется из фонового хиггсовского поля, придавая массу другим частицам. Левая диаграмма соответствует рассеянию частиц, таких как кварки и электроны, на виртуальной частице Хиггса; частицы отклоняются от своего маршрута, испытывая, таким образом, сопротивление своему движению вперед. На правой диаграмме представлен тот же эффект для таких частиц, как W и Z.



Эту картинку мы легко можем развернуть.



В этом случае можно представить, что энергичные частицы, такие как W и Z, или кварки и/или антикварки, или электроны и/или позитроны испускают виртуальные

частицы Хиггса и испытывают отдачу. Если энергии входящих частиц достаточно велики, то испущенная частица Хиггса может оказаться реальной. Если энергии недостаточно, частица будет виртуальной.

А теперь вспомним, что если частица Хиггса придает другим частицам массу, то сильнее всего она будет взаимодействовать с самыми массивными частицами. Это означает, что легкие частицы, такие как электроны, вероятно, не слишком подходят для непосредственного создания частиц Хиггса на ускорителе. Вместо этого можно представить себе ускоритель с энергией, достаточной для создания тяжелых виртуальных частиц, которые, в свою очередь, будут выплевывать частицы Хиггса — как виртуальные, так и реальные.

Естественными кандидатами на роль инструмента в таком деле являются протоны. Нужно построить ускоритель или коллайдер, который будет начинать с протонов и разгонять их до таких высоких энергий, чтобы образовывалось достаточно тяжелых виртуальных составляющих, способных порождать частицы Хиггса. Эти частицы Хиггса, виртуальные или реальные, будучи тяжелыми, быстро распадутся на более легкие частицы, с которыми бозон Хиггса взаимодействует сильнее всего, — опять же это будут либо истинные или прелестные кварки, либо W - или Z -частицы. Они, в свою очередь, тоже распадутся на другие частицы.

Далее фокус будет состоять в том, чтобы рассмотреть события с наименьшим числом выходящих частиц, которые можно четко засечь, чтобы затем точно определить их энергии и импульсы, и посмотреть, нельзя ли реконструировать серию событий, которая восходила бы к единственной массивной промежуточной частице с предсказанными бозона Хиггса взаимодействиями. Неслабая задачка!

Принципиально это все было понятно уже в 1977 г., еще даже до открытия истинного кварка. (Поскольку прелестный кварк был уже открыт, а все остальные кварки существуют слабыми парами — нижний и верхний, странный и очарованный, — было ясно, что должен существовать еще один кварк, хотя открыть его удалось только в 1995 г. и оказался он в чудовищные 175 раз тяжелее протона.) Однако знать, что необходимо сделать, и на самом деле построить машину, способную это сделать, — две совершенно разные вещи.

ГОТИЧЕСКИЕ СОБОРЫ XXI ВЕКА

...приобретение премудрости выше рубинов.

Иов 28:18

Ускорение протонов до достаточно высоких энергий для исследования полного диапазона возможных масс частицы Хиггса далеко выходило за рамки возможностей любой установки в 1978 г., когда были подтверждены все остальные предсказания теории электрослабого взаимодействия, или в 1983 г., когда были открыты W- и Z-частицы. Требовался ускоритель по крайней мере на порядок мощнее самой мощной из существовавших на тот момент установок. Короче говоря, требовался не просто коллайдер, а суперколлайдер.

У Соединенных Штатов, игравших на протяжении всего периода после окончания Второй мировой войны лидирующую роль в науке и технике, была серьезная причина желать построить такую установку. В конце концов, ЦЕРН в Женеве к 1984 г. стал в физике элементарных частиц ведущей лабораторией мира. Американскую гордость

так сильно задело то, что и W-, и Z-частицы были открыты в ЦЕРН, что шесть дней спустя после пресс-конференции, на которой объявили об открытии Z-частицы, *The New York Times* опубликовала редакционную статью под заголовком «Европа — три, США — даже не зеро!»*

Прошла неделя после открытия Z-частицы, а американские физики уже решили прекратить строительство средних размеров ускорителя на Лонг-Айленде и пойти ва-банк. Они решили построить громадный ускоритель с энергией центра масс почти в сто раз большей, чем была доступна на установке SPS в ЦЕРН. Для этого им потребовались бы новые сверхпроводящие магниты, поэтому и свое будущее детище они назвали Сверхпроводящим суперколлайдером (SSC).

После того как в 1983 г. этот проект был предложен сообществом американских специалистов по физике элементарных частиц, между разными штатами разгорелась традиционная борьба за лакомый кусок громадного денежного пирога, связанного со строительством и дальнейшей эксплуатацией ускорителя. После множества политических и научных схваток для строительства было выбрано место в Техасе возле городка Ваксахачи, чуть южнее Далласа. Какими бы соображениями ни руководствовались выбиравшие, Техас представлялся вполне подходящим местом, поскольку всё в этом проекте, утвержденном в 1987 г. президентом Рейганом, говорило об огромных масштабах.

Громадный подземный туннель должен был иметь длину восемьдесят семь километров и стать крупнейшим туннелем в истории человечества. Вообще, проект был в двадцать раз крупнее любого другого проекта в физике, который

* В оригинале: «Europe 3, U. S. Not Even Z-Zero». — *Прим. ред.*

когда-либо пытались реализовать. Предполагаемая энергия столкновений двух пучков, в каждом из которых частицы имели бы энергию, в двадцать тысяч раз больше массы протона, была бы примерно в сто раз больше, чем энергия столкновения частиц на том ускорителе в ЦЕРН, где были открыты W- и Z-частицы. При строительстве потребовалось бы десять тысяч сверхпроводящих магнитов беспрецедентной силы.

Из-за постоянного превышения расходов, отсутствия международного сотрудничества, плохого состояния экономики США и политических махинаций проект SSC был закрыт в октябре 1993 г. Я хорошо помню то время. Незадолго до этого я ушел из Йельского университета, чтобы возглавить кафедру физики в Кейсовском университете Западного резервного района, имея разрешение перестроить кафедру и пригласить в течение пяти лет двенадцать новых членов факультета. Первый год мы рекламировали себя, а затем, в 1993–1994 гг., получили более двухсот заявок от ведущих ученых, которые до этого работали в проекте SSC, а теперь оказались без работы и каких-либо перспектив. Многие из них были аксакалами, оставившими профессорские посты в престижных университетах ради того, чтобы направлять работы по проекту. Это было тяжелое время, и более половины из этих людей были вынуждены навсегда оставить физику элементарных частиц.

Предполагаемая стоимость проекта успела вырасти с первоначальных 4,4 миллиарда долларов в 1987 г. до примерно 12 миллиардов долларов на момент закрытия в 1993 г. Хотя это было — да и сегодня остается — большой суммой, можно спорить, стоило ли закрывать проект. Два миллиарда долларов были уже потрачены, двадцать четыре километра туннеля — построены.

Решение о закрытии проекта нельзя оценить однозначно, но нельзя не отметить, что при его принятии следовало бы учесть множество вещей, о которых никто не подумал, — от «цены выбора», связанной с потерей Соединенными Штатами заметной доли талантливых физиков-ускорительщиков и экспериментаторов в области физики элементарных частиц, до утраты множества прорывных открытий, которые могли бы стать результатом вложений в высокотехнологичное развитие и внести вклад в нашу экономику. Более того, если бы SSC был построен и функционировал, как планировалось, мы, возможно, уже более десяти лет как знали бы ответы на экспериментальные вопросы, над которыми работаем до сих пор. Повлияли бы эти ответы на какие-то наши действия в этот период? Вероятно, мы никогда этого не узнаем.

Пресловутые 12 миллиардов долларов были бы потрачены в течение десяти-пятнадцати лет, пока шли строительство и ввод коллайдера в строй; в результате стоимость проекта составила бы порядка 1 миллиарда долларов в год. Для федерального бюджета США это немного. Мои собственные политические взгляды хорошо известны, поэтому никого не удивит, к примеру, если я скажу, что безопасность США не пострадала бы, если бы оборонный бюджет страны уменьшился на эту сумму — это намного меньше одного процента от ежегодных расходов. Более того, полная стоимость SSC, вероятно, была бы сравнима с расходами на транспорт и кондиционирование воздуха во время катастрофического вторжения в Ирак в 2003 г., в результате которого наша общая безопасность и благополучие только ухудшились. Не могу не упомянуть еще раз показания Роберта Уилсона на слушаниях в конгрессе по поводу ускорителя лаборатории имени Ферми: «Это не имеет прямого

отношения к защите нашей страны и только помогает сделать ее достойной защиты».

Однако это все политика, а не наука, и в демократической стране конгресс, представляя народ, имеет право и обязанность следить за приоритетностью расходования средств на крупные общественные проекты. Сообщество ученых в области физики частиц, возможно, слишком привыкло за время холодной войны к постоянному вливанию средств и не позаботилось как следует о том, чтобы информировать публику и конгресс о целях и задачах проекта. Неудивительно поэтому, что в период суровой экономии первыми под нож попали расходы на то, что выглядело слишком эзотерическим. Я тогда недоумевал, почему нужно непременно уничтожить проект, а не заморозить финансирование и не отложить реализацию до лучших времен — когда, к примеру, улучшится состояние экономики или какие-нибудь технические новшества позволят заметно снизить стоимость строительства. Ни туннель (в настоящее время затопленный), ни лабораторные здания (их сейчас занимает какая-то химическая компания) никуда не делись бы.

Невзирая на происходящее в Соединенных Штатах, ЦЕРН продолжал работу над новой установкой — Большим электрон-позитронным коллайдером LEP, спроектированным по настоянию нового нобелевского лауреата, неукротимого Карло Руббиа, для подробного исследования физики W- и Z-бозонов. Он стал директором лаборатории в 1989 г. — в том самом году, когда новая установка вступила в строй.

Кольцевой туннель длиной двадцать семь километров был прорыт под землей на глубине примерно ста метров вокруг старой установки SPS, которая теперь использовалась для впрыска электронов и позитронов в большее кольцо, где

они затем ускорялись до громадных энергий. Новая установка, расположенная на окраине Женевы, была достаточно велика, чтобы пройти под Юрскими горами и зайти на территорию Франции. У европейских стран больше опыта в строительстве туннелей, чем у США, и, когда строительство туннеля было завершено, два его конца встретились с точностью до сантиметра. Кроме того, ЦЕРН является международной организацией с участием многих стран, и его проекты не ложатся на бюджеты стран-участниц очень уж тяжким бременем.

Новая установка успешно работала десять с лишним лет, и после закрытия проекта SSC в США большой туннель LEP рассматривался как удачный кандидат на создание уменьшенной версии SSC — не настолько мощной, но все же достаточно высокоэнергетической, чтобы исследовать значительную часть пространства параметров, где возможно существование искомой частицы Хиггса. Некоторую конкуренцию такой установке мог составить ускоритель в лаборатории имени Ферми, известный как «Теватрон», работавший с 1976 г., а в 1984 г. ставший мощнейшим в мире коллайдером протонов и антипротонов. К 1986 г. энергия столкновения протонов и антипротонов, циркулирующих в Фермилабе по 6,5-километровому кольцу сверхпроводящих магнитов, почти в две тысячи раз превышала энергию, эквивалентную массе покоя протона.

Несмотря на значительность этого достижения, его было недостаточно, чтобы исследовать большую часть пространства параметров бозона Хиггса, так что открыть его на «Теватроне» можно было только при большой удаче и снисхождении природы. За «Теватроном» все же числился один очень серьезный успех, давно ожидаемое открытие: на нем был получен увесистый истинный кварк, который

в 175 раз тяжелее протона и является самой массивной частицей, обнаруженной по сей день в природе.

Спустя четырнадцать месяцев после кончины SSC совет ЦЕРН без всякой конкуренции одобрил строительство в туннеле LEP новой установки — Большого адронного коллайдера (БАК), по-английски называемого Large Hadronic Collider (LHC). На разработку проекта, конструирование установки и ее детекторов должно было уйти некоторое время, так что установке LEP предстояло работать в своем туннеле еще почти шесть лет и только потом закрыться на реконструкцию. После этого еще почти десять лет предстояло строить новую установку и детекторы частиц для использования в поисках частицы Хиггса и/или других новых физических явлений.

То есть на все это можно было бы рассчитывать, *если бы* удалось создать работающую установку и подходящие детекторы. А это представляло собой сложнейшую инженерную задачу, за решение которой когда-либо брался человек. Технические требования к сверхпроводящим магнитам, вычислительным мощностям и многим другим аспектам установки и детекторов предполагали технологии куда более высокого уровня, чем те, что имелись на тот момент в распоряжении ученых.

На концептуальный проект установки ушел целый год, а еще годом позже были утверждены предложения двух коллабораций, отвечавших за основные экспериментальные детекторы. США, которым в этой гонке ставить было не на кого, были приняты в ЦЕРН в статусе «наблюдателя», что позволило американским физикам стать ключевыми игроками в разработке и проектировании детекторов. В 1998 г. сооружение полости, которая должна была вместить один из двух основных приборов, детектор CMS,

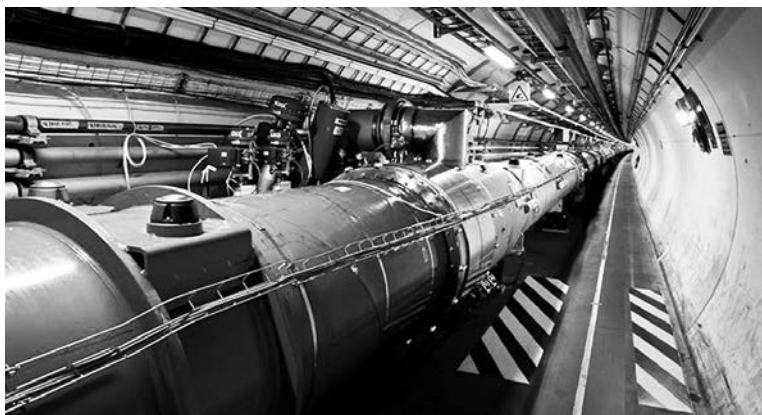
пришлось задержать на полгода, поскольку рабочие обнаружили на строительной площадке галло-римские руины, в том числе виллу и окружающие ее поля.

