

Достучаться до небес

Лиза Рэндалл

Lisa Randall

Knocking on Heaven's Door

HOW PHYSICS AND SCIENTIFIC
THINKING ILLUMINATE THE UNIVERSE
AND THE MODERN WORLD



THE BODLEY HEAD
LONDON

Лиза Рэндалл

Достучаться до небес

НАУЧНЫЙ ВЗГЛЯД
НА УСТРОЙСТВО ВСЕЛЕННОЙ

Перевод с английского

3-е издание



Династия

АНФ

Москва

2016

УДК 539.1:001.8

ББК 22.38

P96

Переводчик Наталья Лисова

Научные консультанты

Михаил Ревнивцев, д. ф.-м. н.

Дмитрий Горбунов, к. ф.-м. н.

Редактор Юлия Быстрова

Рэндалл Л.

P96 Достучаться до небес: Научный взгляд на устройство Вселенной / Лиза Рэндалл; Пер. с англ. — 3-е изд. — М.: Альпина нон-фикшн, 2016. — 518 с.

ISBN 978-5-91671-570-5

Человечество стоит на пороге нового понимания мира и своего места во Вселенной — считает авторитетный американский ученый, профессор физики Гарвардского университета Лиза Рэндалл, и приглашает нас в увлекательное путешествие по просторам истории научных открытий. Особое место в книге отведено новейшим и самым значимым разработкам в физике элементарных частиц; обстоятельствам создания и принципам действия Большого адронного коллайдера, к которому приковано внимание всего мира; дискуссии между конкурирующими точками зрения на место человека в универсуме. Содержательный и вместе с тем доходчивый рассказ знакомит читателя со свежими научными идеями и достижениями, шаг за шагом приближающими человека к пониманию устройства мироздания.

УДК 539.1:001.8

ББК 22.38

Издание подготовлено при поддержке
Фонда Дмитрия Зимина «Династия»



Династия

Фонд некоммерческих программ «Династия» основан в 2002 году Дмитрием Борисовичем Зиминим, почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда — поддержка фундаментальной науки и образования в России, популяризация науки и просвещение.

«Библиотека Фонда «Династия» — проект Фонда по изданию современных научно-популярных книг, отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена под эгидой этого проекта.

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 mylib@alpina.ru.

© Lisa Randall, 2011

ISBN 978-5-91671-570-5 (рус.)

ISBN 978-0-06-172372-8 (англ.)

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

7

Часть I

МАСШТАБИРОВАНИЕ РЕАЛЬНОСТИ

Глава 1	Тебе — мало, мне — в самый раз	23
Глава 2	Раскрывая секреты	50
Глава 3	Жизнь в материальном мире	66
Глава 4	В поисках ответов	88

Часть II

МАСШТАБИРОВАНИЕ ВЕЩЕСТВА

Глава 5	Волшебная экскурсия в глубь материи	101
Глава 6	«Видеть» — значит верить	130
Глава 7	На краю Вселенной	152

Часть III

АППАРАТУРА, ИЗМЕРЕНИЯ И ВЕРОЯТНОСТИ

Глава 8	Одно кольцо, чтобы править всем...	169
Глава 9	Возвращение кольца	188
Глава 10	О черных дырах, которые поглотят весь мир	214
Глава 11	Рискованное дело	228
Глава 12	Измерение и неопределенность	255
Глава 13	Эксперименты CMS и ATLAS	271
Глава 14	Как распознать частицы	302

Часть IV

МОДЕЛИ, ПРЕДСКАЗАНИЯ И ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Глава 15	Истина, красота и другие научные заблуждения	323
Глава 16	Бозон Хиггса	342
Глава 17	Вакантное место топ-модели	370
Глава 18	Снизу вверх или сверху вниз?	407

Часть V

МАСШТАБИРОВАНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

Глава 19	Вселенная наизнанку	423
Глава 20	Что велико для тебя, мало для меня	440
Глава 21	Гости с темной стороны	460

Часть VI

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

Глава 22	Думать глобально, действовать локально	483
<i>Заключение</i>		499
<i>Благодарности</i>		506

ВВЕДЕНИЕ

Мир стоит на пороге великих открытий. Сегодня проводятся самые масштабные и интересные в истории эксперименты в области физики элементарных частиц и космологии, и самые талантливые физики и астрономы мира объединяют усилия для анализа их результатов. Возможно, в ближайшее десятилетие ученые обнаружат то, что изменит наши представления о фундаментальном строении вещества и структуре самого пространства; не исключено даже, что наши представления о природе реальности станут более полными. Ученые, которые вплотную занимаются этими вопросами, уверены, что новые факты не просто дополняют уже имеющиеся. Мы с нетерпением ждем открытий, которые приведут к зарождению принципиально новой парадигмы структуры Вселенной и изменят представление об ее устройстве, сложившееся на основании прошлых открытий.

10 сентября 2008 г. произошло историческое событие — первый пробный пуск Большого адронного коллайдера (БАК), на который все мы возлагаем большие надежды. Слово «большой» в названии относится не к адронам, а к самому коллайдеру. Основа БАКа — громадный кольцевой туннель длиной 26,6 км*, расположенный между горами Юра и Женевским озером и дважды пересекающий франко-швейцарскую границу. Электрические поля внутри этого туннеля разгоняют два пучка частиц, в каждом из которых движутся миллиарды протонов (протоны принадлежат к классу элементарных частиц, известных как адроны, поэтому коллайдер — адронный); частицы носятся по окружности, делая за одну секунду примерно 11 000 оборотов.

Коллайдер служит площадкой для крупнейших экспериментов из тех, какие когда-либо ставились на Земле. Цель ученых — про-

* Я буду часто использовать приближенное значение 27 км. — *Прим. авт.*

вести детальные исследования структуры материи на невозможных доселе расстояниях и при более высоких энергиях, чем когда-либо прежде. При таких энергиях должен возникнуть целый ряд необычных элементарных частиц; кроме того, предположительно должны возникнуть взаимодействия, имевшие место при рождении Вселенной — примерно через одну триллионную долю секунды после Большого взрыва.

При проектировании Большого адронного коллайдера пришлось задействовать всю изобретательность ученых и инженеров и все возможности современной техники; его строительство также оказалось сложнейшей задачей. К огромному разочарованию ученых и сочувствующих, всего через девять дней после первого успешного пуска в коллайдере из-за некачественной пайки в одном из контактов произошла авария. Однако осенью 2009 г. БАК вернулся в строй и заработал даже лучше, чем кто-либо надеялся. Так многолетние ожидания стали реальностью.

Весной того же года с космодрома во Французской Гвиане были запущены научно-исследовательские космические аппараты — крупнейший космический телескоп *Herschel* и космическая обсерватория *Planck*. Я узнала об этом от группы радостно возбужденных астрономов Калифорнийского технологического института. Они встречали 13 мая в 5:30 утра в Пасадене, а я гостила там, чтобы удаленно наблюдать за эпохальным пуском. Миссия *Herschel* — прояснить процессы формирования и эволюции звезд и галактик, а *Planck* — передать на Землю подробные данные об остаточном излучении, сохранившемся после Большого взрыва, что позволит больше узнать о начальном периоде эволюции нашей Вселенной. Надо сказать, что космический запуск всегда вызывает радость и тревогу одновременно — ведь от 2 до 5% их заканчиваются неудачей, и тогда пропадают годы работы над специализированным научным оборудованием спутника, который вместе с ракетой падает обратно на Землю. К счастью, этот пуск прошел успешно, и весь день приходила информация о благополучном ходе полета. Тем не менее пройдет еще не один год, прежде чем *Herschel* и *Planck* передадут нам ценнейшую информацию о звездах и Вселенной.

На сегодняшний момент физика дает прочную базу для наших знаний о том, как функционирует Вселенная на самых разных пространственных масштабах и при самых разных энергиях. Теоретические и экспериментальные исследования позволили ученым глубоко понять элементы и структуры — от самых крошечных до громадных. Со временем нам удалось восстановить подробную и непротиворечивую картину того, как из отдельных кусочков складывается целое. Физические теории описывают, как развивался космос: из крошечных составляющих сформировались атомы, которые в свою очередь слились в звезды, а те — образовали галактики и более крупные структуры, разбросанные по Вселенной. Затем некоторые звезды взорвались и породили тяжелые элементы, которые попали в нашу Галактику и в Солнечную систему, — без них в конечном итоге не возникла бы жизнь. На базе надежных и обширных сведений, полученных при помощи БАКа и космических аппаратов, физики надеются расширить наши представления об окружающем мире и достигнуть большей точности, чем когда-либо прежде. Это рискованная и амбициозная затея.

Вероятно, вам доводилось слышать четкое и на первый взгляд точное определение науки, противопоставляющее ее всевозможным системам верований, таким как религия. Однако реальная история развития науки далеко не проста. Нам, безусловно, нравится думать — по крайней мере сама я поначалу думала именно так, — что наука достоверно отражает реальность и правила, которым подчиняется физический мир. Но актуальные исследования почти неизбежно проходят в ситуации неопределенности, когда мы надеемся, что продвигаемся вперед, но не до конца в этом уверены. Чтобы достойно ответить на вызовы, ученый должен рождать перспективные идеи и при этом всегда сомневаться в них, проверять истинность их самих и вытекающих из них следствий. Научные исследования неизбежно балансируют на грани сложных, иногда противоречивых или конкурирующих, но, как правило, чрезвычайно интересных идей. Задача ученых — расширять пределы челове-

ческих знаний. Но, когда жонглирование данными, концепциями и уравнениями только начинается, их интерпретация часто остается неясной — причем для всех, включая и самих ученых.

Мои исследования сосредоточены на теории элементарных частиц (самых маленьких из известных нам объектов), но иногда затрагивают и теорию струн, и космологию (самые крупные объекты). Мы с коллегами пытаемся понять, что лежит в основе материи, что находится там, далеко во Вселенной, и как связаны между собой все фундаментальные величины и свойства, обнаруженные экспериментальным путем. Физики-теоретики не проводят настоящих экспериментов, цель которых — определить, какие из имеющихся теорий применимы в реальном мире. Вместо этого мы пытаемся предсказывать возможные выводы из того, что могут дать эксперименты, и разрабатываем новые способы проверки идей. Ответы на вопросы, которые мы пытаемся отыскать, вряд ли изменят в ближайшем будущем нашу повседневную жизнь. Но в итоге они, возможно, помогут нам понять, кто мы и откуда взялись.

Эта книга — о наших исследованиях и важнейших научных вопросах, стоящих перед человечеством. Новые открытия в физике частиц и космологии способны радикально изменить наши представления о мире: о его устройстве, эволюции и силах, им управляющих. В книге рассказывается об экспериментальных исследованиях на базе Большого адронного коллайдера и о теоретических работах, в которых ученые выступают как провидцы. В ней говорится также о космологических исследованиях — о том, как человек пытается проникнуть в суть Вселенной, особенно так называемой «темной» материи.

Но это еще не все. Здесь рассматриваются и более общие вопросы, свойственные любым научным поискам. Наряду с описанием исследований, идущих в авангарде современной науки, я пытаюсь прояснить для читателя природу науки. Вы узнаете, как ученые решают, какие именно вопросы перед собой ставить, почему они не всегда могут договориться даже об этом и как верные научные идеи в конце концов побеждают. Я рассказываю, какими путями развивается наука и чем она принципиально отличается от иных способов поиска истины, стараюсь раскрыть философские основы

науки и описать промежуточные этапы, когда еще неясно, чем закончится дело и кто окажется прав. Кроме того — и это не менее важно, — книга показывает, как научные идеи и методы применяются вне науки и способствуют более разумному принятию решений во всех сферах жизни.

Эта книга предназначена для всех, кто хотел бы получить лучшее представление о текущем состоянии теоретической и экспериментальной физики, а также о природе современной науки и принципах здоровой научной мысли. Люди часто не понимают, что такое наука и что человечество может узнать с ее помощью. И книга — моя попытка развенчать некоторые неверные представления и, возможно, выразить собственное раздражение от того, как сейчас понимают и применяют науку.

Несколько последних лет подарили мне уникальные впечатления и беседы, которые многому меня научили, и мне хотелось бы поделиться ими. Я не являюсь специалистом во всех областях, которые затрагиваю, да и рассмотреть их здесь сколько-нибудь подробно невозможно. Но все же я надеюсь, что эта книга поможет читателю распознать самые надежные источники научной информации — или дезинформации, — что, безусловно, пригодится в будущем при самостоятельном поиске ответов. Некоторые мои соображения могут показаться очевидными, но более полное представление о том, как устроена современная наука, поможет лучше разобраться и в текущих исследованиях, и в проблемах, с которыми сталкивается в наши дни человечество.

Сегодня, в эпоху приквелов, вряд ли кого-то удивит, что в этой работе содержится как бы предыстория сюжета моей предыдущей книги «Закрученные пассажи»^{*} и одновременно — информация о том, как обстоят дела в сегодня и чего мы ждем в будущем. Она заполняет пробелы — описывает научную базу новых идей и открытий — и объясняет, почему мы в настоящий момент с нетерпением ждем появления новых данных.

В книге подробности самых современных научных исследований чередуются с размышлениями о темах и концепциях, на кото-

^{*} Рэндалл Л. Закрученные пассажи. Проникая в тайны скрытых размерностей пространства. — М.: УРСС, Либроком, 2011.

рых зиждется наука и которые помогают разобраться в окружающем мире. Часть I, главы 11 и 12 части II, главы 15 и 18 части III и финальная часть VI (подведение итогов) больше рассказывают о научном мышлении, тогда как в остальных главах говорится преимущественно о физике — о сегодняшнем ее состоянии и о том, как мы к нему пришли. В определенном смысле это две книги в одной, но читать их лучше всего вместе. Кому-то может показаться, что современная физика слишком далека от повседневной жизни, чтобы быть понятной; однако знакомство с базовыми философскими и методологическими концепциями, направляющими нашу мысль, поможет прояснить для себя как сущность науки, так и значение научного мышления как такового, в чем мы убедимся на множестве примеров. И наоборот, полное понимание базовых элементов научного мышления достигается лишь на примерах из прикладной науки. Желаящие могут, разумеется, бегло просмотреть или вообще пропустить одну из двух частей, но следует иметь в виду, что лишь вместе они образуют гармонию.

Ключевую роль на протяжении всей книги будет играть понятие масштаба. Законы физики — это те рамки, которые соединяют теоретические и физические описания в единое логически последовательное целое — от мельчайших сгустков частиц, которые в настоящее время исследуются на БАКе, до громадного космоса*. Категория масштаба принципиально важна как для нашего мышления, так и для конкретных фактов и идей, с которыми мы будем иметь дело. Признанные научные теории имеют свое применение на доступных нам масштабах. Но, по мере того как мы получаем все новые данные о неисследованных прежде объектах (больших и маленьких), эти теории постепенно поглощаются другими, все более точными и фундаментальными. В главе 1 мы попытаемся определить элементы масштаба и объяснить, почему в физике так важно классифицировать объекты по размерам и как новые научные достижения выстраиваются на фундаменте прежних.

* Большой адронный коллайдер весьма велик, но используется он для изучения мельчайших объектов. Причины, по которым он сделан таким большим, будут описаны ниже, когда мы рассмотрим детально конструкцию БАКа. — *Прим. авт.*

Кроме того, в части I сравниваются различные способы получения знаний. Спросите, что представляют люди, когда думают о науке, и, скорее всего, вы получите абсолютно разные ответы. Некоторые скажут, что наука — это жесткие неизменные утверждения об устройстве физического мира. Другие определяют науку как набор принципов, которые постоянно заменяются другими, а третьи заявят, что наука — это не что иное, как еще одна система верований, и ничем качественно не отличается от философии или религии. И все будут неправы.

В постоянных ожесточенных спорах, в том числе и внутри научного сообщества, нет ничего удивительного; главная причина здесь — непрерывная эволюция самой науки. В этой части мы немного поговорим об истории науки; это поможет читателю понять, как сегодняшние исследования вырастают из интеллектуальных прорывов XVII в., и вспомним некоторые не самые известные факты давней дискуссии между наукой и религией и их противостояния, возникшего примерно в то же время. Речь пойдет также о материалистических взглядах и о том, к каким неудобным следствиям они приводят в вопросе о науке и религии.