Через четыре с половиной года громадные подземные пустоты для размещения двух главных детекторов были готовы. За два следующих года 1232 громадных магнита по пятнадцать метров длиной и тридцать пять тонн весом каждый были опущены под землю на глубину пятидесяти метров через специальную шахту и доставлены на предназначенные для них места при помощи специально спроектированного погрузчика, способного перемещаться по туннелю. Через год после этого на место были опущены последние кусочки каждого из двух больших детекторов, и 10 сентября 2008 г. в 10:28 установка первый раз была официально включена.

Через две недели разразилась катастрофа. В коннекторе одного из магнитов произошло короткое замыкание, из-за которого соответствующий сверхпроводящий магнит перешел в обычное, не сверхпроводящее состояние, высвободив громадное количество энергии и вызвав механические повреждения и утечку жидкого гелия из системы охлаждения. Повреждения оказались достаточно обширными, чтобы потребовалась доработка проекта и проверка всех паяк и соединений БАКа; на работы ушло больше года. В ноябре 2009 г. Большой адронный коллайдер наконец вновь заработал, но из-за опасений за конструкцию в режиме разгона только до семи тысяч эквивалентных масс протона (по отношению к центру масс), а не четырнадцати тысяч, как было задумано. 19 марта 2010 г. установка начала работать со столкновением пучков на этих сниженных энергиях, и в течение двух недель оба детектора начали регистрировать столкновения с соответствующей суммарной энергией.

Эта сухая хроника ничего не говорит о тех невероятно сложных технических задачах, которые приходилось решать в ЦЕРН на протяжении пятнадцати лет с того момента, когда впервые прозвучало предложение о строительстве установки. Если выглянуть из окна самолета перед посадкой в аэропорту Женевы, увидишь только слегка холмистые ухоженные поля и горы в отдалении. Если не знать заранее, то невозможно догадаться, что под этими полями находится самая сложная машина из всех, когда-либо построенных человеком. Рассмотрим некоторые характеристики установки, залегающей кое-где на глубине 175 метров под этим безмятежным пасторальным ландшафтом.

1. В туннеле шириной 3,8 метра и длиной 27 километров располагаются два параллельных кольцевых канала для пучков, которые пересекаются в четырех точках по окружности. Вдоль кольца располагаются более тысячи шестисот сверхпроводящих магнитов, большинство из которых весит более двадцати семи тонн. Туннель настолько длинен, что его кривизна почти незаметна, если посмотреть вдоль.



2. Для того чтобы обеспечивать работу магнитов при температуре менее двух градусов над абсолютным нулем, то есть при температуре ниже, чем у космического микроволнового фона в глубинах межзвездного пространства, используется 96 тонн сверхтекучего ^4He . Всего используется 120 тонн жидкого гелия, который сперва охлаждают при помощи примерно десяти тысяч тонн жидкого азота. Для этого пришлось изготовить около сорока тысяч герметичных трубных соединений. Объем используемого гелия делает БАК крупнейшей криогенной установкой в мире.
3. Вакуум в каналах, по которым движутся пучки, по техническим требованиям должен быть более разреженным, чем вакуум открытого космоса, с которым сталкиваются астронавты при выполнении задач на внешней поверхности МКС; давление в них должно быть в десять раз ниже атмосферного давления на Луне. Наибольший объем на БАКе, где поддерживается такой вакуум, составляет девять тысяч кубических метров, что сравнимо с внутренним объемом крупного собора.
4. После разгона по туннелю в том или ином направлении протоны движутся со скоростью 0,999999991 скорости света, или всего примерно на 3 метра в секунду медленнее, чем свет. Энергия, которой обладает каждый протон при столкновении, эквивалентна энергии летящего комара, но сконцентрированной в радиальном объеме, в миллион миллионов раз меньшем размера этого комара.
5. Каждый пучок протонов складывается из 2808 отдельных сгустков, стискиваемых в точке столкновения

до толщины примерно в четверть толщины человеческого волоса; в каждой сгустке насчитывается 115 миллиардов протонов. Сгустки сталкиваются между собой каждую двадцатипятимиллиардную долю секунды, и всего за секунду происходит более 600 миллионов событий — столкновений частиц.

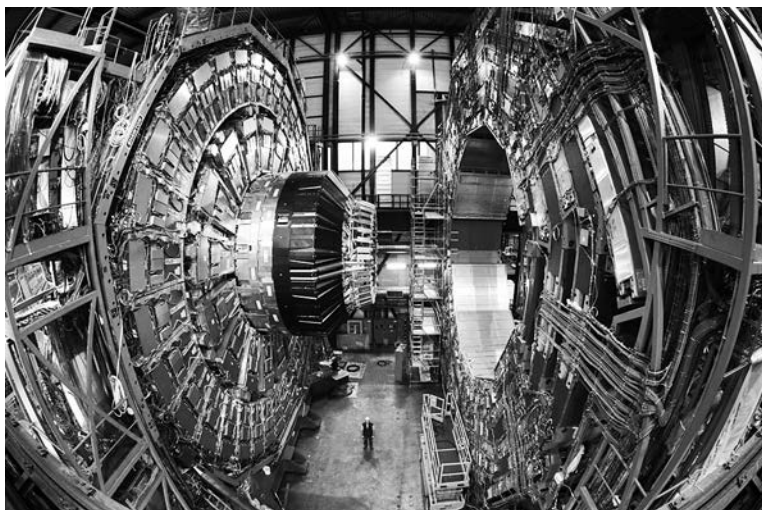
6. Распределенная компьютерная сеть, разработанная для обработки данных с БАКа, является крупнейшей в мире. Необработанных данных, получаемых с установки за секунду, хватило бы, чтобы заполнить более тысячи терабайтных жестких дисков. Для шести миллионов миллиардов протон-протонных столкновений, проанализированных в одном только в 2012 г., было обработано более двадцати пяти тысяч терабайт данных — больше, чем содержится информации во всех когда-либо написанных книгах; для хранения этой информации потребовалась бы стопка CD-дисков около двадцати километров высотой. Для этого была создана распределенная по миру компьютерная сеть с 170 компьютерными центрами в тридцати шести странах. Когда установка работает, она производит около семисот мегабайт данных в секунду.
7. От тысячи шестисот магнитов требуется сформировать пучки достаточной интенсивности для столкновения, что эквивалентно требованию выстрелить двумя иглами с расстояния в десять километров с такой точностью, чтобы они столкнулись ровно на полпути между двумя точками стрельбы.
8. Настройка пучков настолько точна, что в расчет необходимо брать даже приливные явления, связанные

с притяжением Луны и изменением ее положения над Женевой; под действием этих сил окружность БАКа ежедневно меняется на один миллиметр.

9. Чтобы сгенерировать невероятно интенсивные магнитные поля, необходимые для разгона протонных пучков, через каждый из сверхпроводящих магнитов течет ток силой около двенадцати тысяч ампер — это примерно в тысячу раз превышает ток, текущий по проводам в обычном семейном доме.
10. Кабели, из которых намотаны магнитные катушки коллайдера, имеют длину около 270 тысяч километров, что более чем в шесть раз превосходит окружность Земли. А если эти кабели распустить на отдельные жилы, то они протянулись бы до Солнца и обратно более пяти раз.
11. Полная энергия каждого пучка примерно соответствует энергии четырехсоттонного поезда, несущегося со скоростью 150 километров в час. Этой энергии хватило бы, чтобы расплавить пятьсот килограммов меди. А энергия, запасенная в сверхпроводящих магнитах, в тридцать раз превосходит эту величину.
12. Даже с учетом сверхпроводящих магнитов — а именно они позволяют сделать энергопотребление установки приемлемым — во время работы коллайдер расходует примерно столько же электричества, сколько потребляют суммарно все жители Женевы.

Но достаточно рассказывать о самой установке. Для анализа столкновений на БАКе было построено несколько различных больших детекторов. Каждый из четырех функционирующих в настоящее время по размеру примерно

соответствует изрядному офисному зданию, а по сложности — крупной лаборатории. Спускаясь под землю, чтобы посмотреть на детекторы, чувствуешь себя Гулливером в Бробдингнеге. Масштабы абсолютно всех компонентов детектора потрясают. Вот фотография детектора CMS, меньшего из двух больших детекторов БАКа.



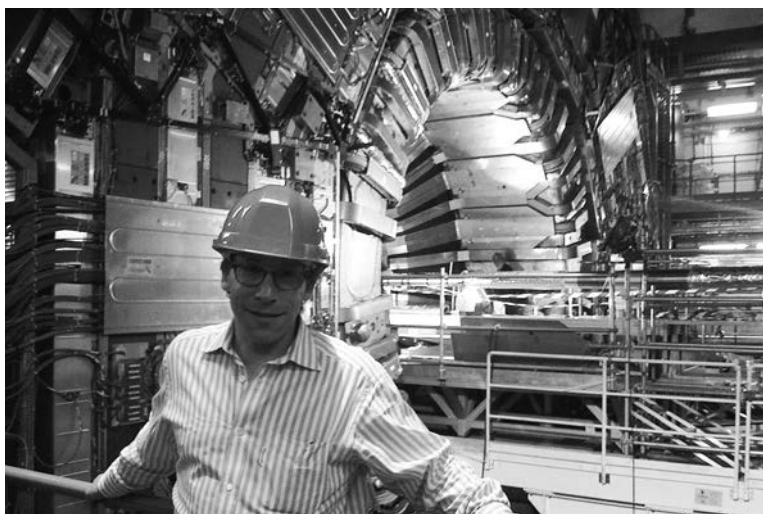
Находясь возле детектора, трудно даже целиком охватить его взглядом; в этом можно убедиться на снимке детектора и автора, сделанном с меньшего расстояния.

Сложность этих устройств почти невообразима. Такому теоретику, как я, трудно представить, как одна-единственная группа физиков, какой бы она ни была, может следить за работой этого устройства, а тем более спроектировать и построить его в точном соответствии с техническими требованиями.

Каждый из двух крупнейших детекторов, ATLAS и CMS, был построен при сотрудничестве более чем двух тысяч

ученых. Более десяти тысяч ученых и инженеров из ста с лишним стран участвовали в строительстве коллайдера вместе с детекторами. Рассмотрим меньший из двух детекторов, CMS. Его размеры составляют более двадцати метров в длину, пятнадцать метров в высоту и пятнадцать — в ширину. На его сооружение пошло около 12 500 тонн стали — больше, чем на Эйфелеву башню. Когда с детектором что-то делают, две его половинки разводят на несколько метров друг от друга. И хотя они не стоят на колесах, при включении мощного магнитного поля детектора их стянуло бы вместе.

Каждый детектор состоит из миллионов составных частей, в нем есть трекары, способные измерять траектории частиц с точностью до десятиллионных долей метра, есть калориметры, с высокой точностью регистрирующие энергию, передаваемую частицами детектору, есть и устройства для измерения скорости частиц по их излучению, испускаемому при прохождении через детектор. В каждом столкновении рождаются сотни или даже тысячи отдельных частиц,



и детектор должен отследить почти все и дать ученым возможность реконструировать каждое событие.

Физик Виктор Вайскопф, четвертый генеральный директор ЦЕРН в 1961–1966 гг., однажды сравнил большие ускорители того времени с готическими соборами средневековой Европы. В контексте ЦЕРН и БАКа это сравнение звучит особенно интересно.

Готические соборы строились на пределе, а то и за пределами технических возможностей своего времени и требовали создания новых строительных технологий и новых инструментов. Сотни или даже тысячи лучших мастеров из десятков стран возводили их на протяжении многих десятилетий. По сравнению с ними любые уже существовавшие на тот момент здания казались карликами. И весь практический смысл их сооружения состоял в том, чтобы восславить Господа.

БАК представляет собой самую сложную машину из всех когда-либо построенных человеком, и для его сооружения потребовалось разработать новые строительные технологии и новые инструменты. Чтобы создать ускоритель и работающие на нем детекторы, потребовались почти два десятилетия усилий тысяч дипломированных ученых и инженеров из более чем сотни стран, говорящих на десятках языков и происходящих из обществ, исповедующих по крайней мере столько же религий. Масштаб этого сооружения затмевает размеры всех машин, построенных до него. И весь практический смысл их сооружения состоял в том, чтобы восславить и исследовать красоту природы.

С этой точки зрения и соборы, и коллаيدر представляют собой памятники лучшим, возможно, качествам человеческой цивилизации — способности и готовности придумывать и создавать объекты таких масштабов и такой

сложности, что требуется сотрудничество множества отдельных людей со всего света, с целью превратить наше изумление и восхищение устройством космоса в нечто конкретное, что может в будущем улучшить жизнь человека. И коллаидеры, и соборы представляют собой несравненные по величию творения, прославляющие опыт человечества в разных областях. Тем не менее я считаю, что БАК побеждает в состязании с соборами, и его успешное строительство за два десятилетия наглядно демонстрирует, что XXI век пока не лишился культуры и воображения.

И тут мы наконец возвращаемся к тому, что привело нас к 4 июля 2012 г.

К 2011 г. БАК находился в крейсерском режиме, как выразился один из руководителей ЦЕРН. Количество данных, собранных к октябрю того года, уже в четыре миллиона раз превышало то, что было получено при первом запуске в 2010 г., и в тридцать раз — то, что было получено к началу 2011 г.

В этот период сбора данных, о которых физики мечтали сорок лет, по сообществу стали разлетаться слухи, причем многие из них исходили от самих экспериментаторов. Я работаю по совместительству в Австралийском национальном университете в Канберре, а Международная конференция по физике высоких энергий должна была состояться в июле 2012 г. в Мельбурне. Там работает много сотрудников БАКа, и во время своих визитов я постоянно слышал, как экспериментальные данные исключают все больше и больше областей из диапазона возможных масс для бозона Хиггса.

Многих экспериментаторов хлебом не корми, дай только доказать, что теоретики не правы. Так было и в этом случае. Одна участница эксперимента возбужденно сообщила мне меньше чем за полгода до той встречи, что почти

весь диапазон возможных масс частицы Хиггса уже проверен и частицы не обнаружено, остался лишь небольшой участок между 120 и 130 массами протона. Она считала, что к июлю и эту область удастся проверить и исключить. Я, как человек, не слишком веривший в существование бозона Хиггса, не расстроился при этом известии. Более того, я готовил статью, в которой объяснял, почему бозона Хиггса может и не существовать в природе.

Ситуация стала интереснее 5 апреля, поскольку энергию частиц пучка в системе центра масс на БАКе немного увеличили — до восьми тысяч энергий покоя протона. Это, естественно, означало расширение возможностей для открытия новой частицы. К середине июня было объявлено, что руководители двух главных экспериментов и генеральный директор ЦЕРН не приедут в Мельбурн, но представят результаты дистанционно в режиме телеконференции утром 4 июля в главном конференц-зале ЦЕРН — в том же помещении, где Руббиа в свое время объявил об открытии W-частиц.

4 июля я был на физическом семинаре в Аспене (штат Колорадо). Учитывая важность предстоящего заявления, физическое сообщество организовало там экран для удаленной презентации в онлайн-режиме, так что в час ночи мы все могли усесться перед экраном и наблюдать, как творится история. В темном зале Аспенского центра собрались около пятнадцати человек — по большей части физики, хотя было там и несколько журналистов, включая и Денниса Овербая из *The New York Times*; он знал, что ему предстоит ночная работа. Как оказалось, ночная работа предстояла и мне. *Times* заказал мне очерк для следующего выпуска еженедельной научной рубрики, если все пойдет, как ожидалось.

Затем началось шоу, и следующие примерно сорок пять минут докладчики от коллабораций представляли данные с обоих больших детекторов, убедительно демонстрировавшие существование новой элементарной частицы с массой около 125 масс протона. После первоначальной аварии в 2009 г. БАК и оба детектора работали безукоризненно. В первые месяцы меня и многих моих коллег поражали безупречно чистые результаты, которые выдавали детекторы по известным фоновым процессам. Так что нас не удивило, что при появлении в картине чего-то нового эти детекторы смогли это новое обнаружить, несмотря на невероятно сложную среду, в которой им приходилось работать.

Но этого мало. Новая частица была обнаружена именно в тех каналах распада, которые предсказывались для бозона Хиггса из Стандартной модели. Соотношение распадов с образованием фотонов (через промежуточные истинные кварки или W -частицы) и распадов с образованием частиц, таких как электроны (через промежуточные Z -бозоны), тоже более или менее соответствовало предсказанному, как и доля событий с образованием новой частицы в протон-протонных столкновениях. Среди миллиардов и миллиардов столкновений, проанализированных двумя детекторными коллаборациями на тот момент, было обнаружено около пятидесяти потенциальных кандидатов в бозоны Хиггса. Для более уверенной идентификации предстояло провести еще немало тестов, но, с другой стороны, если эта штука крикает, как бозон Хиггса, и плавает, как бозон Хиггса, то это, вероятно, бозон Хиггса и есть. Свидетельств в пользу этого оказалось достаточно, чтобы в октябре 2013 г. — в первый же год после официального объявления об открытии — Франсуа Энглер и Питер Хиггс были удостоены Нобелевской премии.

В феврале 2013 г. БАК закрыли, чтобы доработать установку и запустить ее, наконец, на расчетной энергии и интенсивности пучка. К последним неделям перед выключением в накопителях ЦЕРН хранилось свыше ста петабайт данных — больше информации, чем можно записать на 100 млн CD-дисков. Новые результаты продолжали поступать из анализа данных, которые не были полностью обработаны до первого официального объявления (включая и соблазнительные намеки на обнаружение возможной новой и неожиданной тяжелой частицы, в шесть раз тяжелее бозона Хиггса; эти намеки исчезли как раз ко времени отправки этой книги в печать).

Когда речь идет о настоящем открытии, чем больше у вас данных, тем лучше выглядят результаты, тогда как аномальные результаты, как правило, исчезают со временем. На этот раз все выглядело так хорошо, что было даже немного неловко. При сравнении с результатами наблюдений пяти различных предсказанных каналов распада бозона Хиггса на фотоны, Z-частицы, W-частицы, тау-частицы (самый тяжелый из известных родичей электрона) и частицы, содержащие b-кварки, предсказания Стандартной модели в отношении частицы Хиггса, без всяких дополнительных подгонок, продемонстрировали поразительно хорошее совпадение.

Из распределения по углам и энергиям продуктов распада с новым, более обширным набором кандидатов на роль бозона Хиггса детекторы БАКа уже могли разобраться, действительно ли эти частицы являются скалярными; если так, они стали бы первыми замеченными в природе фундаментальными скалярными частицами. 26 марта 2015 г. группа детектора ATLAS огласила в ЦЕРН результаты, показавшие с более чем 99%-ной достоверностью, что новая частица имеет нулевой спин и в точности нужное значение

четности, чтобы быть хиггсовским скаляром. Природа показала, что не гнушается скалярными полями типа хиггсовского поля, как я, к примеру, считал. Существование столь фундаментального скаляра многое меняет в наших представлениях о том, что в природе возможно, а что нет, и ученые, включая и меня, начинают рассматривать сценарии, на которые прежде не обратили бы никакого внимания.

В сентябре 2015 г., примерно за месяц до того, как был готов первый черновик этой книги, два больших детектора ATLAS и CMS свели свои данные за 2011 и 2012 гг. воедино и впервые провели объединенное сравнение теории и экспериментальных данных. Результат, полученный после колоссального объема вычислений, целью которых был учет отдельных систематических эффектов в каждом эксперименте, для чего во внимание принималось ни много ни мало четыре тысячи двести параметров, показал с остаточной неопределенностью примерно в десять процентов, что новая частица обладает всеми параметрами, предсказанными в Стандартной модели для бозона Хиггса.

Этот простой вывод может вызвать чуть ли не разочарование, ведь за ним стоит полвека целенаправленных усилий тысяч людей — теоретиков, разработавших Стандартную модель, и тех, кто осуществлял невероятно сложные вычисления, без которых невозможно сравнить предсказания с экспериментальными данными, определить фоновые значения и т. д., и тысяч физиков-экспериментаторов, сумевших построить, испытать и запустить самую сложную из когда-либо созданных человеком машин. История всех этих людей отмечена невероятными высотами интеллектуальной смелости, годами замешательства, неудач и счастливых случайностей, соперничества и страсти, а главное, настойчивостью научного сообщества, сосредоточенного на единой цели — понять природу

на ее самых фундаментальных масштабах. Как во всякой человеческой драме, в этой истории не обошлось также без зависти, упрямства и тщеславия; важнее, однако, то, что в ней действовало уникальное сообщество, построенное совершенно независимо от этнической принадлежности, языка, религии и пола. Эта история несет в себе весь драматизм лучших эпических сказаний и отражает лучшее из того, что наука может предложить современной цивилизации.

То, что природа оказывается столь добра, чтобы на самом деле использовать идеи, которые небольшая группа людей записала на бумаге под впечатлением от абстрактных идей симметрии и с использованием сложной математики квантовой теории поля, мне представляется и всегда будет представляться поистине замечательным. Трудно выразить словами ту смесь восторга и ужаса, которая охватывает тебя при мысли о том, что природа, возможно, и правда работает так, как ты предполагаешь, дописывая на бумаге последние знаки, чаще всего поздно ночью, один в своем кабинете. Полагаю, что это чувство напоминает описанную Платоном реакцию философов, которых впервые вытащили из пещеры на солнечный свет.

Открывая для себя, что природа на самом деле следует простым и элегантным правилам, интуитивно открытым духовными наследниками Платоновых философов из XX и XXI веков, чувствуешь одновременно потрясение и надежду. Такое развитие событий указывает на то, что готовность ученых строить интеллектуальные карточные домики, способные рассыпаться от легчайшей экспериментальной дрожи, не пропала даром. Это дает нам смелость и дальше полагать, что Вселенная на самых величественных своих масштабах познаваема, по поводу чего Эйнштейн однажды выразил свое искреннее изумление.

Выслушав официальное заявление об открытии частицы Хиггса 4 июля 2012 г., я записал:

Предположительное открытие частицы Хиггса, возможно, не выльется ни в новый тостер, ни в более быстрый автомобиль. Но оно дает нам замечательный повод восхититься способностью человеческого разума раскрывать тайны природы, а также технологией, которую мы создали, чтобы ими управлять. В том, что кажется нам пустым пространством, мало того, кажется ничем и при этом становится все интереснее и интереснее, заключены те самые элементы, что делают возможным наше с вами существование.

Это сделанное на прошлой неделе открытие изменит наш взгляд на самих себя и наше место во Вселенной. Это ведь и есть признак великой музыки, великой литературы, великой живописи... и великой науки.

Еще слишком рано судить или хотя бы полностью предвидеть, к каким изменениям в нашей картине реальности приведут открытие частицы Хиггса на БАКе или те открытия, которые, возможно, за ним последуют. Тем не менее судьба и правда покровительствуют подготовленному разуму, и теоретик, такой как я, чувствует одновременно ответственность и радость, размышляя над этими вопросами.

Может показаться, что природа на этот раз была добра к нам, возможно слишком добра. Эпическая сага, которую я здесь изложил, может еще предложить физике и физикам драматические новые вызовы — и ясно напомнить, что природа существует не для того, чтобы обеспечивать нам комфортное существование. Может быть, мы нашли то, что искали, но никто, откровенно говоря, не ожидал найти только это, и больше ничего...

БОЛЬШЕ ВОПРОСОВ, ЧЕМ ОТВЕТОВ

Глупый не любит знания, а только бы выказать свой ум.

Притчи 18:2

В некотором смысле наша история могла бы на этом и закончиться, поскольку мы достигли границ наших прямых эмпирических знаний о Вселенной на ее фундаментальных масштабах. Но никто не говорит, что мы должны останавливать свое воображение, даже если его образы не всегда приятны. До июля 2012 г. специалистов по физике элементарных частиц мучили два кошмара. Первый заключался в том, что БАК ничего не найдет, совсем ничего. Ведь если бы так случилось, это наверняка был бы последний крупный ускоритель, построенный человечеством для исследования фундаментального устройства мироздания. Второй состоял в том, что БАК откроет бозон Хиггса... и точка.

Каждый раз, когда нам удается приподнять очередной слой реальности, нас манят другие, более глубокие ее слои. Поэтому каждое существенное новое продвижение в науке,

как правило, приносит нам больше вопросов, чем ответов. Но оно также обычно приносит нам хотя бы контуры дальнейшего пути, направление движения, в котором можно начать поиски ответов на эти вопросы. Открытие бозона Хиггса, а с ним и подтверждение существования заполняющего пространство невидимого хиггсовского поля стало сильнейшим подтверждением смелых научных разработок XX столетия.

Однако и сегодня актуальны слова Шелдона Глэшоу: бозон Хиггса напоминает туалет. Он скрывает все некрасивые подробности, о которых мы предпочитаем не говорить. Хиггсовское поле, каким бы элегантным оно ни выглядело в теории, в рамках Стандартной модели, по существу, является ситуативным дополнением. Оно добавлено в теорию, чтобы обеспечить возможности, необходимые для точного моделирования мира нашего опыта. Но само по себе оно *не нужно* теории. Вселенная могла бы счастливо существовать с далекодействующим слабым взаимодействием и безмассовыми частицами. Правда, там просто не было бы нас и задавать вопросы тоже было бы некому. Более того, точные физические свойства бозона Хиггса, как мы увидели, не определяются в рамках одной только Стандартной модели. Этот бозон мог оказаться в тридцать раз тяжелее или в сто раз легче.

Почему же тогда частица Хиггса вообще существует? И почему обладает именно такой массой, какой обладает? (Отметим, в который уже раз: когда ученые спрашивают «почему», они на самом деле имеют в виду «каким образом».) Если бы бозона Хиггса не существовало, мира, который мы видим вокруг, не существовало бы тоже, но это, конечно, не объяснение. Или все же объяснение? В конечном итоге понять физику, стоящую за бозоном Хиггса, означает

понять, как мы с вами возникли. Вопросу «почему мы существуем?» на фундаментальном уровне вполне соответствует вопрос «почему существует бозон Хиггса?». А Стандартная модель не дает него ответа.

Однако кое-какие намеки все же имеются и исходят из сочетания теории и эксперимента. Вскоре после того, как в 1974 г. была надежно определена фундаментальная структура Стандартной модели, и задолго до того, как ее детали были экспериментально подтверждены на протяжении следующего десятилетия, две группы физиков в Гарварде, где тогда работали и Глэшоу, и Вайнберг, заметили кое-что интересное. Глэшоу, совместно с Говардом Джорджи, занимался тем, что у него получалось лучше всего: отыскивал закономерности среди существующих частиц и сил и искал новые возможности при помощи математической теории групп.

Напомню, что в Стандартной модели слабое и электромагнитное взаимодействия объединены при высоких энергиях, но, когда эта симметрия спонтанно нарушается конденсатом хиггсовского поля, то есть при наблюдаемых энергиях, остаются две отдельные и различные силы, причем слабое взаимодействие становится близкодействующим, а электромагнетизм остается далекодействующим. Джорджи и Глэшоу попытались расширить эту идею на сильное взаимодействие и обнаружили, что все известные частицы и все три негравитационных взаимодействия в принципе естественным образом укладываются в единую фундаментальную структуру более крупной калибровочной симметрии. Они тогда рассуждали о том, что эта фундаментальная симметрия могла бы спонтанно нарушаться на каких-то сверхвысоких энергиях и малых расстояниях, выходящих далеко за рамки текущих экспериментов, оставляя

после себя две отдельные и различные ненарушенные калибровочные симметрии, порождающие сильное и электрослабое взаимодействия. Затем, на более низких энергиях и больших расстояниях, нарушалась бы электрослабая симметрия, разделяя единое прежде взаимодействие на два — близкоедействующее слабое и дальноедействующее электромагнитное.

Они скромно назвали свою теорию теорией Великого объединения (ТВО).

Примерно в то же время Вайнберг вместе с Джорджи и Хелен Куинн, в продолжение работ Вильчека, Гросса и Политцера, обратили внимание на нечто интересное. Если сильное взаимодействие ослабевало на малых расстояниях, то электромагнитное и слабое взаимодействия, напротив, становились сильнее.

Не нужно было быть гением, чтобы заинтересоваться тем, не сравняются ли по силе все эти три взаимодействия на каком-то достаточно малом масштабе. Проведя расчеты, они обнаружили (с той точностью, с какой в то время измерялись эти взаимодействия), что такое объединение возможно, но только на масштабах расстояний, примерно на пятнадцать порядков меньше размеров протона.

Это было хорошей новостью при условии, что в качестве объединенной теории будет выступать теория, предложенная Джорджи и Глэшоу, поскольку если все частицы, которые мы наблюдаем в природе, будут объединены в эту новую большую калибровочную группу, то должны существовать новые калибровочные бозоны, обеспечивающие переходы между кварками (из которых состоят протоны и нейтроны), электронами и нейтрино. Это означало бы, что протоны могут распадаться на другие, более легкие частицы. Как сказал Глэшоу, «бриллианты не навсегда».