Часть II обращается к физической структуре материального мира и составляет примерную карту предстоящего научного путешествия: от материи знакомых и привычных масштабов мы двинемся вниз, к мельчайшим объектам, проводя одновременно их классификацию. Мы покинем знакомую территорию и перейдем к объектам субмикроскопическим, внутреннюю структуру которых можно исследовать лишь при помощи гигантских ускорителей частиц. Закончится раздел краткой информацией о наиболее крупных текущих экспериментах — Большом адронном коллайдере и астрономических исследованиях самого начала эволюции Вселенной.

Всякое интересное научное открытие потенциально способно радикально изменить наше мировоззрение: это в полной мере относится к нынешним амбициозным проектам. В части III мы начнем подробнее разбираться в работе БАКа и в том, как это громадное устройство создает и сталкивает между собой протонные пучки; цель эксперимента — получение новых частиц, которые

расскажут нам об устройстве мельчайших обнаруженных объектов. В этом разделе объясняется также, как ученые, проводящие эксперимент, собираются интерпретировать полученные данные.

Европейский центр ядерных исследований — CERN* (равно как и лживый голливудский блокбастер «Ангелы и демоны») — много сделал для популяризации физики элементарных частиц и ее экспериментальной стороны. Многие слышали о гигантском ускорителе частиц, который будет сталкивать между собой высокоэнергетические протоны и создавать в крохотном пространстве невиданные прежде формы материи. Сегодня БАК работает и готов изменить наши взгляды на фундаментальную природу материи и пространства. Но мы пока не знаем, что именно обнаружится с его помощью.

В ходе нашего научного путешествия мы поразмышляем о научной неопределенности и о том, что на самом деле могут показать измерения. Исследования по самой природе своей пересекают грань непознанного. Эксперименты планируются таким образом, чтобы уменьшить или устранить как можно больше неопределенностей. Тем не менее, хотя это может показаться парадоксальным, в повседневной научной практике полно неопределенностей. Часть III исследует, как ученые отвечают на современные вызовы и как понимание принципов научного мышления помогает обычному человеку верно интерпретировать наш сложный мир.

В части III рассматривается также пресловутая проблема черных дыр и то, как раздутые по их поводу страхи смотрятся на фоне некоторых реальных опасностей. Мы рассмотрим важные вопросы анализа затрат и результатов и проблему рисков, поговорим о возможных подходах к ним — как в лаборатории, так и вне ее.

Часть IV рассказывает о поиске бозона Хиггса, а также о конкретных моделях — обоснованных предположениях о том, что существует и может быть обнаружено при помощи БАКа. Если эксперименты на коллайдере подтвердят некоторые из предложенных теоретиками идей — или откроют что-нибудь непредвиденное, — их результаты заметно изменят наши представления

* Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire — Европейский совет ядерных исследований. — *Прим. пер.*

о мире. В этом разделе объясняется механизм Хиггса, ответственный за появление масс у элементарных частиц, а также проблема иерархии, из которой вытекает, что мы должны обнаружить еще больше частиц. В ней также исследуются модели решения этой проблемы и предсказанные ими экзотические новые частицы, связанные, к примеру, с суперсимметрией или дополнительными пространственными измерениями.

Параллельно с конкретными гипотезами в этой части объясняется, как физики конструируют модели. В ней рассказывается не только о том, что ищут физики с помощью БАКа, но и о том, как они предугадывают, что именно найдут. В этой части описано, как ученые пытаются связать абстрактные на первый взгляд данные, полученные на БАКе, с глубокими и фундаментальными идеями, которые мы в настоящее время исследуем.

После исследования глубин вещества мы обратим в части V взгляд вовне. В то время как БАК исследует самые крохотные материальные объекты, космические аппараты и телескопы, напротив, разбираются с самыми крупными объектами космоса — они пытаются определить, в каком темпе ускоряется расширение Вселенной, и подробно изучают реликтовое излучение, оставшееся со времен Большого взрыва. Совсем скоро нас могут ожидать поразительные открытия в *космологии* — науке о том, как развивалась Вселенная. В этом разделе мы рассмотрим Вселенную в самом крупном масштабе и обсудим связь космологии и физики элементарных частиц, а также загадочную и неуловимую темную материю и эксперименты, направленные на ее поиски.

Завершит книгу часть VI с размышлениями о творческих возможностях человека и о том, из какого множества разнообразных элементов складывается креативное мышление. Мы обсудим, как человек может получить ответы на глобальные вопросы, совершая мелкие повседневные действия. И в самом конце поговорим о том, почему сегодня так важны наука и научное мышление, а также о симбиозе техники и научного мышления, привнесшем так много прогрессивного в современную жизнь.

Мне часто напоминают, как сложно неученым понимать и оценивать абстрактные идеи, с которыми имеет дело современ-

ная наука. Я осознала это в тот момент, когда мне пришлось после публичной лекции о дополнительных измерениях и физике встретиться с группой студентов колледжа. Мне сказали, что все они очень хотят задать мне один вопрос, и я подумала, что они что-то недопоняли в моей лекции. Оказалось, их всех интересовал мой возраст. Однако отсутствие интереса — не единственная проблема, и те студенты все же постепенно перешли к вопросам о науке. Бессмысленно, однако, отрицать, что фундаментальная наука часто абстрактна, и оправдать ее существование в глазах неспециалистов зачастую непросто. С этим препятствием я столкнулась осенью 2009 г. на слушаниях в Конгрессе, где я была вместе с Деннисом Коваром, заместителем директора по физике высоких энергий Управления науки Министерства энергетики США, Пьером Оддоном, директором Национальной ускорительной лаборатории имени Ферми, и Хью Монтгомери, директором Лаборатории Джефферсона — еще одного центра ядерной физики. В правительственное учреждение я попала впервые со школьных времен — тогда я стала финалисткой научного конкурса, устроенного фирмой Westinghouse, и конгрессмен моего округа Бенджамин Розенталь устроил мне экскурсию; благодаря его великодушию я многое увидела, тогда как остальные финалисты смогли только сфотографироваться с ним.

Во время недавнего визита я вновь получила возможность увидеть кабинеты, в которых делается политика. Зал, где заседает Комитет по науке и технике Палаты представителей, находится в офисном здании Рейберн-Хаус. Мы как приглашенные «свидетели» сидели лицом к конгрессменам. Над головами депутатов висели воодушевляющие высказывания, одно из которых гласило: «Без откровения народ гибнет. (Притчи 29:18)».

Судя по всему, американское правительство не в состоянии обойтись без ссылок на Священное писание даже в зале, где конгрессмены обсуждают исключительно науку и технику. Тем не менее мысль, выраженная в этих словах, благородна и точна, и мы все были бы рады, если бы законодатели про нее не забывали.

Вторая табличка содержала цитату из Теннисона: «Ибо я погружался в будущее так далеко, насколько видят глаза, /И видел

образ мира и все его будущие чудеса». Тоже неплохая мысль; пожалуй, об этом действительно стоит помнить, излагая цели наших исследований.

Однако ирония ситуации заключалась в том, что лицом к этим изречениям сидели мы — «свидетели» из мира науки, и без того настроенные в таком ключе. А народные представители сидели прямо под ними и, соответственно, не могли их видеть. Конгрессмен Липински сказал во вступительном слове, что открытия порождают еще больше вопросов и серьезные метафизические проблемы; он признал, что видел таблички с изречениями, но они очень легко забываются. «Мало кто из нас смотрит вверх хотя бы иногда», — сказал он, поблагодарив нас за напоминание.

Оставив интерьер Конгресса в покое, мы, ученые, перешли к делу и попробовали объяснить, почему настоящий период так интересен и беспрецедентен для космологии и физики элементарных частиц. Вопросы конгрессменов иногда были острыми и скептическими, но я могу представить себе, какое сопротивление им приходится преодолевать, объясняя своим избирателям, почему решение прекратить финансирование науки было бы ошибочным даже перед лицом экономического кризиса. Вопросы нам задавали самые разные — подробно расспрашивали о целях конкретных экспериментов, но брали и шире — интересовались ролью науки и тем, куда она ведет человечество.

Периодически конгрессмены покидали зал, чтобы участвовать в голосовании. В промежутках между такими выходами мы приводили примеры благ, полученных в качестве побочного продукта от развития фундаментальной науки. Даже самые общие научные исследования зачастую приносят неожиданные плоды. Мы говорили о том, как Тим Бернерс-Ли придумал Всемирную паутину как средство для обеспечения сотрудничества физиков из разных стран в совместных экспериментах в CERN. Мы обсуждали медицинские приложения, такие как ПЭТ — позитронно-эмиссионную томографию — метод исследования внутренних органов при помощи античастиц, парных к электрону. Мы объясняли важность промышленного производства сверхпроводящих магнитов, которые были разработаны для коллайдера, но сегодня применяются

и в магнитно-резонансной томографии. Наконец, мы говорили о применении общей теории относительности в точном прогнозировании, в том числе в работе глобальной навигационной системы GPS, которой мы ежедневно пользуемся.

Конечно, серьезная наука не обязательно приносит немедленные практические плоды. Даже если работа окупается и приносит прибыль, мы редко знаем об этом заранее или даже в момент совершения открытия. Когда Бенджамин Франклин сделал вывод об электрической природе молнии, он никак не мог знать, что скоро электричество изменит лицо планеты. И Эйнштейн, работая над общей теорией относительности, не ждал, что ее можно будет применить в каких-либо практических устройствах.

Таким образом, в тот день мы упирали в первую очередь не на практические приложения научных исследований, а на жизненную важность чистой науки вообще. Наука в Америке имеет несколько сомнительный статус, но сегодня многие уже понимают ее ценность. После Эйнштейна представления общества о Вселенной, времени и пространстве изменились, о чем свидетельствует песня *As Time Goes By**, процитированная в «Закрученных пассажирах». Даже язык и стиль мышления меняются по мере того, как человек лучше понимает окружающий мир и развивает в себе новые мыслительные возможности. От того, чем заняты сегодня ученые и как мы все к этому относимся, зависят и наш завтрашний взгляд на мир, и развитие стабильного думающего общества.

Мы живем в невероятно интересное время, когда проводятся самые дерзкие эксперименты в области физики и космологии. В книге мы рассмотрим широкий спектр всевозможных исследований и коснемся разных способов познания мира — через искус-

* Знаменитая песня Германа Хапфилда, ставшая очень популярной после фильма «Касабланка» (1942), в первоначальном варианте 1931 г. начиналась безошибочно опознаваемой отсылкой к последним достижениям физики:

«Век, в котором мы живем,
Становится причиной опасений
Из-за скорости, новых изобретений
И вещей наподобие четвертого измерения.
Мы уже слегка утомлены
Теорией Эйнштейна...» — *Прим. авт.*

ство, религию и науку, — но обсуждать будем преимущественно цели и методы современной физики. Ведь даже самые крохотные объекты Вселенной помогают нам понять, кто мы такие и откуда пришли. Крупные структуры проливают свет на наше космическое окружение, а также на происхождение Вселенной. Эта книга о том, что и каким образом мы надеемся найти. Наше путешествие будет полно загадок и приключений — так что добро пожаловать на борт.

Часть I

МАСШТАБИРОВАНИЕ РЕАЛЬНОСТИ

ГЛАВА 1

ТЕБЕ — МАЛО, МНЕ — В САМЫЙ РАЗ

Среди множества причин, по которым я выбрала своей профессией физику, было желание сделать что-нибудь долговременное, даже вечное. Если, рассуждала я, мне предстоит вложить столько времени, энергии и энтузиазма в какое-то дело, то результат этого дела должен быть истинным и... ну, скажем, остаться навсегда. Как большинство людей, я считала, что научные открытия и идеи выдерживают испытание временем.

Пока я билась над физикой, моя подруга Анна Христина Бюхманн изучала в колледже английский язык. По иронии судьбы, она выбрала своей профессией литературу ровно по той же причине, которая привела меня к физике и вообще к науке. Ее привлекали вдохновенные истории, способные пережить века. Обсуждая с ней много лет спустя роман Генри Филдинга «История Тома Джонса, найденыша», я узнала, что еще студенткой она принимала участие в написании аннотации того самого издания этого романа, которое мне так понравилось.

«Том Джонс» был опубликован 250 лет назад, тем не менее его юмор и затронутые в романе вопросы актуальны по сей день. Попад впервые в Японию, я прочла гораздо более древнее произведение — «Повесть о Гэндзи» — и поразились тому, насколько современными выглядят его герои, хотя прошла уже целая тысяча лет с тех пор, как Мурасаки Сикибу описала их всех. Гомер создал «Одиссею» еще на 2000 лет раньше. Несмотря на то что и век,

и люди там описаны совсем другие, мы до сих пор наслаждаемся рассказом о странствиях Одиссея и неподвластными времени картинами человеческой природы.

Ученые редко читают старые — и тем более древние — научные тексты. Как правило, мы оставляем это занятие историкам и литературным критикам. Тем не менее мы всю пользуемся знаниями, накопленными человечеством за многие века, — это можно сказать и о Ньютоне с его XVII в., и о Копернике, жившем еще на сотню лет раньше. Может быть, мы забываем их книги, зато тщательно сохраняем изложенные в них важные идеи.

Разумеется, наука не есть неизменное собрание универсальных законов, которое все мы изучаем в начальной школе. С другой стороны, это и не собрание произвольных правил. Наука — непрерывно развивающийся массив знаний. Многие из гипотез, которые мы в настоящий момент исследуем, окажутся ошибочными или неполными. Научные формулировки, естественно, меняются, по мере того как мы преодолеваем границы известного и вторгаемся в области непознанного, где можно уловить далекий отблеск еще более глубоких истин.

Ученым постоянно приходится сталкиваться с одним занятным парадоксом. Заключается он в том, что в погоне за вечными истинами нам часто приходится работать с идеями, которые мы сами же затем пересматриваем или отбрасываем — иногда под давлением экспериментальных данных, иногда просто с развитием представлений об изучаемом предмете. Прочное ядро проверенных и надежных знаний всегда окружено неопределенностью, которая и представляет предмет текущих исследований. Некоторые горячо обсуждаемые сегодня идеи и предположения будут мгновенно забыты, если завтра более убедительные или полные экспериментальные данные лишат их основы.

Когда Майк Хакаби, кандидат в президенты США от Республиканской партии на выборах 2008 г., предпочел в своих публичных речах сделать ставку на религию, а не на науку — отчасти потому, что научные «верования» меняются, тогда как христиане считают своим учителем вечного Бога, — в этом был резон. Вселенная развивается, и научные знания о ней — тоже. Постепенно

ученые снимают с реальности один покров за другим и обнажают то, что скрывается в глубине. Зондируя все более далекие от нас масштабы реальности, мы расширяем и обогащаем представления человечества об окружающем мире. Когда нам удастся узнать что-то новое о том, как устроен наш мир, мы делаем шаг вперед, а неизведанное отступает. При этом научные «верования» соответствующим образом изменяются.

Тем не менее сегодня, когда развитие техники позволяет нам выйти на новый уровень наблюдений, мы не спешим отбрасывать теории, которые при доступных прежде масштабах и энергиях или при доступных прежде скоростях и плотностях позволяли строить верные гипотезы. Научные теории растут и расширяются, вбирая в себя новые знания, но их надежная и проверенная основа остается прежней. Таким образом, наука всегда включает старые, подтвержденные знания в более полную картину, которая возникает при очередном расширении возможностей и для экспериментальных наблюдений, и для теоретических исследований. Перемены не обязательно означают, что старые правила неверны; они могут означать, к примеру, что в мельчайших масштабах, где были выявлены новые компоненты, эти правила уже не применимы. Так что массив наших знаний может включать прежние идеи и при этом расширяться со временем, хотя, скорее всего, за его пределами всегда будет лежать обширная область неизведанного. Как путешествия всегда очень интересны, хотя никто не в силах побывать в каждой точке планеты (не говоря уже о космосе), так и расширение представлений о природе материи и Вселенной обогащает нашу жизнь. А неизведанное всегда рядом, оно зовет и вдохновляет на дальнейшие исследования.