Тогда уже было известно, что протоны характеризуются невероятно долгим временем жизни. Не только потому, что мы всё еще существуем спустя почти 14 миллиардов лет после Большого взрыва, но и потому, что все мы не умираем от рака еще в детстве. Если бы протоны распадались со средним временем жизни меньшим, чем, скажем, миллиард миллиардов лет, то за период детства в нашем теле распадалось бы достаточно протонов, чтобы нас убило излучение от их распадов. Не забывайте, что в квантовой механике все процессы носят вероятностный характер. Если средний протон живет миллиард миллиардов лет, то там, где имеется миллиард миллиардов протонов, будет распадаться в среднем по одному протону в год. А в наших телах протонов гораздо больше, чем миллиард миллиардов.

Однако при тех невероятно малых расстояниях и, следовательно, невероятно больших энергиях, которые предположительно соответствуют спонтанному нарушению симметрии в Великом объединении, новые калибровочные бозоны должны обладать большой массой. Это сделало бы переносимые ими взаимодействия настолько близкодействующими, что на масштабах протонов и нейтронов они были бы уже невероятно слабыми. В результате протоны в этом сценарии, хотя и могут в принципе распадаться, живут, возможно, миллион миллиардов миллиардов миллиардов лет. Никаких проблем.



С учетом результатов Глэшоу и Джорджи, а также Джорджи, Куинн и Вайнберга аромат Великого объединения буквально носился в воздухе. После успеха теории электрослабого взаимодействия физики были настроены решительно и готовы к дальнейшему объединению теорий.

Однако как можно было бы убедиться в том, что эти красивые идеи верны? Невозможно построить ускоритель для работы с энергиями, в миллион миллиардов раз превышающими энергию массы покоя протона. Такая установка была бы окружностью с лунную орбиту. Даже если бы это было возможно, то, учитывая недавние скандалы вокруг SSC, ни одно правительство не согласилось бы финансировать такой проект.

К счастью, был и другой способ, опиравшийся на вероятностные аргументы вроде того, который я только что привел для оценки нижнего предела времени жизни протона. Допустим, новая теория Великого объединения предскажет время жизни протона, равное, скажем, тысяче миллиардов миллиардов миллиардов лет, тогда можно поместить тысячу миллиардов миллиардов миллиардов протонов в один детектор и в среднем каждый год один из них будет распадаться.

Где можно найти столько протонов? Очень просто: примерно в трех тысячах тонн воды.

Так что требовалось всего лишь взять резервуар, скажем с тремя тысячами тонн воды, поместить его в темноту, обеспечив полное отсутствие радиоактивного фона, окружить чувствительными фотоумножителями, способными регистрировать световые вспышки в детекторе, и подождать год, чтобы увидеть вспышку света при распаде протона. Какой бы пугающей ни казалась эта задача, по крайней мере два крупных эксперимента были одобрены и осуществлены именно для этого: один глубоко под землей возле озера Эри в соляной шахте, другой тоже в шахте вблизи японского города Камиока. Шахты были необходимы, чтобы экранировать воду от проходящих космических лучей; в противном случае эти лучи дали бы фон, на котором потерялись бы любые сигналы от протонных распадов.

Оба эксперимента были запущены около 1982–1983 гг. Великое объединение казалось столь убедительным, что физическое сообщество уверенно ожидало вскоре получить сигнал; Великое объединение достойно увенчало бы собой десятилетие поразительных перемен и открытий в физике элементарных частиц, не говоря уже о Нобелевке для Глэшоу и, возможно, еще для кого-нибудь.

К сожалению, на этот раз природа не была к нам столь добра. Никаких сигналов не было получено ни за первый год, ни за второй, ни за третий. От простейшей элегантной модели, предложенной Глэшоу и Джорджи, скоро пришлось отказаться. Но, однажды заразившись идеей Великого объединения, от нее нелегко избавиться. Выдвигались всё новые предположения, новые теории, в которых распад протона мог подавляться до такой степени, чтобы стать незаметным в проводимых экспериментах.

23 февраля 1987 г., однако, произошло новое событие, подтвердившее максимум, которую я считаю почти универсальной: всякий раз, когда мы открываем новое окно во Вселенную, нас ждет сюрприз. В тот день группа астрономов заметила на фотопластинках, отснятых за ночь, взорвавшуюся сверхновую звезду — самую близкую к нам за почти четыреста лет. Звезда эта находится от нас на расстоянии около 160 000 световых лет в Большом Магеллановом Облаке — карликовой галактике, спутнике Млечного Пути, которую можно увидеть в Южном полушарии.

Если наши представления о взрывающихся звездах верны, то большая часть энергии там должна была высвободиться в виде нейтрино, хотя и видимый свет от взрыва настолько силен, что сверхновые при взрыве (примерно раз в сто лет в одной галактике) становятся ярчайшими небесными объектами. Грубые прикидки тогда показывали, что

громadne водяные детекторы IMB (Ирвин — Мичиган — Брукхейвен) и «Камиоканде» должны увидеть примерно по двадцать нейтринных событий. Когда экспериментаторы IMB и «Камиоканде» заново пересмотрели свои данные за тот день, обнаружилось — гляди-ка! — что IMB зарегистрировал восемь событий, которые можно было считать подходящими кандидатами, в пределах десятисекундного интервала, а «Камиоканде» — одиннадцать. В мире нейтринной физики это можно было считать настоящим водопадом данных. Нейтринная астрофизика внезапно достигла зрелости. Эти девятнадцать событий породили, наверное, не менее девятнадцати сотен статей таких физиков, как я, которые поняли, что им открылось беспрецедентное окно в ядро взрывающейся звезды и в этой лаборатории можно изучать не только астрофизику, но и физику самих нейтрино.

Под влиянием идеи о том, что большие детекторы протонного распада могут выступать также в роли астрофизических нейтринных детекторов, несколько групп физиков начали строительство нового поколения таких двухцелевых детекторов. Крупнейший из них был вновь построен в шахте Камиока; он получил название «Супер-Камиоканде», и не случайно. Этот громадный пятидесятитысячетонный резервуар воды, окруженный 11 146 фотомножителями, функционировал в действующей шахте, и при этом в эксперименте поддерживались условия лабораторной чистоты. Это было абсолютно необходимо, потому что в детекторе таких размеров приходится заботиться об устранении не только внешних космических лучей, но и внутренних радиоактивных загрязнителей в воде, способных похоронить под лавиной информации любые нужные сигналы.

Тем временем интерес к родственным астрофизическим нейтринным сигналам в этот период тоже достиг новых высот. Солнце порождает нейтрино в ходе ядерных реакций в ядре, питающих его энергией; за двадцать с лишним лет при помощи громадного подземного детектора Рей Дэвис сумел обнаружить солнечные нейтрино, но частота событий при этом была примерно втрое ниже той, что предсказывалась лучшими моделями Солнца. Теперь в глубокой шахте в Садбери (Канада) был построен детектор солнечных нейтрино нового типа, получивший известность как Нейтринная обсерватория Садбери — SNO.

«Супер-Камиоканде» с различными доработками почти постоянно работает более двадцати лет. За это время не были обнаружены ни сигналы протонного распада, ни сигналы от других вспышек сверхновых. Однако высокоточные наблюдения нейтрино на этом громадном детекторе, дополненные наблюдениями на SNO, с определенностью установили, что дефицит солнечных нейтрино, обнаруженный Реєм Дэвисом, реален и, более того, объясняется не какими-то астрофизическими эффектами на Солнце, но свойствами самих нейтрино. По крайней мере один из трех известных типов нейтрино не полностью лишен массы, хотя его масса очень мала, возможно в сто миллионов раз меньше массы электрона — следующей по легкости частицы в природе. А поскольку Стандартная модель не предусматривает масс для нейтрино, это стало первым определенным указанием на то, что в природе действует какая-то неизвестная пока физика, выходящая за пределы Стандартной модели и хиггсовского поля.

Вскоре наблюдения нейтрино высоких энергий, постоянно бомбардирующих Землю после того, как высокоэнергетические протоны космических лучей сталкиваются

с атмосферой и порождают настоящий ливень частиц, включая и нейтрино, продемонстрировали, что и второй тип нейтрино обладает массой. Его масса несколько больше, но все же намного уступает массе электрона. За эти результаты руководители SNO и «Камиоканде» получили Нобелевскую премию 2015 г. — ровно за неделю до того, как я написал первый черновой вариант этих слов. Эти дразнящие намеки на новую физику до сих пор не находят объяснения в современных теориях.

Отсутствие протонного распада хотя и принесло физикам разочарование, не оказалось совсем уж неожиданным. С той поры, когда Великое объединение было впервые предложено, физический ландшафт слегка изменился. Более точные измерения реальной силы трех негравитационных взаимодействий вкупе с более изощренными расчетами изменения силы этих взаимодействий с расстоянием показали, что если в природе не существует ничего, кроме частиц Стандартной модели, то силы трех взаимодействий не объединяются друг с другом в одном масштабе. Чтобы Великое объединение произошло, необходимы дополнительно какие-то новые физические законы на масштабах энергии, выходящих за рамки тех, что удавалось наблюдать до сих пор. Присутствие новых частиц должно не только изменить скорость, с которой три известных взаимодействия меняются с масштабом, таким образом, чтобы все они могли объединиться в одном энергетическом масштабе; оно также, скорее всего, повысит масштаб Великого объединения и таким образом снизит частоту протонного распада — и даст протонам предсказанное время жизни, превышающее миллион миллиардов миллиардов миллиардов лет.

Пока происходили все эти события, теоретики не могли не воспользоваться новыми математическими

инструментами и не исследовать новый тип симметрии в природе, которую стали называть суперсимметрией. Эта фундаментальная симметрия отличается от любой известной нам ранее тем, что связывает два разных типа частиц — фермионы (частицы с полуцелым спином) и бозоны (частицы с целым спином). Суть этого явления (множество книг, в том числе и моих, подробно разбирают эту идею) сводится к тому, что если эта симметрия имеет место в природе, то для каждой известной частицы Стандартной модели должна существовать по крайней мере одна соответствующая ей новая элементарная частица. Для каждого известного бозона должен существовать новый фермион, а для каждого известного фермиона — новый бозон.

Поскольку мы пока не видели этих частиц, ясно, что эта симметрия не может проявляться в окружающем нас мире на том уровне, на котором мы его воспринимаем, и, кроме того, она должна быть нарушена, а значит, все новые частицы будут обладать массами, причем массами достаточно большими, чтобы частицы эти нельзя было увидеть ни на одном из построенных до сих пор ускорителей.

Что может быть такого привлекательного в симметрии, чтобы вдруг удвоить все частицы в природе без всяких доказательств существования каких бы то ни было новых частиц? В значительной мере ее соблазнительность кроется в самом факте Великого объединения. Поскольку если теория Великого объединения проявляется на масштабе масс, на пятнадцать-шестнадцать порядков выше массы покоя протона, то этот масштаб также примерно на тринадцать порядков превышает тот, на котором нарушается электрослабая симметрия. И встает большой вопрос: как и почему может существовать такая громадная разница в масштабах для фундаментальных законов природы? Или иначе:

если частица Хиггса из Стандартной модели действительно представляет собой последний уголок этой модели, то почему энергетический масштаб нарушения хиггсовской симметрии на тринадцать порядков уступает тому масштабу, на котором нарушается симметрия, связанная с каким-то новым полем, которое необходимо ввести, чтобы нарушить симметрию Великого объединения и разделить составляющие его силы?

Проблема эта куда серьезнее, чем кажется. Скалярные частицы, такие как бозон Хиггса, имеют несколько новых квантово-механических свойств, не похожих на свойства фермионов со спином 1, таких как калибровочные частицы. При рассмотрении влияния виртуальных частиц, включая частицы сколь угодно большой массы, такие как калибровочные частицы гипотетической теории Великого объединения, оказывается, что они ведут к повышению массы бозона Хиггса и, соответственно, масштаба, на котором нарушается хиггсовская симметрия, таким образом, что он, по существу, сближается или даже сходится с тяжелым ТВО-масштабом. Это порождает проблему, получившую известность как проблема естественности. С формальной точки зрения неестественно иметь громадный разрыв между масштабом, на котором электрослабая симметрия нарушается механизмом Хиггса, и масштабом, на котором симметрия ТВО нарушается неким неизвестным тяжелым скалярным полем.

Блестящий математический физик Эдвард Виттен утверждал в известной статье 1981 г., что суперсимметрия обладает одним особым свойством. Она способна смягчать действие, которое виртуальные частицы сколь угодно большой массы и энергии оказывают на свойства мира в масштабах, которые мы в состоянии в данный момент

исследовать. Поскольку виртуальные фермионы и виртуальные бозоны равной массы вносят совершенно одинаковые, различающиеся только знаком квантовые поправки, то, если каждый бозон сопровождается фермионом такой же массы, квантовые эффекты этих виртуальных частиц взаимно компенсируются. Это означает, что влияние виртуальных частиц сколь угодно большой массы и энергии на физические свойства Вселенной в масштабах, доступных нашему измерению, может быть полностью устранено.

Однако если сама суперсимметрия тоже нарушается, то квантовые поправки полностью компенсироваться не будут. Вместо этого они будут давать свой вклад в массы, причем того же масштаба, как и масштаб, на котором нарушается суперсимметрия. Если бы он был сравним с масштабом нарушения электрослабой симметрии, это объясняло бы масштаб массы частицы Хиггса. Это означает также, что нам следует ожидать появления множества новых частиц — суперсимметричных партнеров обычного вещества — на масштабе, исследованием которого в настоящее время занимается БАК.

Это разрешило бы проблему естественности, поскольку защитило бы массу бозона Хиггса от возможных квантовых поправок, способных загнать ее вверх до масштабов энергии, связанных с Великим объединением. Суперсимметрия допускала бы «естественную» большую разницу в энергиях (и массах) между электрослабым масштабом и масштабом Великого объединения.

Тот факт, что суперсимметрия могла бы в принципе решить проблему иерархии, как ее стали называть, сильно повысил ее репутацию в глазах физиков. Это побудило теоретиков начать исследование реалистичных моделей, включающих в себя нарушение суперсимметрии, и других

физических следствий из этой идеи. Когда они занялись этим, рейтинг суперсимметрии подскочил до небес. Поскольку если включить возможность спонтанного нарушения суперсимметрии в расчеты изменения трех негравитационных взаимодействий с расстоянием, то внезапно выяснится, что сила всех трех взаимодействий естественным образом сойдется на единственном масштабе очень малых расстояний. Великое объединение снова на коне!

Модели, в которых суперсимметрия нарушается, обладают еще одной привлекательной чертой. Задолго до открытия истинного кварка было указано, что если истинный кварк окажется тяжелым, то через взаимодействия с другими суперсимметричными партнерами он может давать квантовые поправки к свойствам частицы Хиггса, которые вызовут конденсацию поля Хиггса на измеренном для него масштабе энергий, притом что Великое объединение имеет место на куда более высоком, сверхтяжелом масштабе. Коротче говоря, энергетический масштаб нарушения электрослабой симметрии может генерироваться естественным образом в рамках теории, в которой Великое объединение происходит при намного более высоком масштабе энергий. Когда истинный кварк был открыт и действительно оказался тяжелым, это добавило привлекательности гипотезе о том, что за наблюдаемый масштаб энергии слабого взаимодействия отвечает, возможно, нарушение суперсимметрии.

Однако за все это приходится платить. Чтобы эта теория работала, должен существовать не один бозон Хиггса, а два. Более того, можно было бы ожидать появления новых суперсимметричных частиц, если удалось бы построить ускоритель вроде БАКа, способный искать новые физические закономерности вблизи электрослабого масштаба. Наконец,

хотя какое-то время это казалось чертовски неприятным ограничением, более легкая частица Хиггса в этой теории не могла быть слишком тяжелой; в противном случае механизм не работал бы.

Пока поиски частицы Хиггса шли безо всяких результатов, ускорители всё ближе подбирались к теоретическому верхнему пределу массы легкого бозона Хиггса. Предел этот располагался где-то около 135 масс протона, а подробности в некоторой степени зависели от модели. Если бы до этого предела частицы Хиггса не обнаружилось, следовало бы сделать вывод, что весь шум по поводу суперсимметрии не более чем шум.

Но дело обернулось иначе. Частица Хиггса, которую удалось пронаблюдать на БАКе, имеет массу около 125 масс протона. Возможно, Великое объединение уже рядом.

Ответ в настоящее время... не слишком ясен. Сигнатуры новых суперсимметричных партнеров обычных частиц должны были быть настолько заметными на БАКе, что многие из нас считали, что у БАКа гораздо больше шансов открыть суперсимметрию, чем обнаружить бозон Хиггса. Но получилось не так. Сегодня, после трех лет работы БАКа, у нас по-прежнему нет никаких признаков частиц-суперпартнеров. Ситуация уже начинает выглядеть некомфортной. Нижнее ограничение на массы суперсимметричных партнеров обычного вещества поднимается все выше. Но если оно поднимется слишком высоко, то масштаб нарушения суперсимметрии уже не будет близок к электрослабому масштабу и многие привлекательные черты нарушения суперсимметрии как средства решения проблемы иерархии исчезнут.

Пока, однако, ситуация не безнадежна, а БАК вновь включен, на этот раз на более высоких энергиях. Может

так случиться, что в какой-то год между написанием этих слов и десятым переизданием этой книги суперсимметричные частицы будут обнаружены.

Если действительно так и произойдет, это повлечет за собой еще одно важное следствие. Одна из крупнейших загадок космологии — природа скрытой массы, составляющей, судя по всему, большую часть массы всех наблюдаемых нами галактик. Как я уже упоминал, ее так много, что она просто не может состоять из тех же частиц, из которых состоит нормальное вещество. В противном случае расчеты, к примеру, обилия легких элементов, возникших в процессе Большого взрыва, таких как гелий, уже не сошлись бы с данными наблюдений. Поэтому физики практически уверены, что «темная материя» состоит из элементарных частиц неизвестного типа. Но из каких именно?

Самый легкий суперсимметричный партнер обычного вещества в большинстве моделей абсолютно стабилен и обладает многими свойствами нейтрино. Он должен, по идее, слабо вступать во взаимодействие и быть электрически нейтральным, так что он не будет излучать или поглощать свет. Более того, расчеты, проведенные мной и другими физиками более тридцати лет назад, показали, что остаточное обилие легчайшей суперсимметричной частицы, оставшейся после Большого взрыва, естественным образом попадает в диапазон, позволяющий этой частице быть той самой темной материей, которая преобладает в массе галактик.

В этом случае наша Галактика должна иметь гало из частиц темной материи, пронизывающих ее во всех направлениях, в том числе пролетающих и через комнату, в которой вы сейчас это читаете. Как многие из нас поняли некоторое время назад, это означает, что если сконструировать

чувствительные детекторы и поместить их под землю — аналогично, по крайней мере по духу, уже существующим под землей нейтринным детекторам, — то можно было бы непосредственно регистрировать эти частицы темной материи. В данный момент полдюжины красивых экспериментов по всему миру готовятся делать именно это. Пока, однако, ничего увидеть не удалось.

Так что, возможно, мы сегодня живем в лучшие — или в худшие — времена. Идет гонка между детекторами на БАКе и специальными подземными детекторами темной материи — кто сумеет первым раскрыть ее природу. Если любая из этих групп объявит об обнаружении частиц, это объявление станет сигналом о начале новой эпохи открытий, потенциально способных привести нас к пониманию самого Великого объединения. А если в ближайшие годы не будет сделано никакого открытия, то мы сможем исключить гипотезу о простом суперсимметричном происхождении темной материи, а затем исключить и саму гипотезу о суперсимметрии как решении проблемы иерархии. В этом случае нам придется вновь возвращаться к началу и создавать новые гипотезы — правда, если мы не получим с БАКа никаких новых сигналов, то не будем знать, в каком направлении двигаться, чтобы построить модель природы, которая в конечном итоге может оказаться верной.

Ситуация стала еще интереснее, когда БАК сообщил о заманчивом сигнале, говорящем, возможно, о новой частице примерно вшестеро тяжелее бозона Хиггса. Эта частица не обладала характеристиками, которые можно было бы ожидать от какого-нибудь суперсимметричного партнера обычного вещества. Обычно самые волнующие, выбивающиеся из ряда вон сигналы уходят, когда набирается больше данных, и где-то через полгода после первого

появления этого сигнала, когда набралось больше данных, он исчез. Если бы этого не произошло, он мог бы полностью изменить наши представления о теориях Великого объединения и электрослабой симметрии, с появлением взамен нового фундаментального взаимодействия и нового набора частиц, чувствующих это взаимодействие. Но, хотя загадочный сигнал породил множество оптимистичных теоретических статей, природа, судя по всему, решила иначе.

Надо сказать, что одну группу физиков-теоретиков отсутствие ясного экспериментального направления или подтверждения суперсимметрии пока не беспокоит. Математическая красота суперсимметрии подтолкнула ученых в 1984 г. к возрождению идеи, дремавшей с 1960-х гг., когда Намбу и другие пытались разобраться в сильном взаимодействии, представив его как теорию кварков, соединенных между собой струноподобными возбуждениями. Когда суперсимметрия была включена в квантовую теорию струн, чтобы получить новую теорию суперструн, начали появляться поразительно красивые математические результаты, включая возможность объединения не только трех негравитационных взаимодействий, но всех четырех известных сил природы в единую непротиворечивую квантовую теорию поля.

Однако эта теория требует существования целого набора новых пространственно-временных измерений, ни одного из которых никому до сих пор не удалось увидеть. Кроме того, эта теория не дает предсказаний, проверяемых при помощи хотя бы задуманных на данный момент экспериментов. Наконец, в последнее время эта теория сильно усложнилась, так что теперь сами струны, кажется, уже не являются в ней главными динамическими переменными.

Все это нисколько не пригасило энтузиазм плотного ядра высокоталантливых физиков, преданных этой идее; более тридцати лет — с середины 1980-х гг., времени ее максимальной популярности, они продолжают работать над теорией суперструн, которая теперь носит название М-теории. Периодически появляются заявления о крупных успехах, но до сих пор М-теории недостает ключевого элемента, делающего Стандартную модель триумфом научной мысли: способности установить контакт с миром, который мы в состоянии измерить, разрешить неразрешимые прежде загадки и дать фундаментальные объяснения тому, как возник наш мир и почему он получился именно таким. Это не означает, что М-теория неверна, но в данный момент это по большей части ничем не подтвержденные рассуждения, хотя рассуждения разумные и хорошо мотивированные.

Здесь не место разбирать историю проблемы и успехи теории струн. Я, как и некоторые другие мои коллеги, уже сделал это в другом месте. При этом стоит помнить, что если уроки истории могут служить ориентирами, то передовые физические идеи по большей части оказываются ошибочными. Если бы это было не так, кто угодно мог бы заниматься теоретической физикой. Потребовалось несколько столетий — или если начинать с древних греков, то несколько тысячелетий — проб и ошибок, чтобы предложить наконец Стандартную модель.

Итак, вот точка, где мы находимся. Ожидают ли нас в самом ближайшем будущем новые экспериментальные открытия, которые позволят подтвердить или опровергнуть какие-то грандиозные спекуляции физиков-теоретиков? Или мы на пороге пустыни, где природа не даст нам никаких указаний на то, в каком направлении углублять исследования фундаментальной природы мироздания? Мы

с этим разберемся, и нам так или иначе придется жить с этой новой реальностью.

Неважно, какие подвохи, возможно, готовит нам природа в будущем; недавнее открытие бозона Хиггса — последнее по времени и одно из величайших экспериментальных и теоретических достижений замечательной Стандартной модели физики элементарных частиц — блестяще увенчало собой более двух тысячелетий интеллектуальных усилий смелых и упорных философов, математиков и физиков, стремившихся понять скрытую ткань реальности, лежащую в основе нашего существования.

Это открытие позволяет также предположить, что прекрасная Вселенная, в которой нам выпало жить, не только напоминает, по крайней мере метафорически, ледяной кристалл на оконном стекле, но, возможно, почти столь же эфемерна.

ОТ ПИВНОЙ ВЕЧЕРИНКИ К КОНЦУ ВРЕМЕН

...ибо проходит образ мира сего.

1 Коринф 7:31

В фокусе собственных исследований на протяжении значительной части моей карьеры находилась зарождающаяся область науки, известная как астрофизика элементарных частиц. После целого потока теоретических достижений 1960-х и 1970-х гг. наземным экспериментам, которые ограничены нашими способностями строить сложные установки, такие как ускорители частиц, трудно было не отстать. В результате многие физики обратились за помощью ко Вселенной. Поскольку теория Большого взрыва говорит о том, что ранняя Вселенная была горячей и плотной, в ней существовали условия, которые мы, возможно, никогда не сможем воссоздать в земных лабораториях. Но если подойти к делу с умом, то можно поискать в космосе остаточные признаки тех ранних времен, и, возможно, нам удастся проверить идеи, касающиеся даже самых экзотических аспектов фундаментальной физики.

Моя предыдущая книга «Вселенная из ничего» описывала революции, случившиеся в наших представлениях об эволюции Вселенной на больших масштабах и на протяжении долгого времени. Наши исследования не только обнаружили существование темного вещества, состоящего, скорее всего, как я уже говорил, из новых элементарных частиц, которые пока не удалось пронаблюдать на ускорителях, хотя мы, возможно, уже стоим на пороге этого, но — и это еще более удивительно — открыли, что большая часть энергии Вселенной кроется в пустом пространстве, и мы пока не представляем, откуда она берется.

Теперь наблюдения увели нас назад, к новорожденной Вселенной. Мы наблюдаем тонкие особенности излучения, известного как космический микроволновой фон, или реликтовое излучение, которое приходит к нам из времен, когда возраст Вселенной составлял всего лишь триста тысяч лет. Телескопы возвращают нас к самым ранним галактикам, сформировавшимся, возможно, всего через миллиард лет после Большого взрыва, и позволяют нам наносить на карты громадные космические структуры, включающие сотни галактик и раскинувшиеся на сотни миллионов световых лет, рассыпанные среди ста триллионов или около того галактик видимой Вселенной.

За объяснением этих особенностей теоретики обращаются к идее, которая возникла благодаря развитию теорий Великого объединения. В 1981 г. Алан Гут понял, что нарушающий симметрию переход, который мог иметь место на масштабе ТВО в молодой Вселенной, возможно, отличается от перехода, нарушающего симметрию между слабым взаимодействием и электромагнетизмом. В случае ТВО хиггсоподобное поле, которое конденсируется в пространстве, нарушая ТВО-симметрию между сильным

и электрослабым взаимодействиями, может на короткое время замереть в метастабильном высокоэнергетическом состоянии, прежде чем релаксировать и перейти к финальной конфигурации. Но пока оно пребывало в этом состоянии «ложного вакуума», поле должно было обладать энергией, которая высвободилась, когда оно в конечном итоге релаксировало и перешло в предпочтительное для него состояние с самой низкой энергией.

Гут задался вопросом: что произошло бы в ранней Вселенной, если бы подобное случилось во время перехода, описываемого теорией Великого объединения? Что будет, если некое скалярное поле, ведущее себя при этом переходе подобно хиггсовскому полю, останется на короткое время в своем первоначальном (сохраняющем симметрию) состоянии, хотя Вселенная уже охладилась ниже точки, где предпочтительным становится новое (нарушающее симметрию) конденсированное состояние покоя? Гут понял, что этот тип энергии, содержащийся в поле по всему объему пространства до завершения перехода, должен вызывать гравитационное отталкивание. Это заставит Вселенную расширяться — потенциально в громадное число раз, возможно, на двадцать пять или более порядков — за микроскопически короткое время.

Далее он обнаружил, что этот период стремительного расширения, которое он назвал инфляцией, мог бы разрешить множество известных парадоксов, связанных с картиной Большого взрыва, включая вопрос о том, почему Вселенная так однородна в больших масштабах и почему трехмерное пространство в больших масштабах представляется геометрически почти плоским. Без инфляции обе эти проблемы выглядят неразрешимыми. Первая из них решается благодаря тому, что в период стремительного

расширения любые начальные неоднородности сглаживаются — как сморщенный воздушный шар становится гладким, когда его надувают. Продолжая аналогию с шаром, заметим, что поверхность шара, надутого до очень больших размеров, скажем величиной с Землю, может выглядеть очень плоской, как степи Канзаса. Хотя это двумерный образ, он в принципе применим и к трехмерной кривизне самого космоса. После инфляции пространство должно казаться плоским, то есть выглядеть в точности как Вселенная, в которой, как считало до недавнего времени большинство из нас, мы живем, — где параллельные никогда не пересекаются, а оси x , y и z указывают в одну и ту же сторону в любой точке Вселенной.