В моей собственной области исследований — физике элементарных частиц — рассматриваются все более короткие расстояния между частицами; цель нашей работы — изучать все более крохотные компоненты материи. В текущих экспериментальных и теоретических исследованиях ученые, забираясь все глубже, пытаются раскрыть внутренние тайны материи. Но она, несмотря на часто используемую аналогию, не похожа на русскую матрешку, где в уменьшенном масштабе повторяются точно такие же эле-

менты. Изучение все более мелких расстояний между частицами интересно еще и тем, что правила в этом мире могут меняться с изменением масштабов. Могут проявляться совершенно новые взаимодействия и силы, действие которых на предыдущем уровне исследований, т. е. на больших расстояниях, невозможно было уловить.

Понятие масштаба, которое говорит физикам, о каких размерах и энергиях в данном исследовании идет речь, очень важно для понимания научного прогресса, как и многих других аспектов окружающего мира. Исследования показали, что далеко не во всех процессах ведущую роль играют одни и те же законы физики. Нам приходится соотносить и сравнивать между собой концепции, применимые к явлениям разных масштабов: на одном масштабе лучше применимы одни законы, на другом ведущую роль играют другие. Категоризация явлений и объектов по масштабу позволяет уложить все, что нам известно, в единую непротиворечивую картину.

В этой главе мы увидим, как разделение по масштабам — определение того, о каком масштабе в данном случае идет речь — помогает прояснить идеи (и не только научные), а также то, почему тонкие свойства строительных «кирпичиков» материи так сложно заметить на тех расстояниях, с какими мы имеем дело в повседневной жизни. Разбираясь с этими вопросами, мы поговорим о том, что означают в науке слова «верно» и «неверно» и почему даже радикальные на первый взгляд открытия не обязательно вызывают резкие изменения в наших устойчивых представлениях о мире.

О НЕВОЗМОЖНОМ

Люди нередко путают развивающееся научное знание с незнанием, а открытие новых физических законов — с полным отсутствием до этого события каких бы то ни было надежных правил. Во время недавней поездки в Калифорнию у меня произошел интересный разговор со сценаристом Скоттом Дерриксоном, который помог мне выделить источник некоторых из этих неверных

представлений. В тот момент Скотт работал над парой сценариев, в которых рассматривалась потенциальная связь между наукой и явлениями, которые, как он подозревал, ученые отбросили бы как сверхъестественные. Желая избежать серьезных ошибок, Скотт решил рассказать сюжет своей выдуманной истории физики — а именно мне. Так что мы встретились за ланчем в уличном кафе, чтобы обменяться мыслями и насладиться солнечным лондонским днем.

Скотт знал, что сценаристы зачастую неверно представляют науку, но хотел, чтобы именно его истории о привидениях и путешествиях во времени были написаны с разумной долей научной достоверности. Особая трудность состояла в том, что он как сценарист должен был представить своей аудитории не просто описание интересных новых явлений, но и преподнести их эффектно и увлекательно. Не имея специального образования, Скотт тем не менее был сообразителен и восприимчив к новым знаниям. Поэтому я объяснила ему, почему его сюжеты, как бы изобретательны и хороши они ни были, всегда будут несостоятельными с точки зрения науки.

В истории, возразил в ответ Скотт, не раз возникали ситуации, когда какие-то явления, считавшиеся до поры невозможными, оказывались вполне реальными. Разве ученые не отнеслись поначалу с недоверием к теории относительности? Кто мог предположить, что случайность играет в фундаментальных физических законах какую-то роль? Несмотря на большое уважение к науке, Скотт считал, что ученые нередко ошибаются в том, к каким последствиям приведут их открытия.

Некоторые критики идут еще дальше и утверждают, что предсказания ученых по определению сомнительны. Несмотря на данные науки, скептики упрямо твердят, что в них всегда может скрываться какой-то подвох или недосмотр. Как знать, вдруг человек все же может воскреснуть из мертвых или в крайнем случае попасть в Средние века или в Древний Египет.

Конечно, быть восприимчивым ко всему новому — это разумно, да и то, что впереди нас ожидают новые открытия, сомнений не вызывает; тем не менее эти рассуждения скрывают глубо-

кий изъян. Чтобы убедиться в этом, следует подробнее разобраться смысл понятия «масштаб». «Неверующие» в прозорливость ученых игнорируют тот факт, что, хотя всегда будут существовать области неисследованных расстояний и энергий, где могут действовать неизвестные нам пока законы физики, в привычном для нас, «человеческом», измерении существующие законы действуют безотказно. Мы столетиями проверяли их справедливость всеми возможными способами.

Однажды в музее Уитни я встретила с хореографом Элизабет Стреб — мы обе участвовали в дискуссии о творческих возможностях человека. Выяснилось, что она тоже сомневается в точности и определенности научных знаний применительно к масштабам привычной жизни. Элизабет задала мне примерно тот же вопрос, что немного раньше задавал Скотт: «Не могут неизвестные нам законы природы, действующие в отношении крохотных измерений, наличие которых предполагают физики, воздействовать на нас — на то, как мы двигаемся, например? Мы их не видим и не чувствуем, а они влияют на нас?»

Работы Элизабет прекрасны, ей удалось невероятно глубоко проникнуть в философию танца и движения. Причина же, по которой мы не можем определить, существуют ли дополнительные измерения и какую роль они играют во Вселенной, заключается в том, что они слишком малы. Мы до сих пор не зарегистрировали их влияния ни на один параметр из всего спектра наблюдаемых величин. А чтобы дополнительные измерения влияли на движение тела, их существование должно вызывать в окружающем мире намного более серьезные последствия. Разумеется, если бы такое влияние было, мы давно обнаружили бы его результаты. Поэтому мы точно знаем, что основы танца нисколько не изменятся, даже если мы гораздо лучше поймем квантовую гравитацию. Ее действие слишком слабо по отношению к любым явлениям, заметным в человеческом масштабе.

В прошлом ученые часто ошибались, потому что еще не могли исследовать очень маленькие или очень большие расстояния и скорости или чрезвычайно высокие энергии. Это вовсе не означало, что ученые, подобно луддитам, отказывались от прогресса.

Просто они полностью доверяли самым современным на тот момент математическим описаниям мира и сделанным с их помощью прогнозам относительно сути и поведения объектов и явлений, которые тогда можно было наблюдать. Явления, считавшиеся учеными прошлого невозможными, на самом деле могли иметь место и иногда действительно происходили на расстояниях или скоростях, с которыми они никогда прежде не имели дела. И, разумеется, ученые тогда не могли знать о будущих идеях и теориях, которые в конце концов утвердились для тех самых крохотных расстояний или громадных энергий.

Когда ученые говорят, что им что-то известно, это означает лишь, что у них есть определенные мысли и теории, предсказания которых хорошо проверены *в определенном диапазоне расстояний или энергий*. Такие мысли и теории не обязательно представляют собой фундаментальные физические законы. Это просто правила, подтвержденные надежными экспериментами в диапазоне параметров, доступных сегодняшней технике. Все это не означает, что данные законы никогда не опровергнут и не дополнят новые. Законы Ньютона верны, но не применимы для скоростей, близких к скорости света, где действует теория Эйнштейна. Законы Ньютона одновременно и верны, и неполны. Они применимы в ограниченной области.

Более совершенные знания, которые мы получаем с помощью более точных измерений, — всегда шаг вперед, предвещающий новые, подчас прорывные концепции. Нам сегодня известны многие явления, которые древние не могли даже представить себе, не то что обнаружить, ведь оборудование для наблюдений в те времена было примитивным с современной точки зрения. Так что Скотт был прав: иногда ученые ошибаются, считая невозможным то, что в конце концов оказывается реальностью. Но это не значит, что не существует никаких правил. Призраки и путешественники во времени не появятся в наших домах, и инопланетные существа не выйдут неожиданно из стен. Может оказаться, что дополнительные пространственные измерения существуют, но они крохотные, или особым образом изогнутые, или еще каким-то образом скрыты от наблюдений, иначе

как объяснить, почему до сих пор не получено никаких свидетельств их существования.

Необычные явления действительно могут иметь место. Но происходят они в масштабах, чрезвычайно трудных для обычного человеческого восприятия. Если такие явления навсегда останутся для нас абсолютно непостижимыми, то особого интереса ученых они не вызовут. Объективно говоря, они не представляют интереса и для писателей-фантастов, поскольку никак не могут повлиять на нашу повседневную жизнь.

Понятно, что нефизиков интересуют в первую очередь те «странные» явления, которые мы можем наблюдать. Как говорил Стивен Спилберг в дискуссии о научно-фантастическом кино, странный мир, который нельзя представить на киноэкране и в который не могут попасть герои фильма, не слишком интересен зрителю (о чем свидетельствует забавное доказательство на рис. 1). Интересен мир, в который можно попасть и который можно заметить. И абстрактные идеи, и художественный вымысел литератора невозможны без воображения, но типы воображения в них существенно различаются. Если какие-то научные идеи применимы только в условиях, далеких от параметров нашей повседневной земной жизни, они тем не менее представляют собой существенную часть описания физического мира, но вряд ли попадут в фильм.



РИС. 1. Так в комиксе представлена скрытая природа свернутых измерений

Дело просто в том, что третье измерение плотно скручено и слишком мало, чтобы наблюдать его при нормальных энергиях.

ПОВОРОТ НЕ В ТУ СТОРОНУ

Несмотря на четкую классификацию масштабов в науке, многие люди, пытаясь понять сложные вещи в окружающем мире, ошибочно сокращают себе путь к истине. Иногда это выливается в слишком буквальное толкование теорий. Вообще, неверное приложение научных знаний — явление не новое. В XVIII в., когда ученые активно изучали в лабораториях магнетизм, люди, далекие от науки, придумали «животный магнетизм» — некие «жизненные токи», присущие всем живым существам. И лишь в 1784 г. французская Королевская комиссия, созданная по указу Людовика XVI (среди прочих в нее входил Бенджамин Франклин), формально опровергла эту теорию.

Сегодня подобные неверные экстраполяции часто связаны с квантовой механикой, когда ее пытаются применить на макроуровне, где ее следствия, как правило, усредняются и не оставляют измеримых следов*. Меня тревожит, что столько людей вокруг всерьез воспринимают идеи, высказанные, к примеру, Рондой Берн в ее бестселлере «Тайна»**, о том, что позитивные мысли притягивают богатство, здоровье и счастье. Равно как тревожит и следующее утверждение Берн: «Я никогда не изучала физику в школе, тем не менее когда я читала сложные книги по квантовой физике, то прекрасно их понимала, потому что хотела понять. Изучение квантовой физики помогло мне глубже *проникнуть в тайну* на энергетическом уровне».

Еще пионер квантовой механики нобелевский лауреат Нильс Бор заметил: «Если квантовая механика не вызывает у вас легкого головокружения, значит, вы ее не понимаете». К сожалению, квантовая механика печально известна большим количеством неверных интерпретаций. Наш язык и вообще стиль мышления происходят от *классической логики*, которая, разумеется, не берет в расчет

* Квантовая механика может иметь макроскопические проявления в тщательно подготовленных системах; они также могут выявиться при наборе большой статистики или при использовании самых прецизионных устройств. Однако это не мешает использовать классические теории в большинстве обычных ситуаций. Все зависит от прецизионности, как будет дальше рассказано в главе 12. — *Прим. авт.*

** Берн Р. Тайна. — М.: Эксмо; Домино, 2011.

квантовую механику. Но это не означает, что квантовой логикой можно объяснить любое непривычное явление. Тем не менее даже без глубокого знания квантовой механики с ее помощью можно делать верные предсказания. Так, можно наверняка утверждать, что квантовая механика не имеет отношения к «тайне» Ронды Берн и ее так называемому принципу притяжения между людьми, а также далекими друг от друга предметами или явлениями. На больших расстояниях, о которых идет речь, квантовая механика не может играть такой роли. Квантовая механика не имеет отношения и ко многим другим соблазнительным идеям, которые ей нередко приписывают. Невозможно изменить ход эксперимента пристальным взглядом; квантовая механика не отвергает возможность делать достоверные предсказания, а точность измерений в большинстве случаев ограничена чисто технически и не обусловлена принципом неопределенности.

Подобные заблуждения стали главной темой удивительного разговора, который произошел у меня с Марком Висенте, режиссером фильма «Кроличья нора, или Что мы знаем о себе и Вселенной». Этот фильм — настоящая головная боль ученых: в нем утверждается, что человеческий фактор влияет на ход экспериментов. Я не была уверена в плодотворности этой дискуссии, однако времени у меня было много и его нужно было чем-то занять. Уже несколько часов я сидела на летном поле аэропорта Dallas-Fort Worth и дожидалась, пока механики выправят легкую вмятину в крыле самолета (один из членов экипажа с готовностью пояснил нам, что сначала вмятину эту сочли слишком мелкой, но потом, на нашу беду, «измерили техническими средствами»).

Было очевидно, что, прежде чем начинать разговор с Марком, необходимо выяснить, как он сам относится к своему фильму. Я была знакома с его работой по отзывам многочисленных слушателей на лекциях, часто задававших мне странные вопросы об увиденном. Надо сказать, что ответ Марка немало удивил меня. Он изменил курс на 180° и признался, что первоначально подходил к науке с предубеждением, но теперь считает свои прежние взгляды заблуждением. В конце концов Марк пришел к выводу: то, что он показал в фильме, — не наука. Возможно, рассказ о явлении

ях, связанных с квантовой механикой, на человеческом уровне — естественно, поверхностный, иначе просто и быть не может — устраивает многих зрителей, но это не делает его корректным с научной точки зрения.

Но даже если новые теории требуют радикально новых допущений — как, безусловно, обстоит дело с квантовой механикой, — то рано или поздно веские научные аргументы и эксперименты помогают определить их истинность. Это не волшебство. Научный метод, а также данные экспериментов, как и стремление к логичности и непротиворечивости, — надежные инструменты, позволяющие ученым выходить за пределы интуитивного понимания и повседневных масштабов и разрабатывать странные на первый взгляд теории относительно явлений иных, труднодостижимых масштабов.

В следующем разделе показано, как представление о масштабе систематически помогает объединять различные теоретические концепции в единое непротиворечивое целое.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕОРИИ

Параметр среднего роста человека находится примерно на середине шкалы (если строить ее в степенях числа десять, т. е. в логарифмическом масштабе) между мельчайшим вообразимым размером и громадностью Вселенной*. Мы очень велики по сравнению с элементами внутренней структуры материи и чрезвычайно малы по сравнению со звездами, галактиками и пространством Вселенной. Все очень просто: легче всего человек «понимает» те размеры, которые может воспринять с помощью пяти чувств или простейших измерительных инструментов. Более «далекие» масштабы мы осваиваем путем наблюдений и логических умозаключений. Мо-

* Иногда я буду использовать научную запись чисел, в которой размер Вселенной выражается как 10^{27} м. Это означает единицу с 27 нулями, что, конечно, гораздо компактнее, чем «тысяча триллионов триллионов». Самый маленький представимый масштаб составляет 10^{-35} м, т. е. число, обратное к единице с 35 нулями. Рост человека имеет порядок 1 м — это единица вообще без нулей. Таким образом, «человеческий» масштаб находится примерно посередине между двумя крайними значениями. — *Прим. авт.*

жет показаться, что по мере удаления от непосредственно видимых и измеримых величин появляются величины все более абстрактные и трудные для понимания. Но техника вкупе с теорией позволяет нам познать природу материи в громадном диапазоне размеров.

Для любого участка этого обширного диапазона — от крохотных объектов, исследуемых в Большом адронном коллайдере, до галактик и самого космоса — сегодня имеются соответствующие научные теории. Для объекта каждого размера внутри этого диапазона и соответствующих расстояний могут действовать разные законы. Физикам приходится иметь дело с огромными объемами информации в очень большом диапазоне масштабов. Хотя фундаментальные законы физики, действующие на крупных масштабах, часто работают и на самых крохотных расстояниях, это не означает, что любые расчеты в энергетических масштабах удобно проводить с применением этих законов. Если для получения точного ответа на некий научный вопрос можно не задействовать внутреннюю структуру объекта или какие-то дополнительные обоснования, мы этого и не делаем, а применяем более простые правила.