После завершения стадии инфляции энергия, запасенная в состоянии ложного вакуума по всему объему пространства, высвобождается, порождая частицы и заново нагревая Вселенную до высокой температуры; при этом складываются естественные и реалистичные начальные условия для последующего стандартного расширения горячего Большого взрыва.

И это еще не все. Через год после того, как Гут предложил свою идею, сразу несколько групп провели расчеты, пытаясь понять, что происходило с частицами и полями в процессе стремительного инфляционного расширения Вселенной. Они обнаружили, что небольшие неоднородности, возникшие вследствие квантовых эффектов в начальные моменты времени, были затем «заморожены» в период инфляции. После окончания инфляции эти небольшие неоднородности могли вырасти и породить галактики, звезды, планеты и т. п.; кроме того, они оставили бы свой отпечаток на космическом микроволновом фоне, очень напоминающий тот рисунок, который впоследствии был обнаружен.

Однако при использовании разных инфляционных моделей можно также получить другие предсказания для анизотропии реликтового излучения (в данный момент инфляция скорее модель, чем полноценная теория, и, поскольку эксперимент не определил пока никакого единственного перехода по теории Великого объединения, верными могут оказаться самые разные варианты).

Есть еще одно волнующее и более однозначное предсказание, связанное с инфляцией. В период быстрого расширения в пространстве должна была возникнуть рябь, получившая название гравитационных волн. Эта рябь должна была породить еще одну характерную сигнатуру в космическом микроволновом фоне, которую можно обнаружить. В 2014 г. эксперимент BICEP объявил об обнаружении сигнала, идентичного предсказанному, что вызвало невероятное возбуждение как в теоретическом, так и в наблюдательном сообществе. Мы с Фрэнком Вильчеком написали статью, в которой не только отмечали, что такое наблюдение должно указывать на масштаб нарушения симметрии, соответствующий масштабу нарушения симметрии в теории Великого объединения с суперсимметрией, но и что оно должно однозначно продемонстрировать, что гравитация на малых масштабах должна описываться квантовой теорией, так что поиск квантовой теории гравитации дело не бесполезное.

Однако, к сожалению, заявление BICEP оказалось преждевременным. Аналогичный сигнал могли дать другие фоновые явления в нашей Галактике, и на момент написания книги ситуация по-прежнему представляется мутной; однозначного подтверждения ни инфляции, ни квантовой гравитации пока нет.

Совсем недавно, между завершением первого черновика этой книги и ее окончательным вариантом, было

сделано первое достоверное открытие гравитационных волн; сделал его удивительный комплект детекторов, известный как LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) и расположенный в Хэнфорде (штат Вашингтон) и Ливингстоне (штат Луизиана). LIGO — впечатляющая масштабная установка. Чтобы обнаружить гравитационные волны, порожденные слиянием черных дыр в далеких галактиках, экспериментаторам нужно зафиксировать колеблющуюся разницу в длине двух перпендикулярных плеч детектора длиной по четыре километра каждое, равную одной тысячной доле размера протона. Это все равно что измерить расстояние от Земли до ближайшей к нашему Солнцу звезды, альфы Центавра, с точностью до толщины человеческого волоса!

Как ни поразительно открытие инструментом LIGO гравитационных волн*, сами волны, которые удалось зарегистрировать, представляют собой результат далекого астрофизического столкновения, а не первых мгновений Большого взрыва. Однако успех LIGO даст старт строительству новых детекторов, так что гравитационная астрономия станет, скорее всего, астрономией XXI века.

Если продолжатели дела LIGO и BICEP в этом или следующем столетии смогут непосредственно измерить сигнатуру

* По состоянию на сентябрь 2017 г. LIGO зарегистрировал гравитационные волны от четырех слияний черных дыр звездных масс, причем событие 14 августа 2017 г. впервые наблюдалось одновременно на LIGO и аналогичной европейской установке Virgo. Кроме того, 17 августа 2017 г. LIGO и Virgo впервые зарегистрировали гравитационные волны от слияния двух нейтронных звезд, причем орбитальными и наземными телескопами были зафиксированы гамма-всплеск и послесвечение в оптическом диапазоне. В октябре 2017 г. Нобелевскую премию по физике за экспериментальную регистрацию гравитационных волн получили Райнер Вайсс, Барри Бэриш и Кип Торн. — *Прим. ред.*

инфляционных гравитационных волн, это откроет перед учеными окно прямо в физику Вселенной в тот момент, когда ее возраст составлял менее одной миллиардной миллиардной миллиардной доли секунды. Это позволит нам непосредственно проверить и свои представления об инфляции, и даже Великое объединение, а может быть, даже прольет свет на возможное существование иных вселенных, разом превратив то, что сегодня является метафизикой, в физику.

Пока же инфляция — это всего лишь мотивированное предположение, судя по всему, естественным образом разрешающее большинство основных загадок космологии. И хотя инфляция остается единственным кандидатом на фундаментальное теоретическое объяснение главных наблюдательных особенностей нашей Вселенной, она полагается на существование нового, введенного ситуативно скалярного поля, придуманного исключительно для того, чтобы породить инфляцию, и точно настроенного на то, чтобы запустить ее, когда ранняя Вселенная только начала остывать после Большого взрыва.

До открытия бозона Хиггса это рассуждение можно было считать в лучшем случае правдоподобным. Притом что нам не было известно ни одного примера какого-либо фундаментального скалярного поля, предположение о том, что нарушение симметрии Великого объединения возникает в результате действия *еще одного* простого хиггсоподобного механизма, было экстраполяцией, опиравшейся на ненадежное основание. Как я уже отмечал, нарушение электрослабой симметрии стало очевидным с открытием W- и Z-частиц. Однако простое хиггсовское поле вполне могло оказаться сказочным заменителем какого-то гораздо более сложного

и, возможно, гораздо более интересного фундаментального механизма.

Теперь ситуация изменилась. Бозон Хиггса существует, а с ним существует, очевидно, и фоновое скалярное поле, пронизывающее на сегодняшний день все пространство Вселенной, придающее массу частицам и порождающее такие характеристики Вселенной, при которых возможно наше существование. Если и правда существует теория Великого объединения, собирающая все три взаимодействия в одно где-то у начала времен, то примерно тогда же должно было произойти какое-то нарушение симметрии, в результате которого три известных негравитационных взаимодействия начали расходиться в свойствах. Бозон Хиггса демонстрирует, что нарушение симметрии в законах природы может возникать в результате присутствия в пространстве конденсата скалярного поля. Таким образом инфляция в том или ином варианте становится намного более естественной и потенциально шаблонной возможностью. Как в шутку сказал однажды мой коллега Майкл Тёрнер, перефразируя главу Федеральной резервной системы Алана Гринспена, «периоды инфляции неизбежны!».

Это заявление может оказаться более провидческим, чем кто-то в то время мог вообразить. В 1998 г. было обнаружено, что наша Вселенная в настоящее время переживает новый вариант инфляции; подтвердились некоторые более ранние и слегка еретические предсказания отдельных теоретиков. Как я упоминал ранее, это подразумевает, что большая часть энергии Вселенной в настоящее время, судя по всему, скрыта в пустом пространстве — это наиболее правдоподобное объяснение того, почему наблюдаемое расширение Вселенной ускоряется. Нобелевская премия была присуждена Брайану Шмидту, Адаму Риссу и Саулу

Перлмуттеру за открытие этого замечательного и весьма неожиданного явления. Естественно, встают вопросы: что могло бы стать причиной текущего ускоренного расширения? Каков источник этого нового типа энергии?

Здесь видятся две возможности. Во-первых, это может оказаться фундаментальным свойством пустого пространства. На самом деле эту возможность предрек еще Альберт Эйнштейн вскоре после того, как разработал общую теорию относительности. По его мнению, в этой теории могло содержаться нечто, названное им «космологической постоянной». Сегодня мы понимаем, что эта постоянная, возможно, просто представляет собой ненулевую энергию основного состояния Вселенной, которая продолжит существовать в будущем до бесконечности.

Или, во-вторых, это может быть энергия, накопленная в еще одном невидимом фоновом скалярном поле Вселенной. Если это так, то следующий очевидный вопрос: высвободится ли эта энергии в процессе еще одного будущего фазового перехода, подобного тому, которым завершилась инфляция, когда Вселенная еще охладится?

В настоящее время ответа нет, проблема ждет своего исследователя. Хотя предположительная плотность энергии пустого пространства на сегодня больше, чем плотность энергии всего остального, что мы видим во Вселенной, в абсолютных единицах на шкале энергий, связанных с массами известных нам элементарных частиц, она мала до чрезвычайности. Ни у кого нет разумного объяснения на основе первичных принципов и известных в физике элементарных частиц механизмов, как энергия основного состояния Вселенной может быть ненулевой и давать в результате космологическую постоянную Эйнштейна, но при этом оказаться столь малой, чтобы допускать то плавно

ускоряющееся расширение, которое мы испытываем в настоящий момент. (Одно правдоподобное объяснение все же существует — первым его высказал Стивен Вайнберг. Хотя это объяснение умозрительно и опирается на спекулятивные идеи о возможных законах физики далеко за пределами той области, которую мы на сегодняшний день понимаем. Если существует много вселенных, а плотность энергии пустого пространства, принимаемая за космологическую постоянную, не устанавливается жестко фундаментальными физическими ограничениями, а вместо этого случайно варьирует от одной вселенной к другой, то только в тех вселенных, где энергия пустого пространства ненамного выше той величины, которую мы измеряем у себя, возможно формирование галактик, а потом звезд, и уж потом планет, и только потом астрономов...)

Пока же ни у кого нет разумной модели нового фазового перехода, предсказанного в физике элементарных частиц, такого, что связанное с ним новое скалярное поле хранит в пространстве так мало энергии. Под разумной моделью я подразумеваю модель, которую счел бы правдоподобной хоть кто-нибудь, помимо ее авторов.

Тем не менее Вселенная такова, какова она есть, и тот факт, что нынешняя фундаментальная теория никак принципиально не объясняет нечто столь фундаментальное, как энергия пустого пространства, не подразумевает ничего мистического. Как я уже говорил, недостаток понимания не доказывает существования Бога. Он свидетельствует лишь о недостатке понимания.

Имея в виду, что мы не знаем источника предполагаемой энергии, скрытой в пустом пространстве, мы вольны надеяться на лучшее, и в данном случае это означает, возможно, надежду на то, что верным окажется объяснение,

связанное с космологической постоянной, а не с неким новым, еще не открытым скалярным полем, которое может однажды сбросить напряжение и перейти в новое состояние, высвободив при этом запасенную в пространстве энергию.

Не забывайте, что из-за соединения хиггсовского поля с остальным веществом Вселенной, когда это поле сконденсировалось в состояние с нарушением электрослабой симметрии, свойства вещества и сил, управляющих взаимодействиями материи, кардинально изменились.

Если в природе произойдет какой-то аналогичный фазовый переход с участием некоего нового скалярного поля, стабильность вещества, какой мы ее знаем, может исчезнуть. Галактики, звезды, планеты, люди, политики и все, что мы сегодня видим вокруг, могут исчезнуть в буквальном смысле. Единственная хорошая новость здесь (помимо исчезновения политиков) состоит в том, что этот переход, предполагая, что начнется он с какого-то маленького зернышка в одном месте нашей Вселенной (так же, как маленькие пылинки могут запустить формирование ледяных кристаллов на нашем замерзшем окне или снежинок в процессе их падения на землю), распространится затем по пространству со скоростью света. Мы не узнаем, что на нас обрушилось, пока это не произойдет, а когда это произойдет — нас уже не будет и знать это будет некому.

Любопытный читатель, возможно, заметил, что все эти дискуссии относятся к новым скалярным полям, возможно существующим в природе. А как же хиггсовское поле, предусмотренное Стандартной моделью? Может ли оно играть роль во всем этом космическом безобразии? Может ли оказаться, что в хиггсовском поле и запасена энергия, ответственная за инфляцию — то ли на раннем этапе развития Вселенной, то ли сейчас? Может ли оказаться, что

хиггсовское поле находится не в окончательном своем состоянии, а предстоит еще один переход, который вновь изменит конфигурацию электрослабого взаимодействия и массы частиц Стандартной модели?

Хорошие вопросы. А ответ один: мы не знаем.

Это не мешает многим теоретикам порассуждать об этой возможности. Мой любимый пример — любимый не потому, что он лучше остальных, но лишь потому, что мы рассуждали об этом с коллегой, Джеймсом Дентом, вскоре после открытия бозона Хиггса, — состоит в том, что хиггсовский механизм, возможно, все же играет какую-то роль в наблюдаемом расширении Вселенной. Как признают многие авторы, существование конденсата фонового поля и частиц, которые он в себя включает, может обеспечить нам уникальное окно, или «портал», способный обеспечить недостижимую иным способом чувствительность к существованию в природе других хиггсоподобных полей, каким бы слабым ни было их непосредственное взаимодействие с частицами, которые мы наблюдаем в Стандартной модели.

Если бозон Хиггса и другие хиггсоподобные частицы существуют (возможно, на масштабе теории Великого объединения), то физическая частица Хиггса — та, что была открыта в ЦЕРН, — может оказаться смесью с участием бозона Хиггса, отвечающего за слабое взаимодействие, и небольшой примеси какой-то другой хиггсоподобной частицы. (В этом нам указывает путь физика нейтрино, где аналогичные явления играют принципиально важную роль в понимании поведения нейтрино, рожденных, к примеру, при ядерных реакциях в глубинах Солнца и измеренных на Земле.) В таком случае можно по крайней мере предположить, что, когда поле Хиггса для слабого взаимодействия конденсируется в пустом пространстве, этот процесс

способен подстегнуть конденсацию какого-нибудь другого хиггсоподобного поля со свойствами, которые позволяют ему запастись в точности нужное количество энергии, чтобы объяснить наблюдаемую сегодня инфляцию Вселенной. Математика, нужная для этого, весьма заумна, а модель некрасива. Но кто знает? Может быть, она некрасива потому, что мы не нашли пока правильной структуры, в которую ее можно было бы встроить.