Физика — и это одна из ее важнейших особенностей — дает нам представление о том, на каком диапазоне шкалы находятся те или иные измерения или предсказания в соответствии с доступным нам уровнем точности, и позволяет проводить расчеты соответственно этому. Прелесть такого взгляда на мир в том, что мы можем сосредоточиться на масштабе, значимом для интересующих нас объектов или явлений, выделить действующие в этом масштабе элементы, а затем вывести и применить законы, по которым эти элементы взаимодействуют между собой. Формулируя теории и проводя вычисления, ученые усредняют или просто игнорируют (иногда сами того не сознавая) физические процессы, проходящие в неизмеримо малых масштабах. Если это возможно, мы отбираем значимые — релевантные — факты и отбрасываем подробности, стараясь сосредоточиться на самом оптимальном участке диапазона. Это единственный способ разобраться в невообразимо плотном массиве информации.

Всегда имеет смысл отбросить мелочи и сосредоточиться на главном, не отвлекаясь на незначимые детали. Недавняя лек-

ция профессора психологии из Гарварда Стивена Косслина напомнила мне, как ученые — и люди вообще — предпочитают работать с информацией. Во время эксперимента, который лектор проводил с аудиторией, он просил нас следить за отрезками, которые появлялись на экране один за другим. Отрезки имели направление (север, юго-восток и т.д.), а все вместе образовывали ломаную линию (рис. 2). Нас попросили закрыть глаза и описать увиденное. Выяснилось, что, хотя наш мозг способен удерживать в памяти лишь несколько отдельных отрезков, мы можем вспомнить гораздо более длинные последовательности, сгруппировав отрезки в повторяющиеся формы. Думая в масштабах целого, а не отдельного отрезка, мы можем удержать в памяти всю ломаную.

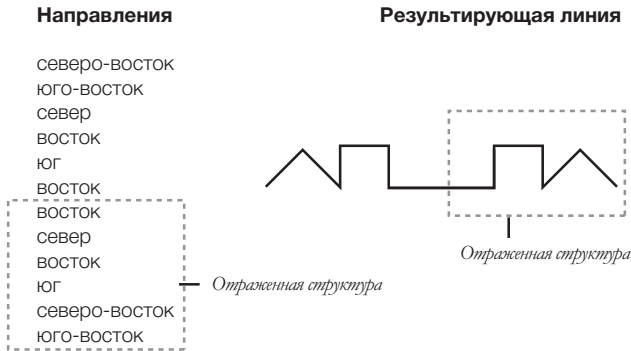


РИС. 2. Можно выбрать в качестве элемента отдельный отрезок или более крупную фигуру, такую как выделенный участок ломаной, который повторяется на рисунке дважды

Практически во всем, что мы видим, слышим, ощущаем на вкус, запах или прикосновение, мы можем выбирать: сосредоточиться ли нам на подробностях, приблизившись к объекту, или, наоборот, рассматривать «картину в целом» — с иными приоритетами. Что бы мы ни делали — разглядывали произведение искусства, дегустировали вино, читали философский трактат или планировали отпуск, — мы автоматически мыслим двумя категориями: то, что нас в данный момент интересует — будь то размеры, ароматы, идеи или расстояния, — и то, что в данный момент для нас несущественно.

Вообще, сосредоточиться на главном и забыть на время о структурах слишком мелких, чтобы быть значимыми, полезно во многих случаях. Вспомните, как вы поступаете, когда пользуетесь каким-нибудь картографическим сервисом вроде Googlemaps и смотрите на маленький экран своего iPhone. Если вы едете или идете издалека, то сначала смотрите на общую карту, чтобы примерно понять, где место назначения находится относительно других знакомых мест. Затем, рассмотрев общую картинку, переходите к подробностям. На первом шаге вам не нужны лишние факты, вы просто хотите сориентироваться. Но, когда вы переходите к конкретным деталям своего путешествия — если надо найти, например, определенную улицу, — подробности, которые прежде были несущественны, начинают играть главную роль.

Конечно, выбранный масштаб карты определяется степенью подробности, которая вам необходима. Некоторые из моих друзей, бывая в Нью-Йорке, не обращают внимания на расположение своей гостиницы — такси довезет. Для них подробности вроде расположения отдельных кварталов города несущественны. Однако для всякого, кто знает Нью-Йорк, подобные вещи имеют значение. Недостаточно знать, что вы остановились в центре города. Для ньюйоркца важно, находится ли он в данный момент выше или ниже Хьюстон-стрит, к востоку или к западу от парка на Вашингтон-сквер и т. д.

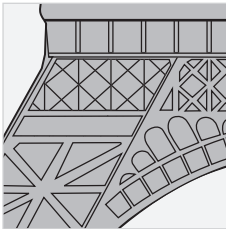
Хотя разные люди могут выбрать разный масштаб, никому все же не придет в голову выводить на экран карту Соединенных Штатов, чтобы найти ресторан. Его местоположение окажется за пределами разрешения такой карты. С другой стороны, для поиска ресторана вам не потребуется и поэтажный план здания, в котором он расположен. Для любой задачи существует свой релевантный масштаб (рис. 3).

Точно так же мы в физике классифицируем объекты по размеру, чтобы иметь возможность сосредоточиться на интересующих нас вопросах. Так, крышка письменного стола кажется нам твердой — она и есть твердая, — но на самом деле она состоит из атомов и молекул; именно они все вместе действуют как твердая непроницаемая поверхность, с которой мы каждый день имеем дело.

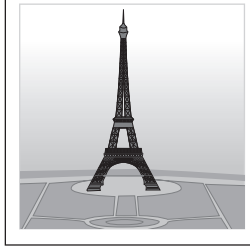
Но сами атомы и молекулы тоже не представляют собой неделимую сущность; в каждом атоме есть ядро и электроны. А ядро атома состоит из протонов и нейтронов, которые, в свою очередь, суть более фундаментальные объекты, известные как кварки. И все же не обязательно знать о кварках, чтобы разобраться в электромагнитных и химических свойствах атомов и химических элементов (этим занимается атомная физика). Люди много лет изучали атомную физику, прежде чем появились первые намеки на наличие так называемых элементарных частиц внутри атомов. И биологам при изучении клетки тоже не нужно знать о кварках внутри протона.

Эйфелева башня

Масштаб слишком мал



Релевантный масштаб



Масштаб слишком велик



РИС. 3. В разных масштабах видна разная информация

Я помню, как обидно мне было в школе, когда после долгих месяцев изучения законов Ньютона учительница объявила классу, что эти законы неверны. Но она была не совсем права. Законы Ньютона прекрасно работают на расстояниях и скоростях, которые можно было наблюдать в XVII в. Ньютон рассуждал о физических законах, которые действуют при той точности, с которой он (или кто угодно другой в ту эпоху) мог проводить измерения. Чтобы делать успешные предсказания в те времена, ему не нужна была общая теория относительности. Она не нужна и нам, когда мы предсказываем поведение больших тел при относительно низких скоростях и плотностях; здесь достаточно законов Ньютона. Сегодня, когда физики или инженеры изучают орбиты планет, им не обязательно знать точный состав Солнца. Так и законы, управ-

ляющие поведением кварков, не оказывают заметного влияния на движение небесных тел.

Концентрация на базовых компонентах, входящих в состав объекта, вряд ли поможет разобраться во взаимодействиях на более крупных масштабах, где крохотные субструктуры, как правило, играют незначительную роль. Было бы трудно добиться каких бы то ни было успехов в атомной физике, сосредоточив исследования на частицах, меньших, чем атомы, — кварках. Только в случаях, когда нам необходимо понять свойства ядра во всех подробностях, на сцену выходит кварковая субструктура. Бесконечно «точной точности» не существует, поэтому можно без опаски заниматься химией и молекулярной биологией, не обращая внимания на внутреннюю структуру атомных ядер. Движения Элизабет Стреб в танце не изменятся, что бы ни происходило в ее теле на уровне квантовой гравитации. Хореография опирается лишь на законы классической физики.

Все без исключения, в том числе и физики, с радостью пользуются более обобщенными описаниями, когда детали не поддаются разрешению. Физики формализуют этот интуитивный подход и распределяют объекты по категориям исходя из значимых в каждом конкретном случае расстояний (размеров) или энергий. Для решения любой задачи используется так называемая *эффективная теория*. Эффективная теория концентрируется на элементах и силах, которые действуют и производят «эффект» на рассматриваемых масштабах. Вместо того чтобы описывать частицы и взаимодействия в терминах неизмеримых параметров, мы формулируем нужные нам теории, уравнения и наблюдения для тех масштабов, которые нам в данный момент доступны и нужны для исследования.

Эффективная теория, которую мы применяем для исследований на больших масштабах, не предполагает, что вы сосредоточиваетесь на теориях, применимых на меньших масштабах. В ней говорится только о вещах, которые в данном масштабе можно измерить или увидеть. Если объект лежит за пределами разрешения того масштаба, в котором вы работаете, внутреннюю структуру этого объекта вам знать не обязательно. И такая практика вовсе

не является научным мошенничеством. Это просто эффективный способ избавиться от избыточной информации, получить точные ответы и удержать в поле зрения все значимые элементы системы.

Неизвестные факторы, не оказывающие измеримого влияния на ситуацию, можно без опаски отбросить — вам не обязательно знать о них, чтобы успешно предсказывать поведение системы. Явления, недоступные исследователю при нынешнем уровне развития техники, по определению, не вызовут никаких измеримых последствий, помимо тех, что уже приняты во внимание.

Вот почему, даже не зная ничего о релятивистских законах движения или квантово-механическом описании атомных и субатомных систем, можно было делать точные предсказания. Это очень хорошо, ведь человек просто не в состоянии думать обо всем одновременно. Мы никогда ничего не добились бы, если бы не научились отбрасывать избыточные детали.

«Невозможные» явления могут иметь место, но лишь в средах, которые мы еще не наблюдали. Эти явления незначимы на известных нам масштабах — по крайней мере на масштабах уже исследованных. Происходящее на этих крошечных длинах будет скрыто от нас до тех пор, пока не изобретут инструменты, которые позволят все рассмотреть, или пока при помощи достаточно точных измерений не удастся определить лежащую в основе таких явлений закономерность по слабым эффектам, которые они вызывают на более крупных масштабах*.

Делая предсказания, ученые имеют право игнорировать объекты и явления, слишком мелкие для наблюдений. Дело не только в том, что невозможно выявить эффект от слишком мелких объектов и процессов; вообще, физические эффекты любых процессов в некотором масштабе интересны лишь в той мере, в какой они влияют на физически измеримые параметры. Поэтому физики описывают объекты и свойства в каком-нибудь измеримом масштабе при помощи эффективной теории, а затем используют результаты в научных исследованиях в том масштабе, с которым

* Очевидный пример: радужную пленку на воде люди могли видеть и тысячу лет назад, но то, что она появляется вследствие волновой природы света, не имело практического значения. — *Прим. пер.*

имеют дело. Если подробности о малых расстояниях, или микроструктура теории, все же известны, можно вывести некоторые величины из более фундаментальных закономерностей строения материи. Если нет, эти величины считаются неизвестными и определяются экспериментально. Полученные величины более крупного масштаба в эффективной теории не позволяют фундаментально описать явление, но с их помощью удобно проводить наблюдения и делать предсказания.

Описание, сделанное в рамках эффективной теории, может суммировать следствия любого закона, справедливого для явлений в малом масштабе, который влияет и на явления более крупного масштаба, но слишком слабо для того, чтобы это можно было заметить. Таким образом, мы можем изучать и оценивать процессы с использованием меньшего числа параметров, чем потребовалось бы, если бы мы принимали во внимание все детали. Этого урезанного набора параметров вполне достаточно, чтобы описать интересующие нас процессы, и к тому же он универсален — параметры всегда одинаковы вне зависимости от масштаба явления. Чтобы определить их значение, нам достаточно просто измерить их в любом из множества процессов, в которых они фигурируют.

Важно, что эффективная теория действует на большом диапазоне длин и энергий. Поскольку несколько ее параметров были определены путем измерений, все, что относится к соответствующему ряду масштабов, можно без труда вычислить. Это дает нам набор элементов и правил, при помощи которых можно объяснить множество самых разных наблюдаемых явлений. В определенный момент теория, которую до той поры мы считали фундаментальной, оказывается всего лишь эффективной — ведь бесконечно малые измерения нам по-прежнему недоступны. Тем не менее мы доверяем этой теории, потому что она успешно предсказывает многие явления на целом ряде масштабов длин и энергий.

С помощью эффективной теории в физике можно не только справляться с информацией о явлениях, происходящих на малых масштабах, но и обобщать крупномасштабные эффекты, действие которых слишком слабо и недоступно для наблюдения. К примеру, наша Вселенная может быть чуть-чуть искривлена — так,

как предсказывал Эйнштейн, когда разрабатывал свою теорию гравитации. Эта кривизна значима на больших расстояниях, где задействована крупномасштабная структура пространства. Но мы можем последовательно разобраться в том, почему эти эффекты кривизны слишком слабы и не отражаются в большинстве наблюдений и экспериментов, которые мы проводим на гораздо меньших масштабах. Рассмотрение подобных эффектов имеет смысл для нас только в том случае, если мы включим в описание физики элементарных частиц гравитацию; по большей части они слишком слабы, чтобы проявляться в тех экспериментах, которые я буду описывать. Но и в этом случае подходящая эффективная теория скажет нам, как суммировать гравитационные эффекты и выразить их через несколько неизвестных параметров, которые придется определить экспериментально.

Одна из важнейших черт любой эффективной теории: она, описывая то, что мы можем увидеть, одновременно систематизирует то, что мы увидеть не можем — как на малых, так и на больших масштабах. Имея эффективную теорию, мы можем определить, насколько серьезно способен повлиять на каждое конкретное измерение неизвестный (или известный) фундаментальный закон. Даже не дожидаясь новых открытий в других масштабах, мы можем математически вычислить максимальную степень влияния, которое произведет любая новая структура на эффективную теорию в том масштабе, в котором мы работаем. В главе 12 мы подробнее рассмотрим еще одну особенность эффективной теории: ее подлинные ограничения можно понять только после того, как будут открыты физические законы следующего масштабного уровня.

Еще одним примером эффективной теории может служить термодинамика. Эта наука, появившаяся задолго до атомной или квантовой теории, объясняет нам, как работают холодильники и автомобильные двигатели. Термодинамическое состояние системы достаточно хорошо характеризуется ее давлением, температурой и объемом. Конечно, сегодня мы знаем, что система состоит из газа, а тот — из атомов и молекул, в которых скрыта гораздо более тонкая структура, чем все, что можно описать при помощи трех упомянутых параметров; тем не менее во многих случаях

для характеристики наблюдаемого поведения системы мы можем ограничиться ими тремя.

Температура, давление и объем — реальные величины, которые можно измерить. Теория зависимостей между ними полностью разработана и может быть использована для успешных предсказаний. В эффективной теории газа не упоминается молекулярная структура вещества (рис. 4). И хотя температура и давление газа в действительности определяются поведением образующих его элементов, ученые свободно использовали эти величины в расчетах задолго до того, как атомы и молекулы были открыты.

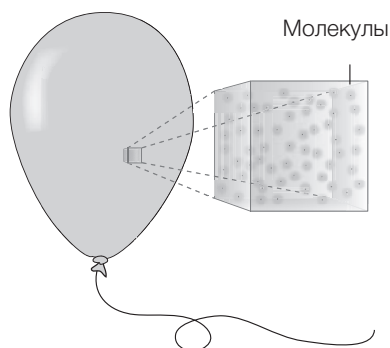


РИС. 4. На более фундаментальном уровне давление и температуру можно объяснить через физические свойства отдельных молекул

Если фундаментальная теория разработана, мы можем соотносить температуру и давление со свойствами составляющих газ атомов и понять, в какой момент термодинамическое описание перестанет соответствовать действительности. Мы по-прежнему можем использовать термодинамику для широкого круга предсказаний. Более того, многие явления можно понять только с термодинамической точки зрения, поскольку без громадных вычислительных мощностей и объемов памяти, намного превосходящих все, чем мы на данный момент располагаем, невозможно проследить траектории движения всех отдельно взятых атомов. Так что эффективная теория — единственный способ разобраться в некоторых важных физических явлениях, имеющих место в твердых и жидких конденсированных средах.

На этом примере можно продемонстрировать еще один принципиально важный аспект эффективной теории. Иногда физики используют термин «фундаментальный» как относительное понятие. С точки зрения термодинамики атомное и молекулярное описания фундаментальны. Но если говорить о физике элементарных частиц, которая рассматривает кварки и электроны внутри атомов, то сам атом тоже имеет сложную структуру и состоит из более мелких элементов. Таким образом, с точки зрения физики элементарных частиц разговор на уровне атомов возможен только в рамках эффективной теории.

Описание науки как строгой последовательности развития от полностью понятных областей к пределу человеческих знаний лучше всего подходит для таких наук, как физика и космология, где мы хорошо понимаем функциональные единицы и соотношения между ними. Вполне может быть, что в более новых областях науки, таких как системная биология, эффективные теории работать не будут. Здесь отношения между происходящим на молекулярном уровне и на более крупных макроскопических уровнях, а также релевантные механизмы обратных связей еще только предстоит понять до конца.

Тем не менее концепция эффективной теории применима к широкому кругу научных тем. Математические уравнения, в соответствии с которыми происходит эволюция биологического вида, не изменятся с появлением новых физических результатов; эту тему мы обсуждали с математическим биологом Мартином Новаком. Он и его коллеги могут определить параметры этих уравнений независимо от любых более глубоких описаний. Вполне возможно, что на самом деле эти параметры определяются более базовыми величинами — физическими или какими-нибудь другими, — но сами по себе уравнения, по которым биологи отслеживают развитие популяций со временем, ни от чего не зависят.

В физике элементарных частиц без эффективных теорий не обойтись. Мы выделяем простые системы на разных масштабах и рассматриваем их взаимоотношения. Следует отметить, что пресловутая невидимость внутренней структуры частицы, из-за которой мы сосредоточиваемся на «видимых» величинах и не обраща-

ем внимания на более фундаментальные эффекты, так замечательно скрывает внутренние взаимодействия, что для их обнаружения нам приходится тратить огромные деньги и прикладывать громадные усилия. Именно тот факт, что наиболее фундаментальные теории на доступных масштабах проявляются чрезвычайно слабо, делает современную физику такой сложной и затратной. Чтобы заметить проявления фундаментальной природы вещества и взаимодействия на этом уровне, мы должны либо непосредственно исследовать все более мелкие масштабы, либо проводить все более точные измерения. Только при помощи передовых технологий мы можем получить доступ к самым мелким и самым крупным линейным масштабам. Поэтому, чтобы хоть немного продвинуться вперед, нам приходится проводить сложнейшие эксперименты и строить гигантские сооружения, такие как Большой адронный коллайдер.

ФОТОНЫ И СВЕТ

Истории появления различных теорий света прекрасно демонстрируют, как по мере развития науки эффективные теории используются и сменяют друг друга, как одни идеи отбрасываются, а другие сохраняются и применяются в конкретной ограниченной области. Еще в Древней Греции человек начал изучать свет — тогда родилась геометрическая оптика. И сегодня это одна из тем, по которым сдает экзамены любой студент-физик. Эта теория предполагает, что свет движется по прямой, и позволяет определить, как ведут себя его лучи в различных средах и как их можно зарегистрировать и использовать.

Странно, что практически никто — по крайней мере в Гарварде, где я сегодня преподаю, а когда-то училась — не изучает классическую и геометрическую оптику. Может быть, ее немного преподают в школе, но, откровенно говоря, она и там не занимает существенного места в расписании.

Геометрическая оптика вышла из моды. Ее расцвет наступил несколько веков назад с появлением ньютоновой «Оптики» и продолжался в XIX в., когда Уильям Роуэн Гамильтон впервые

математически предсказал новый взгляд на природу оптических явлений.

Классическая теория оптики по-прежнему применяется в таких областях, как фотография, медицина, инженерное дело и астрономия, используется при изготовлении новых зеркал, телескопов и микроскопов. Специалисты по классической оптике и инженеры разрабатывают устройства для демонстрации различных физических явлений. Тем не менее все они лишь применяют оптику и не открывают никаких новых законов.

В 2009 г. мне было предоставлено почетное право прочесть так называемую гамильтоновскую лекцию в Университете Дублина, которую до меня читали несколько весьма уважаемых моих коллег. Она посвящена памяти сэра Уильяма Роуэна Гамильтона, замечательного ирландского математика и физика XIX в. Признаюсь, я настолько привыкла, что имя Гамильтона стало почти нарицательным в физике, что, как это ни смешно, поначалу даже не связала его с реальным человеком, к тому же ирландцем. Меня поразило, в каком множестве областей математики и физики, в том числе и в геометрической физике, Гамильтон совершил настоящий переворот.

День Гамильтона в Дублине празднуется очень широко. Торжественная процессия движется вдоль Королевского канала; затем все останавливаются на мосту Брум-бридж и наблюдают, как самый молодой участник процессии пишет те самые уравнения, которые Гамильтон много лет назад, находясь в эйфории от собственного открытия, вырезал на перилах моста. Я побывала в знаменитой университетской обсерватории в Дунсинке, где жил Гамильтон, увидела систему блоков и деревянную раму, на которой 200 лет назад стоял телескоп. Гамильтон приехал в Дунсинк в 1827 г. после окончания Тринити-колледжа; он тогда получил кафедру астрономии и должность Королевского астронома Ирландии. Местные жители шутят, что Гамильтон, несмотря на выдающиеся математические таланты, не слишком разбирался в астрономии, да и не интересовался этой наукой; за ним числится множество научных достижений, но наблюдательная астрономия в Ирландии, возможно, как раз из-за Гамильтона отстала на полвека.

Тем не менее день Гамильтона — дань уважения этому великому теоретику и его многочисленным достижениям. Среди них — открытия в оптике и динамике, математическая теория кватернионов (обобщение комплексных чисел), а также достоверная демонстрация предсказательных возможностей математики и науки вообще. Открытие кватернионов стало настоящим прорывом. Кватернионы важны для векторного исчисления, которое является основой для математического изучения всех трехмерных явлений. Сегодня они используются еще в компьютерной графике и, следовательно, в индустрии развлечений и видеоигр. Всякий владелец PlayStation или Xbox в какой-то степени обязан Гамильтону.

Гамильтон внес серьезный вклад в оптику. В 1832 г. он показал, что в результате преломления света, падающего под определенным углом на кристалл с двумя независимыми осями симметрии, получается пустотелый световой конус. Исходя из этого он предсказал явления *внутренней* и *внешней* конической рефракции света в кристалле. Предсказание Гамильтона сумел проверить и подтвердить его друг и коллега Хэмфри Ллойд; это событие стало настоящим триумфом математической науки. Математическое предсказание никогда прежде не наблюдавшегося явления казалось в то время едва ли не чудом, и Гамильтон за свое достижение был возведен в рыцарское звание.

Дублинцы с гордостью рассказывали мне про это математическое достижение, сделанное средствами одной только геометрической оптики. Галилей был одним из пионеров наблюдательной и экспериментальной науки; Фрэнсис Бэкон — первым пропагандистом *индуктивного метода* в науке. Однако если говорить о математическом описании никогда прежде не наблюдавшегося явления, то гамильтоново предсказание конической рефракции, вероятно, было первым. Этого достаточно, чтобы обеспечить Гамильтону достойное место в истории науки.

Но сегодня, несмотря на все значение открытия Гамильтона, классическая геометрическая оптика уже не является объектом исследования. Все важные явления в этой области давно изучены. Вскоре после Гамильтона, в 1860-е гг., шотландский ученый Джеймс Кларк Максвелл с коллегами разработали электромагнит-

ную теорию света. Стало ясно, что геометрическая оптика — всего лишь приближенное описание явлений; тем не менее ее законы применимы для световых волн с достаточно маленькой длиной волны; для них эффекты интерференции незначимы, а движение можно считать прямолинейным. Иными словами, геометрическая оптика — это эффективная теория, применимая в определенных ограниченных условиях.

Это не означает, что в науке сохраняется всякая теория. Иногда она просто оказывается ошибочной. Примером может служить первая теория света, сформулированная Евклидом и в IX в. возрожденная в исламском мире арабским математиком аль-Кинди (в ней утверждалось, что свет испускают глаза человека). Несмотря на то что другие ученые, такие как персидский математик ибн-Саль, на основании этого ложного утверждения верно описывали явления (то же преломление, к примеру), теория Евклида и аль-Кинди — появившаяся, кстати говоря, раньше, чем наука и современные научные методы — оказалась попросту неверна. Она не вошла в позднейшие теории, а была отброшена.

Ньютон не предвидел появления новых концепций в теории света. Он выдвинул так называемую «корпускулярную» теорию, которая никак не согласовывалась с волновой теорией света, разработанной его соперниками — Робертом Гуком в 1664 г. и Христианом Гюйгенсом в 1690 г. Споры по этому поводу продолжались не один десяток лет. Только в XIX в. Томас Юнг и Огюстен-Жан Френель измерили интерференцию света и тем самым подтвердили, что свет имеет волновую природу.

Позже развитие квантовой теории показало, что Ньютон в каком-то смысле тоже был прав. Согласно идеям квантовой механики, свет действительно состоит из отдельных частиц, получивших название *фотоны* и ответственных за передачу электромагнитного излучения. Но современная теория фотонов базируется на понятии квантов света — отдельных частиц, из которых состоит свет и которые обладают уникальными свойствами. Даже одна частица света — фотон — ведет себя, как волна. Эта волна определяет вероятность нахождения фотона в каждой конкретной точке пространства (рис. 5).



РИС. 5. Современной концепции света предшествовали геометрическая и волновая оптика. Они до сих применимы при определенных условиях

Корпускулярная теория света, предложенная Ньютоном, подтверждается наблюдаемыми результатами. Тем не менее ньютоновы частицы света не имеют волновой природы и потому совсем не похожи на фотоны. Насколько мы сегодня знаем, теория фотонов представляет собой самое фундаментальное и верное описание света — потока частиц, которые могут приобретать волновые свойства. В настоящее время базисное описание того, что представляет собой свет и как он себя ведет, дает квантовая механика. Эта теория фундаментально верна и останется в науке.

В настоящее время квантовая механика находится гораздо ближе к передовым областям научных исследований, нежели оптика. Если кто-то по-прежнему думает о новых открытиях в оптике, то имеет в виду в первую очередь новые эффекты, возможные только в рамках квантовой механики. Современная наука уже не развивает классическую оптику, но, безусловно, включает в себя квантовую оптику, науку о квантово-механических свойствах света. Лазеры работают по законам квантовой механики; то же можно сказать и о детекторах света, таких как фотоумножители, и о фотоэлементах, превращающих солнечный свет в электричество.

Современная физика элементарных частиц включает в себя также теорию квантовой электродинамики (КЭД), разработанную Ричардом Фейнманом и другими учеными. В нее входят не только

квантовая механика, но и специальная теория относительности. В КЭД мы занимаемся изучением отдельных частиц, в том числе фотонов — частиц света, а также электронов и других частиц, переносящих электрический заряд. Мы способны разобраться в скоростях, на которых взаимодействуют эти частицы и с которыми они могут создаваться и уничтожаться. КЭД — одна из тех теорий, которые очень активно используются в физике элементарных частиц. Кроме того, именно в ее рамках делаются самые достоверные научные предсказания. КЭД совершенно не похожа на геометрическую оптику, но обе эти теории верны, каждая в соответствующей области.

В каждой области физики имеется своя эффективная теория. По мере развития науки старые идеи уходят на второй план и становятся составной частью более фундаментальных теорий. Но передовые исследования в науке посвящены не им. В конце этой главы мы рассмотрели конкретный пример — развитие физических представлений о природе света, но следует отметить, что таким образом развивается вся физика. На передовом крае науки развитие происходит неуверенно, но в целом методично. Эффективные теории в каждом конкретном масштабе игнорируют, как им и положено, те эффекты, которые не влияют ни на какие измерения. Знания и методы, обретенные в прошлом, остаются с нами, но, по мере того как мы начинаем осваивать более широкий спектр расстояний и энергий, теории получают новое развитие. Движение вперед позволяет нам разобраться в фундаментальной основе наблюдаемых явлений.

Понимание исторического пути развития науки помогает лучше понять ее природу и по достоинству оценить крупнейшие вопросы, которыми заняты сегодня физики (и другие ученые). В следующей главе мы увидим, что сегодняшние научные методы зародились еще в XVII в.

ГЛАВА 2

РАСКРЫВАЯ СЕКРЕТЫ

Методы, которыми пользуются сегодня ученые, — результат долгой истории измерений и наблюдений. С их помощью ученые уже несколько веков подтверждают — и, что не менее важно, отвергают — научные идеи и гипотезы.

Многие принципиальные открытия, сформировавшие науку, были сделаны в XVII в. в Италии, и одним из ключевых участников этого процесса был Галилео Галилей. Именно он одним из первых в полной мере оценил и начал развивать так называемые *непрямые измерения*, при которых используется некий промежуточный этап*; он же одним из первых начал для установления научной истины разрабатывать и проводить эксперименты. Более того, он изобрел абстрактные *мысленные эксперименты*, которые помогали ему формулировать научные гипотезы.

Я многое узнала об изобретениях и открытиях, сделанных Галилеем и самым серьезным образом изменивших науку, когда весной 2009 г. побывала в Падуе. Поводом к поездке послужила конференция по физике, организованная профессором физики Фабио Цвирнером. Был, правда, и еще один повод — получить почетное гражданство этого города. Было очень приятно встретиться как с коллегами — участниками конференции, так и с другими уважаемыми «гражданами», в числе которых — физики Стивен Вайнберг, Стивен Хокинг и Эд Виттен. Неожиданным бонусом оказалась возможность узнать кое-что из истории науки.

* Искомая величина определяется через другую величину, измеряемую непосредственно. — *Прим. пер.*

Мой визит пришелся на удачное время: в 2009 г. исполнялось 400 лет первым наблюдениям звездного неба, проведенным Галилеем. Граждане Падуи с особым энтузиазмом отмечали эту годовщину, поскольку во время проведения главных своих исследований Галилей читал лекции в Падуанском университете. В честь ученого Падуя (так же, как Пиза, Флоренция и Венеция — другие города, тесно связанные с научной жизнью Галилея) организовала выставки и различные церемонии. Конференция по физике проходила в зале Культурного центра Альтинате (или Сан-Гаэтано) — того самого здания, где располагалась выставка, знакомившая посетителей с открытиями Галилея и подчеркивавшая его роль в развитии науки и формировании ее современного облика.

Большинство людей, с которыми я тогда встречалась, высоко оценивали достижения Галилея и с энтузиазмом говорили об успехах современной науки. Интерес к физике и познания, проявленные мэром Падуи Флавио Дзанонато, произвели впечатление даже на местных физиков. Глава города не только участвовал в научном разговоре за торжественным обедом после прочитанной мной публичной лекции, но и на самой лекции удивил аудиторию коварным вопросом о движении заряженных частиц в Большом адронном коллайдере.

В ходе церемонии присвоения звания почетного гражданина мэр вручил мне ключ от города. Это был фантастический ключ — он вполне соответствовал моим киношным представлениям о том, каким должен быть подобный предмет. Он был такой большой, резной и серебряный, что один из моих коллег даже спросил, не ключ ли это из сказки о Гарри Поттере. Это, конечно, церемониальный ключ — им невозможно ничего открыть. Но чудесный символ входа в город в моем воображении стал символом входа в необъятное царство знаний.

Кроме ключа, профессор Падуанского университета Масимилла Бальдо-Чолин подарила мне венецианскую памятную медаль. На ней выгравирована цитата из Галилея, размещенная также над входом в здание физического факультета университета: «*Io stimo più il trovar un vero, benché di cosa leggiera, che 'ldisputar lungamente delle massime questioni senza conseguir verità nissuna*».

Это переводится так: «Я предпочитаю найти истину в малом, нежели долго спорить о величайших вопросах, не обретая никакой истины».

Я процитировала эти слова коллегам на конференции, потому что в них и сегодня заключается ведущий принцип науки. Научные прорывы нередко вырастают из стремления решить несложные на первый взгляд проблемы (к этому утверждению мы вернемся позже). Не все вопросы, на которые мы ищем и находим ответы, порождают радикальные перемены. И все же продвижение вперед, даже постепенное, периодически кардинально меняет восприятие человеком мира.