Тем не менее у этого сценария есть одна привлекательная черта, которая делает его упоминание здесь чуть менее отдающим саморекламой. В этой картине энергия, несомая вторым полем, которое должно служить двигателем нынешнего измеренного ускоренного расширения Вселенной, будет, скорее всего, в конечном итоге высвобождена в новом фазовом переходе к истинному конечному состоянию Вселенной. Из-за того, что новое поле может быть слабо связано со всеми наблюдаемыми частицами, этот переход, в отличие от многих других возможных вариантов будущих фазовых переходов в нашей Вселенной, не повлечет за собой изменения наблюдаемых свойств каких бы то ни было известных частиц на сколько-нибудь заметную величину. То есть если эта модель верна, известная нам Вселенная, может быть, уцелеет.

Но праздновать пока рановато. Независимо от подобных рассуждений, открытие частицы Хиггса поднимает целый спектр других, куда менее оптимистичных возможностей. Хотя будущее, в котором наблюдаемое ускорение расширения Вселенной продолжается вечно, довольно безрадостное для жизни и для возможности нам и дальше исследовать Вселенную (ведь со временем все галактики, которые мы сегодня наблюдаем, начнут убегать от нас быстрее света и окончательно исчезнут с нашего горизонта,

оставив Вселенную холодной, темной и по большей части пустой), будущее, которое может наступить из-за хиггсовского поля с массой, равной 125 массам протона, может оказаться куда хуже.

Если вспомнить, что Хиггсова масса лежит на границе разрешенного диапазона для массы найденной частицы Хиггса, и пока считать, что Стандартная модель не дополняется большим количеством новых объектов на более высоких энергиях, то расчеты показывают, что существующий конденсат хиггсовского поля колеблется на грани неустойчивости — и может измениться с нынешнего своего значения на совсем другое, связанное с более низким энергетическим состоянием.

Если такой переход произойдет, обычное вещество, каким мы его знаем, изменит свою форму, и галактики, звезды, планеты и люди, скорее всего, исчезнут, как кристаллы льда теплым солнечным утром.

Для тех, кому нравятся ужастики, могу предложить другой, еще более жуткий возможный вариант. В принципе может существовать неустойчивость, которая вызовет бесконечный рост величины хиггсовского поля. В результате такого роста энергия, запасенная эволюционирующим хиггсовским полем, может стать отрицательной. А это вызовет коллапс Вселенной в катастрофическом процессе, обратном Большому взрыву — Большому схлопыванию. К счастью, данные не подтверждают такой возможности, какой бы поэтичной она ни казалась.

В сценарии, где все, что мы сегодня видим вокруг, исчезает при внезапном переходе хиггсовского поля в новое основное состояние, я хочу подчеркнуть, что измеренная в настоящее время масса бозона Хиггса благоприятствует стабильности, но ее величина характеризуется

существенной неопределенностью и может оказаться по любую сторону от разделительной линии — либо породить стабильный на первый взгляд вакуум, в котором мы в настоящее время неплохо себя чувствуем, либо благоприятствовать такому переходу. Более того, этот сценарий основан на расчетах в пределах исключительно Стандартной модели. Любые новые физические закономерности, открытые на БАКе или будущих установках, могут полностью изменить картину, стабилизировав хиггсовское поле, которое в ином случае может оказаться нестабильным. А поскольку мы почти уверены, что новые физические закономерности ждут своего открытия, нет причин для отчаяния.

Если такого утешения недостаточно, то для тех, кто все еще боится, что окончательное будущее Вселенной может оказаться худшим из только что описанных мной вариантов, замечу, что те же расчеты, которые указывают на это, возможно, указывают также на то, что наше нынешнее метастабильное состояние реальности будет существовать еще не просто миллиарды лет, но миллиарды миллиардов миллиардов лет.

Несмотря на тревогу о будущем, сейчас подходящее время, чтобы еще раз подчеркнуть, что Вселенной нет никакого дела до того, чего бы нам хотелось; ей наплевать, выживем ли мы. Ее жизнь продолжается независимо от того, существуем мы или нет. По этой причине мне кажется странно привлекательным только что описанный сценарий Судного дня. В этом случае замечательная случайность, приведшая к нашему существованию, — конденсация поля, обеспечивающего нынешнюю стабильность вещества, атомов и самой жизни, — представляется выпавшей нам ненадолго удачей.

Воображаемые ученые, живущие на гребне ледяного кристалла на морозном окне, который я описывал ранее, первым делом открыли бы, что одно из направлений в их вселенной является особым (несомненно, тамошние теологи объявили бы этот факт наглядным проявлением Божьей любви). Копая глубже, они, возможно, обнаружили бы, что это особое обстоятельство всего лишь случайность и могут существовать другие ледяные кристаллы, в которых выделяются другие направления.

Вот и мы открыли, что наш мир с его взаимодействиями и частицами и поразительной Стандартной моделью, которая привела к замечательно удачной расширяющейся Вселенной со звездами, планетами и жизнью, способной развить сознание, также простая случайность, ставшая возможной благодаря тому, что хиггсовское поле на раннем этапе развития Вселенной сконденсировалось именно таким образом, а не иначе.

Воображаемые ученые на гипотетическом ледяном кристалле могут праздновать свои великие открытия (как склонны делать и мы) и не знать, что Солнце вот-вот встанет, их кристалл скоро растает и все следы их краткого существования исчезнут. Но даже тогда — неужели это сделало бы их краткое существование менее захватывающим? Конечно, нет. Если наше будущее столь же эфемерно, мы можем по крайней мере наслаждаться нашим приключением и ценить все без исключения аспекты этой величайшей из когда-либо рассказанных историй... пока.

Эпилог

КОСМИЧЕСКАЯ СКРОМНОСТЬ

...ибо прах ты, и в прах возвратишься.

Быт. 3:19

«Слезы — в природе вещей, повсюду трогает души смертных удел»*.

Так сказал Вергилий, написавший первую великую эпическую поэму классической эры. Именно эти слова я выбрал в качестве эпиграфа к данной книге, потому что история, которую я хотел рассказать, не только наполнена столь же драматичными событиями, человеческими трагедиями и восторгами, но и мотивирована в конечном итоге схожими целями.

Почему мы занимаемся наукой? Отчасти дело, конечно, в том, что так мы можем обрести большую власть над окружающим миром. Лучше поняв Вселенную, мы сможем с большей точностью предсказывать будущее и строить машины, способные, возможно, изменить будущее — нужно надеяться, к лучшему.

* Вергилий. Энеида (Пер. С. Ошерова под ред. Ф. Петровского). — Прим. ред.

Но я уверен, что в конечном итоге заниматься наукой нас побуждает изначальная потребность лучше понять свои корни, свой смертный удел и в конечном итоге самих себя. Мы так устроены, чтобы выживать за счет разгадывания загадок, и это эволюционное преимущество со временем обеспечило нам роскошь стремления к разгадыванию всевозможных загадок — даже не таких животрепещущих, как поиск пищи или спасение ото льва. А какая загадка может быть более соблазнительной, чем загадка нашей Вселенной?

У человечества в ходе его эволюции не было выбора. Мы живем на планете возрастом 4,5 миллиарда лет, в Галактике возрастом 12 миллиардов лет и во Вселенной возрастом 13,8 миллиарда лет, в которой насчитывается где-то около триллиона галактик и которая все быстрее расширяется в будущее, которое мы пока не в силах предсказать.

Так что же нам делать с этой информацией? И есть ли в ней особый смысл для понимания нашей собственной, человеческой истории? Посреди всего этого космического великолепия и космической же трагедии как можем мы примириться с собственным существованием?

Для большинства людей центральные вопросы существования сводятся в конечном итоге к вечным вопросам. Почему в принципе существует Вселенная? Почему существуем мы?

Какой бы смысл ни вкладывали мы в вопрос «почему», если мы сможем лучше понять, «каким образом», то и «почему» тоже в какой-то степени прояснится. В предыдущей книге я попытался рассказать, что наука думает по первому из приведенных выше вопросов. История, изложенная здесь, дает лучший, по моему мнению, ответ на второй из них.

Столкнувшись с загадкой нашего существования, мы можем выбрать одно из двух. Либо считать, что обладаем каким-то особым значением и что Вселенная каким-то образом была сделана специально для нас. Для многих это самый удобный вариант. Именно такой выбор делали первые человеческие племена; люди очеловечивали природу, потому что это давало им некоторую надежду понять то, что в противном случае выглядело исключительно враждебным миром, вращающимся вокруг страданий и смерти. Этот же выбор сделан большинством мировых религий, каждая из которых предлагает собственное решение загадки существования.

Необходимость решить, какую из предлагаемых историй выбрать, привела к созданию священной книги одной из культур — Нового Завета, который иногда называют «величайшей из когда-либо рассказанных историй»; это история о том, как одна цивилизация будто бы открыла свою Божественную избранность. Но когда я вижу войны и убийства, причиной которых становится спор о том, какие молитвы нам читать, на ком жениться или за которым пророком следовать, я не могу не вспомнить Гулливера и Лилипутию, где государства воевали в споре о том, с какого конца Бог предписал человеку разбивать куриные яйца.

Второй вариант, который можно выбрать, обращаясь к этим вечным загадкам, состоит в том, чтобы не делать заранее никаких предположений об ответе. Такой выбор приведет нас к совсем другой истории. Более скромной, я думаю. В этой истории мы развиваемся во Вселенной, законы которой существуют независимо от нашего присутствия. В этой истории мы проверяем все детали, чтобы понять, не вкралась ли в них какая-нибудь ошибка. В этой истории нам предстоит удивляться на каждом шагу.

История, которую я изложил здесь, описывает не только вселенскую, но и человеческую драму. Она описывает историю самого дерзкого интеллектуального поиска, когда-либо предпринятого человечеством. В ней присутствуют даже аллегории из Писания — для тех, кому это интересно. Мы сорок лет блуждали в пустыне после появления Стандартной модели, прежде чем открыли Землю обетованную. Истина или, по крайней мере, истина в той мере, в какой мы на данный момент ее знаем, открылась нам в том, что большинству людей показалось бы непонятными каракулями, — в математике калибровочных теорий. Они были доставлены нам не ангелом на золотых скрижалях, а куда более практичными средствами: на листах бумаги из лабораторных журналов, заполненных в результате усердной работы легиона специалистов. Эти люди понимали, что их утверждения могут быть проверены на соответствие модели реальному миру, миру наблюдений и экспериментов. Но важно не только то, каким образом мы к этому пришли; не менее важно и то, что мы сумели зайти так далеко.

Какой вывод можно сделать в этот момент истории о том, почему мы здесь находимся? Ответ представляется особенно замечательным потому, что ясно показывает, на каком глубоком уровне вселенная нашего опыта представляет собой тень реальности.

Я начал эту книгу цитатой из натуралиста Бейкера, из его «Перегрина»: «Трудней всего увидеть то, что правда есть вокруг». Я сделал это потому, что рассказанная мной история — глубочайший пример этого мудрого наблюдения из всех мне известных.

Затем я изложил платоновскую аллегорию пещеры, поскольку не знаю лучшего или более поэтичного образа реальной истории науки. Триумфом человеческого

существования стало избавление от цепей, которые налагают на нас наши собственные ограниченные органы чувств. Нужно было интуитивно понять, что под поверхностью мира нашего опыта лежит реальность, часто куда более странная. Математическая красота этой реальности может быть безупречной, но наше существование в ней становится — более чем мы могли вообразить заранее — всего лишь случайностью.

Если задаться вопросом, почему все вокруг такое, какое есть, то лучший ответ, который мы можем предложить, состоит в том, что это результат случайности в истории Вселенной, где некое поле застыло в пустом пространстве определенным образом. Размышляя о том, какое это могло иметь значение, можно с тем же успехом размышлять и о том, какое значение имеет тот или иной конкретный ледяной кристалл, возникший на оконном стекле под действием утреннего морозца. Правила, допустившие наше появление в этом мире, не представляются чем-то более достойным того, чтобы за них сражаться и умирать, чем спор о том, правда ли «верх» во вселенной ледяного кристалла лучше «низа» или с какого конца — острого или тупого — следует разбивать яйцо.

Наши примитивные предки выжили в значительной мере потому, что понимали: природа, хотя она и замечательна, может быть враждебной и жестокой. Прогресс науки дополнительно прояснил, насколько жестокой и враждебной может быть Вселенная для жизни. Но признание этого не делает Вселенную менее поразительной. В такой Вселенной достаточно места для благоговения, изумления и восторга. Наоборот, признание этих фактов дает нам дополнительный повод радоваться тому, что мы пришли в этот мир и выжили.

Утверждать, что во Вселенной, у которой, кажется, и цели-то нет, наше собственное существование не имеет ни смысла, ни ценности, — беспримерный солипсизм, поскольку такая позиция предполагает, что без нас Вселенная не имеет никакой ценности. Величайший дар, который может дать нам наука, — это позволить нам преодолеть потребность всегда быть центром существования и заодно научиться ценить ту чудесную случайность, которой нам посчастливилось быть свидетелями.

Свет играл в нашей истории ведущую роль, как и в аллегории Платона. Изменения в нашем восприятии света привели к изменению представлений о сути пространства и времени. В конечном итоге именно благодаря изменениям в восприятии света стало ясно, что этот посланник реальности, столь важный для нас и нашего существования, представляет собой всего лишь удачное следствие космического случая. Случая, который однажды, возможно, переменится.

Здесь уместно признать, что после эпитафии, с которого началась эта книга, в «Энеиде» стоит полное надежды восклицание: «...не страшись: эта слава спасет нас, быть может». Будущее, которое может положить нам конец, не перечеркивает величие пути, который нами еще не пройден до конца.

История, рассказанная мной, не завершена. Скорее всего, в мире гораздо больше вещей, которых мы не понимаем, чем тех, в которых мы уже разобрались. В поисках смысла наши представления о реальности, конечно же, изменятся по ходу дальнейшей истории. Мне часто говорят, что некоторые вещи наука никогда не сможет сделать. Но откуда нам это знать, если не попытаться?

Судьбе угодно, чтобы я писал эти завершающие слова за столом, за которым мой покойный друг и соратник по битве против мифов и суеверий Кристофер Хитченс написал свой шедевр — книгу «Бог — не любовь» (*God Is Not Great*). Трудно не ощущать его присутствия, его направляющего влияния, хотя я уверен, что он первым напомнил бы мне, что подобные ощущения рождаются в моей голове, а не исходят от чего-то более значимого в космическом масштабе. Тем не менее название этой книги подчеркивает, что человеческие истории, которые он так беззаветно любил и так блестяще описывал, бледнеют по сравнению с историей, которую природа побуждает нас открывать. Так что человеческие истории про Бога тоже бледнеют по сравнению с настоящей «величайшей из когда-либо рассказанных историй».