В этой главе рассказывается о том, что современные наблюдения, которым, собственно, посвящена эта книга, корнями уходят в научные открытия XVII в. и что фундаментальные достижения того времени в значительной мере определили природу теоретических и экспериментальных методов, используемых нами сегодня. Главные, принципиальные вопросы перед учеными и сегодня стоят в определенном смысле те же, что стояли 400 лет назад; однако физическая теория да и техника сегодня совсем не те, что тогда, поэтому мелкие конкретные вопросы изменились необыкновенно.

ВКЛАД ГАЛИЛЕЯ В НАУКУ

Ученые пытаются достучаться до небес и мечтают преодолеть порог, отделяющий познанное от непознанного. В любой момент, о каком бы ни шла речь, любое исследование начинается с набора правил и уравнений, предсказывающих те явления, которые мы на этот момент способны измерить. Но мы всегда стремимся перейти к режимам, которые до сих пор не удавалось протестировать экспериментально. Вооружившись новейшей техникой и математикой, мы начинаем систематически изучать вопросы, которые в прошлом были лишь предметом ничем не подкрепленных рассуждений или веры. Чем больше максимально точных наблюдений у нас есть, чем определеннее теоретические рамки, в которые укладываются новые измерения, тем лучше и полнее мы понимаем окружающий мир.

После поездки в Падую и осмотра ее исторических достопримечательностей я в полной мере осознала, насколько важную роль сыграл Галилей в формировании такого способа мышления. Одна из самых знаменитых достопримечательностей Падуи — капелла Скровеньи с фресками Джотто начала XIV в. Эти изображения примечательны по многим причинам, но для ученого самым интересным, пожалуй, является необычайно реалистичное изображение пролета кометы Галлея 1301 г. в сцене поклонения волхвов (рис. 6). Это настоящее чудо! В то время, когда художник рисовал эту фреску, комету можно было видеть на небе невооруженным глазом.

Но эти изображения еще не были корректными с научной точки зрения. Девушка-гид показала мне Млечный путь на астрологических фресках Палаццо делла Раджоне (по крайней мере, ее учили, что это именно Млечный путь). Однако более опытный гид позже объяснил ей, что такая трактовка изображения неверна и не соответствует времени создания фрески. В те времена люди просто рисовали то, что видели. Вероятно, художник хотел изобразить звездное небо ясной ночью, но не имел в виду ничего определенного вроде нашей Галактики. Науки в современном понимании еще не было.



РИС. 6. Джотто изобразил эту сцену на стене капеллы Скровеньи в начале XIV в., когда комета Галлея была видна невооруженным глазом

До Галилея наука полагалась только на непосредственные наблюдения и чистые размышления. Образцом для всех желающих разобраться в устройстве мира служила аристотелева наука. Математику можно было использовать для дальнейших умозаключений, но базовые положения принимались на веру или со ссылкой на прямые наблюдения.

Галилей открыто отказался опираться в своих исследованиях на *mondo di carta* (мир бумаги); напротив, он хотел читать и изучать *libro della natura* (книгу природы). Он не только изменил методологию наблюдений; мало того, он едва ли не первым признал огромные возможности эксперимента. Галилей понял, как следует создавать искусственные условия для выявления природы физических законов. Галилей научился при помощи эксперимента проверять гипотезы о законах природы, доказывать и, что не менее важно, опровергать их.

В частности, Галилей проводил эксперименты с наклонными плоскостями — наклоненными ровными поверхностями, которые так часто встречаются, раздражая учащихся, в любом начальном курсе физики. Для Галилея наклонная плоскость не была всего лишь надуманной школьной задачей, каковой она иногда кажется школьникам. Это был способ изучить скорость падающих тел: ведь если «растянуть» спуск объекта на некоторое горизонтальное расстояние, можно будет точно измерить, как он «падает». Время он измерял при помощи водяного хронометра; но этого мало: Галилей придумал хитроумную систему колокольчиков, развешанных на определенных расстояниях друг от друга, и мог определять скорость катящегося вниз шарика на слух (рис. 7), а слух у него был отличный. При помощи этого и других экспериментов в области движения и силы тяжести Галилей вместе с Иоганном Кеплером и Рене Декартом подготовил фундамент для законов классической механики, которые развил Исаак Ньютон.

Галилей сумел выйти за пределы непосредственных наблюдений. Он придумал мысленные эксперименты — абстракции, основанные на увиденном, — при помощи которых можно было делать предсказания о ходе экспериментов, которые никто в то время не мог в реальности поставить. Возможно, самое знаменитое

из его предсказаний говорит о том, что все объекты при отсутствии сопротивления падают с одинаковой скоростью. Он не мог реализовать эту идеализированную ситуацию, но предсказал, что произойдет. Галилей понимал, какую роль при падении предметов на землю играет тяготение, как и то, что сопротивление воздуха замедляет их движение. Качественная наука означает учет всех факторов, которые могут повлиять на то или иное измерение. Мысленные эксперименты и настоящие физические опыты помогли ученому лучше понять природу тяготения.

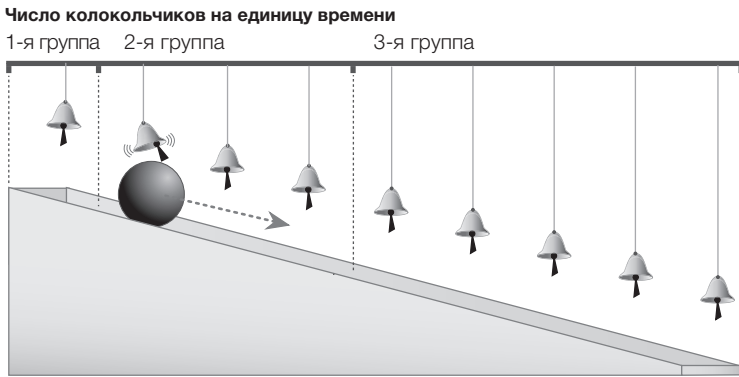


РИС. 7. При помощи колокольчиков Галилей измерял скорость движения шарика по наклонной плоскости

В истории нередко случайные совпадения. Так, Ньютон — один из величайших ученых, которому предстояло продолжить и развить научную традицию Галилея — родился в год его смерти. (На одном из своих семинаров Стивен Хокинг порадовался тому, что сам он родился ровно три века спустя.) Ученые нашего времени, в каком бы году им ни довелось родиться, продолжают галилееву традицию: разрабатывают реальные или мысленные эксперименты, анализируют их ограничения и интерпретируют полученные данные. Конечно, эксперименты в наши дни гораздо сложнее, да и техника используется гораздо более изощренная, но мысль о том, что для подтверждения или опровержения сделанных на базе новой научной гипотезы предсказаний следует по-

строить установку и провести эксперимент, и сегодня определяет природу науки и ее методов.

Но эксперименты — искусственные ситуации, создаваемые для проверки гипотез, — не единственное новшество, которое Галилей внес в науку. Помимо этого он, возможно, первым понял, что наблюдать окружающий мир — Вселенную — следует, применяя технические новшества. Эксперименты помогли ему выйти за рамки чистых рассуждений, а технические приспособления многократно расширили поле непосредственных наблюдений.

До Галилея наука полагалась прежде всего на прямые непосредственные наблюдения: человек воспринимал объекты при помощи органов чувств — видел их или, к примеру, трогал — без каких бы то ни было устройств, которые в какой-то мере изменяли образ исследуемого объекта. Тихо Браге, открывший, помимо прочего, сверхновую звезду и точно измеривший положения планет, работал раньше Галилея; последние из его знаменитых астрономических наблюдений сделаны до того, как Галилей появился на научной сцене. Браге пользовался точными измерительными инструментами, такими как большие квадранты, секстанты и армиллярные сферы. Мало того, он разработал и оплатил изготовление самых точных на тот момент инструментов; именно они позволили астроному провести измерения, на базе которых Кеплер смог прийти к выводу об эллиптических орбитах. Тем не менее все измерения Браге проводил, наблюдая небо невооруженным глазом, без каких бы то ни было линз или других устройств.

Следует отметить, что Галилей обладал тренированным глазом художника и абсолютным музыкальным слухом — он был сыном музыканта. Тем не менее он понял, что при помощи технических приспособлений можно многократно увеличить и без того неплохие наблюдательные возможности. Галилей считал, что непрямые наблюдения, сделанные при помощи специальных инструментов и на больших расстояниях, дадут ему гораздо больше, чем просто взгляд невооруженным глазом.

Сегодня всем известно, что Галилей первым взглянул на звезды через телескоп. Этот инструмент изменил подход человечества к науке, изменил наш взгляд на Вселенную и на самих себя. Но Га-

Галилей вовсе не был изобретателем телескопа. Это устройство придумал в 1608 г. в Нидерландах Ханс Липперсгей, но голландец пользовался им для наблюдения за людьми (отсюда и второе название подзорной трубы: *spyglass* — «шпионское стекло»). Тем не менее именно Галилей одним из первых понял, что это устройство может стать мощным инструментом для наблюдения космоса: ведь с его помощью можно проводить наблюдения, недоступные невооруженному глазу. Он усовершенствовал голландскую подзорную трубу и изготовил телескоп, способный увеличивать в 20 раз. Через год после того, как ему подарили такую игрушку, он превратил ее в научный прибор.

Тот факт, что Галилей начал наблюдать небо через специальные устройства, представлял собой радикальный отход от прежних методов измерения и решительный шаг вперед, очень важный для формирования современной науки. Первоначально люди с подозрением отнеслись к таким опосредованным наблюдениям. Даже сегодня найдутся скептики, готовые усомниться в реальности наблюдений, сделанных при помощи больших протонных коллайдеров, или данных, записанных компьютерами на космических аппаратах или телескопах. Но цифровые данные, регистрируемые этими устройствами, не менее реальны, а нередко и куда более точны, чем все, что мы можем наблюдать непосредственно. В конце концов, наш слух — это воздействие колебаний воздуха на барабанные перепонки в ушах, а зрение — действие электромагнитных волн на сетчатку глаза; в том и другом случае полученные данные обрабатываются мозгом. Это означает, что и сами мы — тоже своего рода приборы, притом не слишком надежные; это может подтвердить любой, кто сталкивался с оптическими иллюзиями (рис. 8). Прелесть научных измерений в том и состоит, что по их данным — к примеру, по экспериментам, которые физики сегодня проводят с использованием больших и точных детекторов — мы можем безошибочно судить о различных аспектах физической реальности, в том числе о природе элементарных частиц и их свойствах.

Если интуиция подсказывает человеку, что наблюдения, сделанные непосредственно глазами, — надежнее всего и что всевоз-

можных абстракций следует опасаться, то наука учит преодолевать эти предрассудки. Измерения, которые мы делаем при помощи разработанных нами инструментов, более достоверны, чем сделанные невооруженным глазом; кроме того, их результат можно улучшить и перепроверить путем повторных измерений.

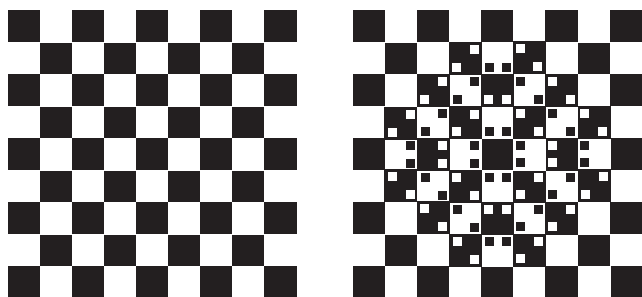


РИС. 8. Наши глаза не всегда можно считать самым надежным средством оценки внешнего мира. Перед вами две одинаковых шахматных доски, но из-за точек квадратики на правой доске выглядят совершенно не так, как на левой

В 1611 г. даже церковь признала, что не прямые измерения достоверны. Том Левенсон в книге «Мера за меру» (Measure for Measure)* пишет, что ученое сообщество церкви должно было решить, можно ли доверять увиденному в телескоп. Кардинал Роберт Беллармин настаивал, что ученые мужи церкви должны обязательно и срочно разрешить этот вопрос, и 24 марта 1611 г. четверо ведущих церковных математиков объявили, что все открытия Галилея достоверны: телескоп действительно позволяет проводить точные и надежные наблюдения.

Еще одна памятная бронзовая медаль, которой поделились со мной падуанцы, прекрасно символизирует главные достижения Галилея. На одной стороне медали изображена сцена, где Галилей в 1609 г. представляет телескоп Синьории Венецианской республики и ее дожу Леонардо Дона. В надписи на другой стороне медали отмечается, что эта сцена «показывает истинное рождение

* Levenson T. Measure for Measure: A Musical History of Science. — Simon & Schuster, 1994.

современного астрономического телескопа» и символизирует «революцию в представлениях человека о мире за пределами планеты Земля», что этот «исторический момент выходит за рамки астрономии и является одной из отправных точек современной Науки».

Наблюдательные преимущества, полученные Галилеем, вызвали настоящий взрыв новых открытий. Устремляя взгляд в космос, Галилей раз за разом находил в нем новые объекты, недоступные невооруженному глазу. Он обнаружил звезды, которых никто прежде не видел, — они были густо рассеяны среди более ярких звезд, давно известных человечеству. Галилей опубликовал свои открытия в знаменитой книге 1610 г. «Звездный вестник» (*Sidereus Nuncius*), написанной всего за шесть недель. Пока печатник трудился над формами, Галилей спешно продолжал свои исследования; он хотел произвести впечатление на Козимо II Медичи, великого герцога Тосканского, — члена одной из богатейших семей Италии — и получить его поддержку, прежде чем те же данные опубликует какой-нибудь другой обладатель телескопа.

Наблюдения Галилея породили взрывное развитие теоретической науки. Галилей начал задавать необычные вопросы: он чаще спрашивал «как?», чем «почему?». Точные измерения и открытия, возможные только с применением телескопа, естественно, привели ученого к выводам, которые не могли не разгневать Ватикан. Они подтверждали, что Коперник был прав. Получалось, что единственная точка зрения, на базе которой можно непротиворечиво объяснить все его наблюдения, неразрывно связана с учением о том, что Солнце, а не Земля, является центром системы, вокруг которого обращаются все планеты.

Одним из главных достижений Галилея было открытие спутников Юпитера. Галилей видел, как эти луны появляются и исчезают, двигаясь по своим орбитам вокруг гигантской планеты. До этого считалось, что только неподвижностью Земли можно объяснить неизменность орбиты Луны. Наличие лун у Юпитера означало, что и планета, несмотря на свое движение, может иметь спутники. Понятно, что это добавило достоверности предположению о том, что и Земля может двигаться и даже обращаться вокруг какого-то другого тела. Само по себе это явление получило объ-

яснение позже, когда Ньютон разработал свою теорию тяготения и сформулировал на ее основе предсказания о взаимном притяжении небесных тел.

Галилей назвал луны Юпитера медичейскими звездами в честь Козимо II Медичи, продемонстрировав тем самым прекрасное понимание важности финансирования — еще одного ключевого аспекта современной науки. Представители семейства Медичи действительно поддерживали исследования Галилея, однако позже, когда Галилей получил пожизненную пенсию от города Флоренции, четыре луны Юпитера в честь их первооткрывателя были переименованы в галилеевы спутники.

Галилей также использовал свой телескоп для наблюдения гор и долин на поверхности Луны. До его открытий считалось, что небеса неизменны и управляются с абсолютной регулярностью и постоянством. В системе аристотелевых взглядов, преобладавшей тогда, утверждалось, что, хотя все под луной несовершенно и непостоянно, небесные тела за пределами нашей планеты неизменны и имеют идеальную сферическую форму — в общем, состоят из некой божественной субстанции. При этом кометы и метеоры считались атмосферными, или погодными, явлениями — такими же, как ветры и облака, и современное слово *метеорология* восходит именно к такой системе взглядов. Подробные наблюдения Галилея позволяли предположить, что несовершенство — удел не только человеческого и подлунного мира. Луна оказалась не идеально гладкой сферой и была больше похожа на Землю, чем кто-либо осмеливался предположить. С открытием лунного рельефа противопоставление земных и небесных тел было поставлено под сомнение. Земля утратила свою уникальность и превратилась в обычное небесное тело, похожее на все остальные.

Историк искусств Джозеф Кернер объяснил мне, что распознать лунные кратеры по свету и тени Галилею помогла художественная подготовка. Галилея учили перспективе, поэтому ему легче было интерпретировать увиденное в телескоп. Он сразу понял смысл изображений, хотя они и не были полностью трехмерными. Он не собирался составлять карту Луны, а просто хотел понять структуру ее поверхности — и это ему удалось.

Третья значительная область наблюдений, подтвердившая точку зрения Коперника, имела отношение к фазам Венеры (рис. 9). Эти наблюдения были особенно важны, так как доказывали обращение небесных тел вокруг Солнца. Стало ясно, что Земля ни в чем не уникальна, а Венера не обращается вокруг нее.

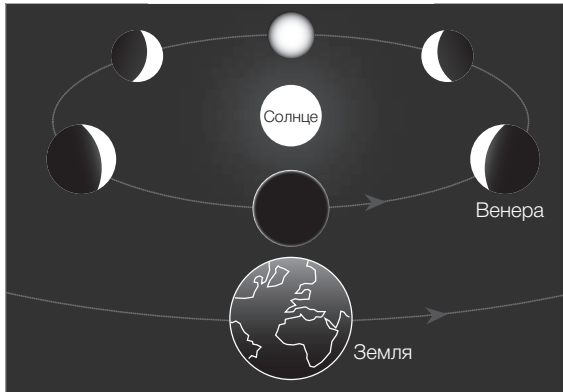


РИС. 9. Наблюдения фаз Венеры, проведенные Галилеем, продемонстрировали, что она тоже должна обращаться вокруг Солнца, что подрывало систему Птолемея

Выяснилось, что с астрономической точки зрения Земля не является ничем особенным. Другие планеты вели себя точно так же — они обращались вокруг Солнца, а их спутники обращались вокруг них самих. Мало того, даже вне Земли, которая очевидно «запятнана» присутствием человека, далеко не все было так совершенно и безупречно. Даже на Солнце оказались пятна, которые тоже обнаружил Галилей.

Вооруженный новыми наблюдениями, Галилей пришел к выводу, что мы не являемся центром Вселенной и что Земля обращается вокруг Солнца! Галилей опубликовал свои радикальные выводы и тем самым бросил вызов церкви. Позже, однако, он публично отрекся от взглядов Коперника, чтобы ему заменили заключение в тюрьме на домашний арест.

Наблюдений и выводов о крупномасштабных космических объектах Галилею было недостаточно. Он умудрился радикально

изменить и наши взгляды на маленькие объекты. Поняв, что через специальные инструменты можно наблюдать явления не только на крупных, но и на мелких масштабах, Галилей расширил пределы научных знаний в обе стороны. Помимо знаменитых астрономических наблюдений, он сумел повернуть технику внутрь — к исследованию микроскопического мира.

Я была немного удивлена, когда молодой итальянский физик Микеле Доро, водивший меня по выставке Сан-Гаэтано, уверенно заявил, что именно Галилей изобрел микроскоп. Я бы сказала, что за пределами Италии считается, что микроскоп был изобретен в Голландии, но, изобрел ли его Ханс Липперстей, Захарий Янссен или его отец, можно только догадываться. Однако факт остается фактом: изобретал Галилей телескоп или нет (а скорее всего, нет), но микроскоп он точно построил и использовал для наблюдения мелких объектов. С помощью этого прибора можно было рассматривать насекомых с невиданной прежде подробностью. Насколько нам известно, Галилей первым описал в письме к своим друзьям микроскоп и его возможности. На выставке была представлена первая публикация, в которой описывались систематические наблюдения, которые можно было проводить при помощи галилеева микроскопа: в книге, датированной 1630 г., речь шла о детальном исследовании пчел, проведенном Франческо Стеллутти.

Там же рассказывалось о том, как Галилей исследовал кости — а именно то, как в зависимости от размера костной ткани меняется особенности ее структура. Очевидно, что Галилей одним из первых осознал значение масштаба для науки и объяснения окружающего мира.

Выставка в Падуе не оставляла никаких сомнений в том, что Галилей в полной мере понимал методы и цели науки — ее количественную, предсказательную и концептуальную структуру, которая описывает определенные объекты и действует по точным и очень жестким правилам. Если эти правила дают точные предсказания об окружающем мире, значит, их можно использовать и для предсказания неизвестных пока явлений. Наука всегда ищет самую универсальную интерпретацию, способную объяснить все наблюдения и предсказать все явления.

История коперниковой революции прекрасно иллюстрирует и этот момент. Во времена Галилея великий астроном-наблюдатель Тихо Браге пришел к совершенно иным — и ошибочным — выводам о природе Солнечной системы. Он предложил странный компромисс системы Птолемея и системы Коперника, где Земля располагалась в центре мира, а остальные планеты обращались вокруг Солнца (сравнить системы можно на рис. 10). Вселенная Тихо хорошо согласовывалась с наблюдениями, но, откровенно говоря, это была не самая элегантная интерпретация. Однако она больше устраивала иезуитов, чем взгляды Галилея, потому что в предположениях Тихо Браге — как и в птолемеевой теории, которой наблюдения Галилея противоречили — Земля была неподвижна*.



РИС. 10. Три варианта описания космоса. Птолемей утверждал, что Солнце вместе с Луной и другими планетами обращается вокруг Земли. Коперник утверждал (и верно), что все планеты обращаются вокруг Солнца. Тихо Браге постулировал, что все планеты, кроме Земли, обращаются вокруг Солнца, а само Солнце, как и Луна, обращается вокруг Земли, находящейся в центре Вселенной

Галилей быстро распознал внутренне противоречивую природу интерпретации Тихо Браге и пришел к верному и наиболее универсальному выводу. Соперник Ньютона Роберт Гук позже заметил, что и теория Коперника, и концепция Тихо Браге пре-

* Во времена инквизиции католическая церковь не включала труды Тихо Браге в список запрещенных книг, как можно было ожидать исходя из его принадлежности к протестантизму, так как в его теории Земля была неподвижна, и тем не менее наблюдения Галилея ей прямо не противоречили. — Прим. авт.

красно согласовывались с данными Галилея, но одна из них была более элегантно: «С точки зрения пропорций и гармонии Мира невозможно не согласиться с аргументами Коперника». Интуиция правильно подсказывала Галилею, что верна должна быть более красивая теория. В конце концов, когда ньютонова теория гравитации объяснила непротиворечивость устройства мира по Копернику и предсказала орбиты планет, интерпретация Галилея победила. Теория Тихо Браге, как и теория Птолемея, оказалась неверной. Она не вошла в позднейшие теории, потому что это было невозможно. Если эффективная теория, по существу, представляет собой приближенный вариант истинной теории, взятой при определенных ограничениях, то здесь не так: никакое приближение теории Коперника не дает нам ни одной из некоперниковых картин мира.

Как показала неудача теории Тихо Браге — и подтвердила физика Ньютона, — субъективный критерий экономности и красоты тоже может сыграть существенную роль в первоначальной научной интерпретации. Исследования подразумевают поиск законов и принципов, которые охватили бы и объяснили наблюдаемые структуры и взаимодействия. Если в распоряжении ученых имеется достаточное количество наблюдаемых данных, то в конце концов побеждает та теория, которая включает в себя все результаты и при этом обеспечивает базу для новых предсказаний. А вот на одной логике далеко не уедешь, и специалисты по физике элементарных частиц очень хорошо это знают: не зря им приходится ждать новых экспериментальных данных, которые помогут окончательно определить наши представления о фундаментальной природе Вселенной.

Галилей много сделал для создания фундамента, на котором и по сей день работают ученые. Он инициировал медленный процесс развития, знание которого помогает лучше понять природу науки (в частности, то, как при помощи непрямых наблюдений и экспериментов получать верные описания физических явлений), а также некоторые серьезные вопросы, которые ставят сегодня перед собой физики. Современная наука пытается согласовать наблюдения с теорией при помощи открытий и новшеств, которыми

мы обязаны Галилею, — мы применяем и технические средства, и эксперименты, и теории, и математический аппарат. Главное, Галилей сумел распознать важность взаимодействия всех этих элементов науки в формировании физического описания мира.

Сегодня мы более свободны в своем мышлении. Исследуя далекие пределы пространства, мы наблюдаем, как развивается начатая Коперником революция, как возникают новые теории о возможных дополнительных измерениях или альтернативных вселенных. Новые идеи не проходят бесследно — человек все дальше и дальше уходит от представления о себе как о центре мироздания и в буквальном, и в переносном смысле. А в будущем наблюдения и эксперименты либо подтвердят, либо опровергнут наши предположения.

Непрямые методы наблюдений, впервые предложенные Галилеем, сегодня находят новое применение в сложнейших датчиках Большого адронного коллайдера. Завершающий экспонат падуанской выставки проиллюстрировал для нас эволюцию науки вплоть до сегодняшнего дня; на нем даже были представлены некоторые эксперименты, запланированные на БАКе. Наш гид признался, что все эти описания казались ему слишком сложными, путанными и непонятными, пока он не понял, что БАК — это предельное на сегодняшний день воплощение микроскопа, позволяющее заглянуть в самые мелкие из доступных человеку масштабов.

И сегодня, когда мы осваиваем новые пределы точности измерений, мысли Галилея о том, как следует планировать эксперименты и интерпретировать их результаты, сохраняют свою актуальность. Его наследие живет, пока мы продолжаем создавать устройства и получать с их помощью изображения объектов, невидимые невооруженным глазом. Мы и сегодня действуем в соответствии с его взглядами на то, как работают научные методы: чтобы подтвердить или опровергнуть новую научную гипотезу, мы ставим эксперименты. Участники конференции в Падуе размышляли о том, какие новые данные принесет нам ближайшее время и что, собственно, эти данные могут означать. Мы все надеемся, что науке в очередной раз удастся расширить пределы человеческих знаний. А пока продолжаем стучаться в двери небес.

ГЛАВА 3

ЖИЗНЬ В МАТЕРИАЛЬНОМ МИРЕ

В феврале 2008 г. поэтесса Катарина Коулз и биолог и математик Фред Адлер (оба из Университета Юты в Солт-Лейк-Сити) организовали междисциплинарную конференцию под названием «Вселенная в песчинке» (A Universe in a Grain of Sand). Темой встречи стала роль масштаба в различных научных дисциплинах. Такая конференция, естественно, только выигрывала от разнообразия интересов участников и выступающих, поэтому здесь собрались представители самых разных областей. Как разделить наблюдения по категориям в соответствии с исследуемыми масштабами, чтобы разобраться в них, организовать и вновь свести воедино? В обсуждение этой темы все наши эксперты — а там были физик, архитектурный критик и профессор английского языка — могли внести свой вклад.

Во вступительной речи литературный критик и поэт Линда Греггерсон назвала нашу Вселенную «совершенной». Это слово точно характеризует то, что делает Вселенную такой чудесной и одновременно неприступной. Очень многое в ней лежит, судя по всему, за пределами нашей досягаемости и нашего понимания, — и в то же время достаточно близко, чтобы дразнить и манить нас: войдите и разберитесь. При любом подходе к знаниям главное — сделать малодоступные аспекты Вселенной более понятными. Человек жаждет научиться читать и понимать книгу природы; он хочет согласовать полученные знания со своими представлениями об окружающем мире.

Человечество в своих попытках разгадать тайны жизни и окружающего мира пользуется различными методами и стремится к разным целям. Искусство, наука и религия, хоть и связаны, возможно, с одними и теми же творческими импульсами, предлагают разные подходы к исследованию белых пятен нашего мироприятия.

Прежде чем вернуться в мир современной физики, сравним несколько способов мышления и немного углубимся в историю дебатов между религией и наукой, поговорив по крайней мере об одном камне преткновения, который никогда не будет окончательно устранен. Мы рассмотрим материалистический и механистический мир науки — важнейшую черту научного подхода к знаниям. Скорее всего, противники этого подхода не изменят своего мнения в результате нашей дискуссии, тем не менее она поможет читателю более точно представить и осмыслить корни разногласий между двумя подходами.

МАСШТАБ НЕИЗВЕСТНОГО

Немецкий поэт Райнер Мария Рильке точно ухватил парадокс, который остро ощущает всякий человек при встрече лицом к лицу с совершенством: «С красоты начинается ужас./Выдержать это начало еще мы способны;/Мы красотой восхищаемся, ибо она погнушалась/Уничтожить нас»*. В своем выступлении в Солт-Лейк-Сити Линда Грегерсон говорила о совершенстве совсем другими, тонкими, возвышенными и куда менее устрашающими словами. Она вспомнила Иммануила Канта, который различал красоту, «заставляющую нас верить в то, что мы существуем для Вселенной, а она для нас», и совершенство, которое внушает ужас. Грегерсон рассказала, что люди чувствуют «тревогу при встрече с совершенством», потому что оно плохо воспринимается человеком.

Понятие «совершенство» вновь всплыло в 2009 г. в дискуссии о музыке, искусстве и науке, которую мы с товарищами устроили во время работы над оперой о физике. Для нашего дирижера Кле-

* Перевод В. Б. Мikuшевича. — Прим. пер.

мента Пауэра некоторые музыкальные отрывки воплощали в себе одновременно ужас и красоту, тогда как остальные слышали в них только красоту. Для Клемента совершенная музыка — одинокая вершина, превосходящая его способность к восприятию и не допускающая интерпретации или расшифровки.

Совершенство предлагает нам масштабы и ставит вопросы, выходящие за пределы наших интеллектуальных возможностей. Именно поэтому оно одновременно внушает ужас и завораживает. Представление о совершенстве меняется со временем — по мере того как расширяется линейка масштабов, с которыми мы чувствуем себя комфортно и работаем без труда. Но в любой конкретный момент можно быть уверенным: мы по-прежнему жаждем узнать о поведении объектов и о событиях, происходящих на слишком мелких и слишком крупных для нас масштабах, которые мы пока не в состоянии освоить.

Наша Вселенная во многом совершенна. Она вызывает восхищение, но иногда ошеломляет — и даже пугает — своей сложностью. Тем не менее все ее компоненты чудесным образом согласуются друг с другом. И искусство, и наука, и религия стремятся направить человеческое любопытство и просветить нас, постоянно расширяя пределы познаний. Все они обещают, хотя и по-разному, помочь нам разорвать узкие рамки индивидуального опыта, проникнуть в царство совершенства и понять его (рис. 11).

Искусство позволяет нам исследовать Вселенную через призму человеческого восприятия и эмоций. С его помощью мы оцениваем мир через чувства, особое внимание уделяя тому, как человек ощущает себя во Вселенной и как он ее наблюдает. Искусство — в значительной мере производная автора; взаимодействуя с ним, мы можем прояснить наше собственное интуитивное видение мира. В отличие от науки искусство не ищет объективных истин, выходящих за пределы человеческих отношений. Оно прочно связано с нашими физическими и эмоциональными реакциями на внешний мир и основывается на внутреннем опыте, потребностях и возможностях, которые наука, как правило, никак не затрагивает.



РИС. 11. Каспар Давид Фридрих. Странник над морем тумана (1818). Каноническое изображение возвышенного. Вообще, совершенство — частая тема в изобразительном искусстве и музыке

Наука, в свою очередь, занимается поиском объективных проверяемых истин об окружающем мире. Она исследует элементы, из которых выстроена Вселенная, и то, как эти элементы взаимодействуют. Шерлок Холмс, знаменитый герой Артура Конан Дойля, наставляя доктора Ватсона, достаточно точно описал методологию науки: «Расследование преступления — точная наука, по крайней мере должно ею быть. И описывать этот вид деятельности надо в строгой, бесстрастной манере. А у вас там сантименты. Это все равно что в рассуждение о пятом постулате Евклида включить пикантную любовную историю... Единственное, что заслуживает внимания в этом деле, — цепь рассуждений от следствия к причине. Это и привело к успешному раскрытию дела»*.

Сэр Артур Конан Дойль, без сомнения, вложил бы в уста Холмса примерно те же слова, если бы тому пришлось объяснять Ватсону

* Перевод М. Литвиновой.

методологию науки при распутывании загадок Вселенной. Ученые пытаются держать человеческие предубеждения и эмоции в стороне, чтобы они не затуманивали картины и не мешали получать непредвзятую информацию об окружающей реальности. Делается это при помощи логики и коллективных наблюдений. Ученые стараются разобраться, какие объективные физические законы управляют тем, что они наблюдают.