В конечном итоге эта история не придает прошлому какого-то особого значения. Мы можем рефлексировать по поводу пройденного пути и даже гордиться им, но величайшее освобождение и величайшее утешение, которые может дать наука, исходят из величайшего, возможно, ее урока: что лучшие части истории, вероятно, еще только будут написаны.

Безусловно, эта возможность наделяет ценностью космическую драму нашего существования.

Благодарности

Эта книга написана отчасти как дань уважения всем тем, кто помогал приводить наши представления о Вселенной к современному виду. Поскольку я хотел правильно и уместно представить здесь и науку, и историю, то, закончив первый вариант книги, обратился за помощью в проверке того и другого ко многим своим коллегам. В ответ я получил замечания, полезные предложения и поправки и теперь хочу поблагодарить в первую очередь Шелдона Глэшоу и Уолли Гилберта за их предложения, а также Ричарда Докинза. Один из коллег, которого я в высшей степени уважаю и за вклад в науку, и за научную честность, пожелал остаться неназванным, но я в особом долгу перед ним за тщательное вычитывание рукописи и многочисленные предложенные им поправки. Помимо науки, я обратился к одному из своих друзей — писателю, которого в высшей степени уважаю и который также всегда старается разобраться в науке, — с просьбой высказать свои мысли о рукописи. Кормак МакКарти, добровольно вызвавшийся, что меня поразило, сделать техническую редактуру второго карманного издания моей более ранней книги «Квантовый

человек», вновь не поленился внимательно прочитать каждую страницу полученной рукописи с комментариями и предложениями, чтобы, по его словам, «довести книгу до идеала». Не могу утверждать, что сейчас она действительно идеальна, но могу точно сказать, что книга стала гораздо лучше благодаря его доброте, мудрости и таланту.

Эта книга никогда не была бы написана, если бы издателя для нее не выбрал искусно мой новый агент и старый друг Джон Брокман и его сотрудники; удачно сложилось, что редактором этой книги стала редактор моей книги «Вселенная из ничего» Лесли Мередит из издательства Atria Books. Лесли не только близка мне по духу; она была своего рода прекрасным пробным камнем, на котором я мог проверять идеи для этой книги. Она заставляла меня делать рассуждения о науке яснее, даже когда самому мне казалось, что в них и так уже все ясно, и убеждала не отступать от моего принципиального убеждения, что ученые не должны молчать о научной чепухе.

Когда передо мной стояла трудная задача рассмотрения множества существенных поправок в окончательный вариант книги, я знал, что всегда найду покой, поддержку и возможность побыть в одиночестве в доме, который обустроила для нас моя чудесная жена Нэнси, спасавшая и вдохновлявшая меня несчетное число раз, и что моя приемная дочь Санталь будет терпеливо выносить ночной стук по клавишам у меня в кабинете, прямо над ее спальней. Мои сотрудники в проекте Origins, в первую очередь исполнительный директор и моя правая рука Амелия Хиггинс, а также давняя помощница в Университете штата Аризона Джессика Страйкер, тоже внесли свою лепту — обеспечили мне поддержку и необходимое время, чтобы я мог иногда отвлекаться от повседневных обязанностей и работать

над книгой. А мои друзья в Финиксе Томас Хаулон и Патти Барнс, побуждавшие меня к написанию как этой, так и других книг, за множеством совместных завтраков делились своими мнениями по поводу многочисленных презентаций, подготовленных мной за время работы над книгой.

Наконец, ближе к финальному аккорду мой друг Кэрол Блу, вдова Кристофера Хитченса, и ее отец Эдвин Блу предложили мне воспользоваться гостевым домиком, где Кристофер написал в свое время множество очерков и книг, включая и замечательную вещь «Бог — не любовь». Не могу представить себе более вдохновляющего места для завершения такой работы и могу лишь надеяться, что финальный вариант книги несет на себе хотя бы слабый отпечаток красноречия, так отличавшего произведения Кристофера.

Об авторе

Лоуренс Краусс — директор проекта Origins («Происхождение») в Университете штата Аризона и профессор-основатель Школы исследования Земли и космоса, а также кафедры физики в ней. Краусс пользуется международной известностью как физик-теоретик с широкими научными интересами, включая связь физики элементарных частиц и космологии, где в область его интересов входят ранняя Вселенная, природа темного вещества, общая теория относительности и нейтринная астрофизика. Он исследует широкий круг вопросов, начиная от природы взрывающихся звезд и заканчивая вопросами происхождения всей массы во Вселенной. Лауреат многочисленных международных премий как за исследования, так и за усилия по расширению представлений общества о науке, Краусс является единственным физиком, удостоенным премий от всех трех физических сообществ США: Американского физического общества, Американского института физики и Американской ассоциации учителей физики, а в 2012 г. он был удостоен престижной награды «За общественные заслуги» от Национального совета по науке за большой вклад в просвещение общественности

и развитие представлений о науке во всем мире. Среди его наград также Римская премия 2013 г. (присуждает ее город Рим) и премия «Гуманист года» 2015 г. от Американской гуманистической ассоциации.

Краусс — автор более трехсот научных публикаций, а также многочисленных популярных статей о науке и ее текущих делах. Он выступает в роли комментатора и эссеиста в периодических изданиях, таких как *The New York Times* и *The New Yorker*, и регулярно появляется на радио, телевидении и киноэкране. Краусс выступал в роли продюсера и участника документального фильма *Unbelievers* («Неверующие»), в котором обсуждал науку и разум с Ричардом Докинзом. Он появляется также в новых фильмах Вернера Херцога «Соль и пламя» и «О, интернет!». Краусс — автор десяти популярных книг, включая бестселлеры по версии *The New York Times* «Физика “Звездного пути”» (1995 г.) и «Вселенная из ничего» (2012 г.).

Краусс — член Американского физического общества и Американской ассоциации содействия науке. Он председатель Совета спонсоров журнала *Bulletin of the Atomic Scientists* и состоит в Совете директоров Федерации американских ученых. Он был одним из основателей организации *ScienceDebate*, которая поднимала вопросы науки и разумной общественной политики во время президентских кампаний 2008, 2012 и 2016 гг. Краусс удостоился похвалы журнала *Scientific American* как редкий публичный интеллеktуал среди ученых-естественников; на протяжении всей карьеры он посвящал свое время вопросам науки и общества и помогал направлять национальные усилия на то, чтобы просвещать публику в научных вопросах, обеспечивать разумную публичную политику и защищать науку от нападков на самых разных уровнях.

Краусс Лоуренс

Почему МЫ существуем?

Величайшая
из когда-либо
рассказанных историй

Руководитель проекта *А. Тарасова*

Арт-директор *Ю. Буга*

Корректоры *Е. Сметанникова, С. Чупахина*

Компьютерная верстка *М. Поташкин*

Подписано в печать 01.11.2018. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.

Объем 26,5 печ.л. Тираж 3000 экз. Заказ № .

ООО «Альпина нон-фикшн»

123007, г. Москва,

ул. 4-я Магистральная, д. 5, строение 1, офис 13

Тел. +7 (495) 980-5354

www.nonfiction.ru



ТРАЕКТОРИЯ

ФОНД ПОДДЕРЖКИ НАУЧНЫХ,
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И КУЛЬТУРНЫХ
ИНИЦИАТИВ

НАУЧНЫЕ ГОСТИНЫЕ ФОНДА «ТРАЕКТОРИЯ»

У каждого ребёнка есть «свои 100 вопросов» про то, как устроен мир, что нового открывает людям наука, как происходят открытия и чем занимаются современные учёные. Родители и учителя, которым дети задают эти вопросы, не всегда могут дать на них исчерпывающие ответы.

Чтобы дать школьникам, учителям, родителям и всем, кто интересуется наукой, возможность вживую пообщаться с учёными, популяризаторами, общественными деятелями и просто интересными людьми, мы и создали этот проект. Участникам «Научных гостиных» открывается возможность узнать о последних научных открытиях, интересных фактах, связанных с историей развития науки, ознакомиться с информацией, выходящей за рамки школьной программы, получить ответы на вопросы, порой формирующие наше мировоззрение.

Формат «Научных гостиных» органично сочетает элементы как научно-популярных лекций и коротких рассказов о науке, истории науки, биографиях знаменитых людей, общественных деятелей, так и неформальной дискуссии и диалога молодёжной аудитории с приглашёнными гостями.

Свободный вход для всех желающих

Узнайте о проекте больше в наших социальных сетях и на сайте: www.traektoriafdn.ru

#фондтраектория





Складки на ткани пространства-времени

Эйнштейн, гравитационные волны и будущее астрономии

Говерт Шиллинг, пер. с англ., 2019, 423 с.

О чем книга

Гравитационные волны были предсказаны еще Эйнштейном, но обнаружить их удалось совсем недавно. В отдаленной области Вселенной коллапсировали и слились две черные дыры. Продолав путь, превышающий 1 миллиард световых лет, в сентябре 2015 года они достигли Земли. Два гигантских детектора LIGO зарегистрировали мельчайшую дрожь. Момент первой регистрации гравитационных волн признан сегодня научным прорывом века, открывшим ученым новое понимание процессов, лежавших в основе формирования Вселенной. Книга Говерта Шиллинга — захватывающее повествование о том, как ученые всего мира пытались зафиксировать эту неуловимую рябь космоса: десятилетия исследований, перипетии судеб ученых и проектов, провалы и победы. Автор описывает на первый взгляд фантастические технологии, позволяющие обнаружить гравитационные волны, вызванные столкновением черных дыр далеко за пределами нашей Галактики. Доступным языком объясняя такие понятия, как «общая теория относительности», «нейтронные звезды», «взрывы сверхновых», «черные дыры», «темная энергия», «Большой взрыв» и многие другие, Шиллинг постепенно подводит читателя к пониманию явлений, положивших начало эре гравитационно-волновой астрономии.

Почему книга достойна прочтения

Впервые на русском языке описываются перипетии поиска гравитационных волн, связанные с ними судьбы ученых и проектов, истории успеха и неудач.

Кто автор

Говерт Шиллинг — признанный во всем мире автор статей и книг по астрономии, родившийся в Нидерландах в 1956 г. Пишущий редактор в *Sky & Telescope*, публикуется в журналах *Science*, *New Scientist* и *BBC Sky at Night Magazine*. Автор более 50 книг на самые разные астрономические темы. В 2007 г. Международный астрономический союз присвоил астероиду 10986 название «Говерт» в его честь.



Нелокальность

Феномен, меняющий представление о пространстве и времени, и его значение для черных дыр, Большого взрыва и теорий всего

Джордж Массер, пер. с англ., 2018, 360 с.

Нелокальность дает нам нечто гораздо более впечатляющее, чем паранормальные явления: возможность взглянуть на истинную природу физической реальности. Если воздействия могут пересекать пространство так, словно его на самом деле нет, то из этого следует естественный вывод: пространства на самом деле нет. <...> Многие физики теперь считают, что пространство и время

обречены: они являются не фундаментальными элементами физического мира, но следствием первозданного состояния отсутствия пространства.

О чем книга

Эта книга посвящена истории феномена нелокальности в физике. Она представляет собой захватывающий обзор фактов, указывающих на то, что пространство-время является производным свойством Вселенной, а не ее фундаментальным элементом. Автор показывает, что нелокальность может быть матерью всех загадок и головоломок, с которыми сталкиваются физики в наши дни, — это не только странное поведение квантовых частиц, но и судьба черных дыр, происхождение космоса и присущее природе единство.

Почему книга достойна прочтения

Книга дает представление о современных концепциях пространства, времени и структуры Вселенной, в ней подробно представлена история спора вокруг локальности и нелокальности в физике и философии.

Кто автор

Джордж Массер — известный журналист, пишущий редактор журнала *Scientific American* и автор книги «Руководство по теории струн для полного идиота» (*The Complete Idiot's Guide to String Theory*). Как популяризатор науки Массер получил премию Джонатана Эберхарта от Американского астрономического общества, а также премию Американского института физики в 2011 г. В 2014–2015 гг. он был участником программы *Knigh Science Journalism* в Массачусетском технологическом институте. Его выступления можно увидеть в телешоу *Today*, на каналах CNN, NPR и BBC.



Происхождение всего От Большого взрыва до человеческой цивилизации

Дэвид Берковичи, пер. с англ., 2017, 202 с.

О чем книга

Невероятно компактный рассказ геофизика Дэвида Берковичи о том, как все везде появилось: звезды и галактики, атмосфера Земли, океаны, клетка и, наконец, человеческие цивилизации, написан трепетно и талантливо. Сочетая юмор и безупречную научную канву, Берковичи с головокружительной скоростью проводит нас сквозь пространство и время — почти 14 млрд лет, показывая при этом связи между теориями, помогающие понимать такие темы, как физика частиц, тектоника плит и фотосинтез. Уникальный эксперимент Берковичи в равной мере впечатляет научной убедительностью и литературным мастерством и станет незабываемым опытом знакомства с вопросами космологии, геологии, климатологии, человеческой эволюции как для искушенного читателя, так и для новичка.

Почему книга достойна прочтения

«Ого! — подумали вы, прочитав название этой книги. — Неужели этот самонадеянный автор сможет объяснить нам, откуда что взялось в этом мире?» Но именно так и обстоит дело. Берковичи рассказывает об эволюции нашего мира понятно, профессионально и с легким юмором. Эта книга — для любознательных, желающих из немногословного, но точного рассказа сформировать для себя картину эволюции мира — от его рождения до наших дней. При чтении этой талантливой книги мозаика наших клиповых знаний о Большом взрыве, эволюции звезд, тектонике плит и фотосинтезе складывается в стройную картину развития мира. И это побуждает нас еще глубже погружаться в его тайны, которых все еще немало.

Владимир Сурдин, доцент физического факультета МГУ,
старший научный сотрудник ГАИШ МГУ

Кто автор

Дэвид Берковичи — профессор геологии и геофизики Йельского университета, обладатель многочисленных научных наград и премий, член Американского геофизического общества и Американской академии искусств и наук. Специализируется в области физики планет, а также тектоники плит, внутреннего строения Земли и вулканической деятельности.