Однако заметим, что Шерлок пользуется не дедуктивной, а индуктивной логикой, как и большинство детективов и ученых, которые пытаются сложить головоломку из кусочков. Ученые и детективы работают индуктивно — идут от наблюдений и пытаются восстановить непротиворечивую картину, которая соответствовала бы всем измеренным явлениям и параметрам. К дедукции переходят уже потом, когда появляется теория; тогда ученые и сыщики стараются предсказать другие явления и связи в мире. Но к тому моменту — по крайней мере с точки зрения детектива — дело уже сделано.

Еще один подход к познанию мира — религия; с ее помощью многие пытаются ответить на вызов, о котором говорила Греггерсон: проникнуть в труднодоступные уголки Вселенной. Британский автор XVII в. сэр Томас Браун писал в своей книге «Вероисповедание врачей» (лат. *Religio Medici*, 1643): «Я люблю потеряться в таинственном, загоняя свой разум на самое дно». Браун и такие, как он, считают, что логики и научного метода недостаточно, чтобы открыть всю истину; они верят, что к абсолютной истине обращается только религия. Очень может быть, что ключевое различие между наукой и религией заключается в характере вопросов, которые они ставят перед собой. Религия занимается в том числе вопросами, которые никоим образом не находятся в ведении науки. Религия спрашивает: «Почему?» — и предполагает наличие «предустановленной» цели, тогда как наука задается лишь вопросом «как?». Наука не считает, что у всего сущего в природе есть изначальная цель. Эту идею мы оставляем религии и философии.

Во время нашего разговора в Лос-Анджелесе режиссер Скотт Дерриксон рассказал мне, что в сценарии фильма «День, когда

Земля остановилась» (в 2008 г. он сделал ремейк фильма 1951 г.) первоначально была фраза, которая очень сильно его задела — так, что уже после съемок он несколько дней не мог избавиться от мыслей о ней. Героиня Дженнифер Конноли, говоря о смерти своего мужа, произнесла: «Вселенная случайна».

Скотта растревожили эти слова. Да, конечно, в фундаментальные физические законы входит элемент случайности, но весь смысл поиска этих законов состоит в том, что хотя бы некоторые явления Вселенной можно было бы рассматривать как предсказуемые. Скотту потребовалось несколько недель после того, как эти слова были исключены из сценария, чтобы подобрать на их место подходящую фразу — «Вселенная равнодушна». Я наострила уши, услышав эту же фразу в сериале «Безумцы»; главный герой которого, Дон Дрейпер, произнес ее как неприятную истину.

Но равнодушная Вселенная — это вовсе не плохо, хотя и не хорошо, если уж разобраться. Ученые не ищут за явлениями окружающего мира намерений, как это делает религия. Для объективности науки просто необходимо, чтобы мы считали Вселенную равнодушной. В самом деле, наука в ее беспристрастности иногда снимает клеймо зла с человеческих проявлений, указывая на их физическое, а не моральное происхождение. Мы сегодня знаем, к примеру, что душевные недуги и болезненные пристрастия иногда по «невинным» биологическим и физическим причинам переходят в категорию заболеваний, лежащих за пределами моральной сферы, исключенных из нее.

Несмотря на это, наука не обращается к вопросам морали (хотя и не отрицает их). Так же наука не задается вопросом о причинах такого поведения Вселенной и не судит о моральности или аморальности человеческих поступков. Бесспорно, некоторые ученые занимаются поисками физиологической базы человеческих поступков, хотя цель науки, вообще говоря, не в том, чтобы разбираться с моральным обликом человечества.

Граница между сферами интересов религии и науки не всегда строга, теологи иногда ищут ответы на научные вопросы, а ученые — заимствуют первоначальные идеи или направления исследований из взгляда на мир, который им близок, иногда даже

религиозного. Более того, поскольку науку делают люди, на промежуточных стадиях научного исследования, где ученые формулируют свои теории, значение нередко имеют и человеческие чувства, такие как вера в обязательное существование ответов на задаваемые вопросы. Незачем и говорить, что это работает в обоих направлениях: художники и теологи тоже могут опираться на наблюдения и научное понимание мира.

Однако тот факт, что границы между подходами иногда размыты, не устраняет принципиальной разницы в их конечных целях. Цель науки — предсказуемая физическая картина, способная объяснить, как все устроено и работает. Методы и цели науки и религии принципиально различны, ведь наука обращается к физической реальности, а религия — к психологическим или социальным человеческим желаниям и потребностям.

Вообще, разные цели не обязательно порождают конфликт — более того, они позволяют прекрасно распределить усилия. Однако религия далеко не всегда действует исходя из цели или удобства. Многие религии, помимо всего прочего, рассматривают и внешнюю по отношению к Вселенной реальность, что видно даже из религиозного определения мироздания. В словаре American Heritage Dictionary приводится следующее определение религии: «Вера в божественную или сверхчеловеческую силу (или силы), которой (которым) следует повиноваться и поклоняться как создателю (создателям) и владыке (владыкам) Вселенной». Dictionary.com говорит, что религия — это «набор верований о причине, природе и цели существования Вселенной, особенно если она рассматривается как творение некоего сверхчеловеческого начала или начал, как правило, требующего поклонения и ритуалов, а также моральный кодекс, определяющий моральность человеческих поступков». Из этих определений следует, что религия говорит не только об отношении человека к окружающему миру — будь оно моральным, эмоциональным или духовным, — но рассказывает и о мире как таковом. Это оставляет религиозные взгляды открытыми для интерпретаций. Когда наука вторгается в область знаний, на единственно верное объяснение которых претендует религия, неизбежно возникают конфликты.

Человечество неизменно стремится к знаниям и мудрости. Однако люди с разными целями или разными подходами к постановке вопросов и поиску ответов редко ладят между собой; да и сам поиск истины далеко не всегда движется по параллельным путям; зачастую пути пересекаются, порождая противоречия. Когда кто-то пытается применить религиозные верования к объяснению внешнего мира, наблюдаемые факты не всегда согласуются с этими верованиями, и религии приходится искать определенный компромисс с реальностью. Так было и в раннехристианские времена, когда церкви приходилось примирять свободу воли с божьим всемогуществом, так происходит и сегодня.

СОВМЕСТИМЫ ЛИ НАУКА И РЕЛИГИЯ?

Вопрос этот перед наукой и религией стоял не всегда. Давным-давно, до научной революции, религия и наука мирно сосуществовали. В Средние века римско-католическая церковь позволяла интерпретировать Писание достаточно свободно и широко, но продолжалось это лишь до тех пор, пока не возникла серьезная угроза главенству церкви — Реформация. В этом контексте особенно неприятными выглядели выводы Галилея в пользу гелиоцентрической теории Коперника, которые никак не укладывались в церковное учение о Небесах. Публикация результатов этих исследований не только шла вразрез с постулатами церкви, но и ставила под угрозу ее абсолютный авторитет в вопросах интерпретации Священного Писания. Неудивительно, что церковные иерархи не любили Галилея и его научные труды.

В более недавней истории можно найти многочисленные примеры конфликтов между наукой и религией. К примеру, второй закон термодинамики — тот самый, что утверждает, что со временем энтропия в мире увеличивается, — может поставить в тупик любого, кто верит, что Бог создал идеальный мир. Теория эволюции, разумеется, порождает аналогичные проблемы; время от времени они вырываются наружу — вспомните, к примеру, недавние горячие «дебаты» о креационизме. Даже расширяющаяся Вселенная может не понравиться тому, кто жаждет верить, что Вселен-

ная, в которой все мы живем, совершенна, хотя теорию Большого взрыва первым предложил католический священник Жорж Леметр.

Одним из самых забавных примеров того, что иногда ученому приходится конфликтовать с собственной верой, может служить английский натуралист Филип Госсе. Он оказался в весьма затруднительном положении, когда в начале XIX в. понял, что напластования геологических пород, в которых содержатся окаменелые останки вымерших животных, противоречат представлению о том, что Земле всего 6000 лет. В книге «Пуп Земли, или Попытка развязать геологический узел» (*Omphalos, an attempt to untie the geological Knot*) он разрешил конфликт следующим забавным образом: Земля создана недавно, утверждал он, но в ней содержатся специально созданные «кости» и «окаменелости» никогда не существовавших животных и другие свидетельства долгой (несуществующей) истории. Госсе постулировал, что любой мир должен демонстрировать признаки изменений, даже если на самом деле никаких изменений не происходило. Сегодня такая интерпретация может показаться глупой, но технически она ничему не противоречит. Однако никто, судя по всему, не принял ее всерьез. Сам Госсе переключился на морскую флору и фауну. Кости динозавров подвергали его веру серьезнейшему испытанию.

К счастью, большинство верных научных идей со временем начинают казаться менее радикальными. В конце концов, как правило, научные открытия побеждают и утверждаются. Сегодня никто не поставит под сомнение гелиоцентрическую теорию строения Солнечной системы или расширение Вселенной. Но буквальная интерпретация священных книг до сих пор вызывает проблемы у верующих, склонных воспринимать писанные законы своей религии слишком серьезно.

Менее буквальное прочтение Священного Писания до XVII в. помогало избегать подобных конфликтов. Однажды в разговоре за ланчем Карен Армстронг, ученый и историк религии, объяснила мне, что когда-то конфликта между наукой и религией не было. Религиозные тексты воспринимались менее буквально и догматично, а потому вызывали меньше конфликтов.

В V в. Блаженный Августин сказал об этом достаточно определенно: «Ведь нередко бывает, что и нехристианин немало знает о земле, небе и остальных элементах видимого мира, о движении и обращении, о величине и удаленности звезд, о затмениях Солнца и Луны, о круговращении годов и временной природе животных, растений, камней и тому подобном, притом знает так, что может защитить эти знания и очевиднейшими доводами, и жизненным опытом. Между тем бывает крайне стыдно, опасно и даже гибельно, когда какой-нибудь неверный едва удерживается от смеха, слыша, как христианин, говоря о подобных предметах якобы на основании христианских писаний, несет такой вздор, что попадает пальцем в небо. И не то плохо, что осмеивается заблуждающийся, а то, что в глазах людей, о спасении души которых мы неустанно заботимся, наши писатели выглядят невежественными и потому ими презираются»*.

Августин в своей мудрости пошел еще дальше. Он объяснил, что Бог намеренно включил в Священное Писание загадки, чтобы дать людям возможность искать разгадки и радоваться их разрешению. Это относилось в равной степени к постулатам, которые требовали метафорической интерпретации. Августин, похоже, с некоторым юмором смотрел на логичность и нелогичность всего учения и одновременно пытался объяснить основные парадоксы. К примеру, как может человек — любой человек — до конца понять или оценить Господень план без возможности путешествовать во времени?

Галилей, кстати говоря, был согласен с Блаженным Августином. В 1615 г. он писал Кристине Лотарингской, великой герцогине Тосканской: «Во-первых я считаю, что весьма благочестиво говорить и благоразумно утверждать, что Святая Библия не может говорить неправду, если ее истинный смысл понят верно». Он даже считал, что так же полагал и Коперник. Галилей утверждал, что «Коперник не пренебрегал Библией, но он прекрасно понимал, что, будь его учение доказано, оно не могло бы противоречить Писанию, если то и другое было бы верно понято».

* Augustine. The Literal Meaning of Genesis. Vol. 1, books 1–6 (New York: Newman Press, 1982).

Галилей писал также, ссылаясь в своем рвении на Августина: «И если кто противопоставит слова Священного Писания чему-то очевидно разумному, то тот, кто делает это, не знает, что творит; ибо он противопоставляет истине не смысл сказанного в Библии, каковой смысл недоступен его пониманию; не то, что есть в Библии, но то, что он нашел в себе самом и лишь вообразил, что оно есть там».

Августин был не слишком догматичен в своем подходе к Писанию; он считал, что текст Писания всегда имеет рациональный смысл. Любое внешнее противоречие с наблюдаемыми во внешнем мире фактами есть обязательно результат непонимания читателя, даже если верное объяснение неочевидно и неизвестно. Августин рассматривал Библию как божественное откровение, записанное и сформулированное человеком.

Августин истолковывал Библию отчасти как отражение субъективного опыта записавшего откровение человека, и в этом его интерпретация Писания схожа с современным определением искусства. Если бы церковь придерживалась августиновых взглядов, ей не нужно было бы отступать и терять позиции перед лицом научных открытий.

Галилей это понимал. Для него самого и его единомышленников наука и Библия никак не могли противоречить друг другу — нужно было только правильно понять написанное. Причина любого явного конфликта между ними крылась не в научных фактах, а в человеческом понимании или непонимании. Да, Библия временами может быть недоступна человеческому разуму, и может даже показаться на первый взгляд, что она противоречит нашим наблюдениям; тем не менее, согласно интерпретации Августина, Библия не может быть неправа. Галилей был хорошим христианином и не считал себя вправе утверждать что-то, что шло бы вразрез с Писанием, даже когда логика подводила его к этому. Много-много лет спустя папа Иоанн Павел II даже объявил, что Галилей был лучшим теологом, чем его оппоненты.

Но Галилей так же верил в собственные открытия. В одной из навязанных ему теологических дискуссий он прозорливо заметил: «Обратите внимание, теологи, что в своем стремлении

выводить вопросы веры из тезисов, связанных с неподвижностью Солнца и Земли, вы рискуете тем, что когда-нибудь вам придется заклеить как еретиков тех, кто объявит, что Земля неподвижна, а Солнце меняет свое положение, — когда-нибудь, говорю я, когда, возможно, будет доказано физически или логически, что Земля движется, а Солнце стоит на месте».

Ясно, что христианская религия далеко не всегда исповедовала подобный взгляд. В противном случае Галилей не оказался бы в заключении, а современные газеты не пестрели бы сообщениями о судебных расправах, связанных с теорией разумного замысла. Хотя у многих священников достаточно гибкие взгляды, однозначное объяснение физических явлений вполне может породить проблемы. В наше время трудно всерьез отстаивать буквальное прочтение Священного Писания. В будущем, когда техника позволит нам заглянуть в мир еще более мелких — или еще более крупных — масштабов, наука и религия еще глубже проникнут друг в друга, и поводов для потенциальных конфликтов станет только больше.

Сегодня значительная часть религиозных людей в мире стремится избегать подобных конфликтов и выбирает более свободную интерпретацию своей веры. Не полагаясь на жесткое и буквальное толкование Писания или догм любой другой религии, эти люди считают, что сохраняют веру, принимая при этом открытия и доказательные аргументы науки.

ФИЗИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ

Основная проблема заключается в том, что противоречия между наукой и религией уходят намного глубже конкретных формулировок. Даже если речь не идет о буквальном толковании каких бы то ни было текстов, проблема не решается. Религия и наука опираются на несовместимые логические установки — ведь религия рассматривает все в нашем мире и жизни через вмешательство внешнего божества. Божественные действия — не важно, относятся ли они к грому и молнии или к нашему сознанию — не укладываются в рамки науки.

Вообще, вера как социальный или психологический опыт личности — совершенно не то же самое, что религия, основанная на представлении о Боге, который активно вмешивается в нашу жизнь, влияет на нас или на наш мир извне. В конце концов, для некоторых религия — чисто личное предприятие. Для тех, кто так считает, вероятно, важны социальные связи, складывающиеся в религиозной общине единомышленников — для них очень важно быть частью подобной группы, — или психологический комфорт от ощущения себя частью большого мира. Вера для таких людей неотделима от соблюдения обряда и выбранного образа жизни. Общность цели — источник душевного комфорта.

Многие такие люди считают себя духовными. Религия обогащает их существование — придает ему объемность, глубину, смысл и цель, а также чувство причастности. Они не считают, что роль религии — объяснять механику Вселенной. Религия действует на них через изначально присущее им чувство благоговения перед окружающим миром и его чудесами; иногда она помогает таким людям общаться с окружающими и вообще с внешним миром. Многие из них искренне считают, что религия и наука могут благополучно сосуществовать в человеческом обществе.

Но, как правило, религия — это не только образ жизни и философия. В большинстве религий речь идет о божестве, способном вмешиваться в жизнь людей таинственными методами, которые не могут описать даже служители божества и, естественно, не в состоянии объяснить наука. Подобная вера у религиозных людей даже самых широких взглядов, готовых приветствовать научные достижения, неизбежно вызывает серьезные затруднения: как можно совместить действия Господа с положениями науки. Даже если допустить существование Бога или некоей духовной силы, которая ранее могла влиять на происходящее в мире и играть в нем ведущую роль, то с научной точки зрения немыслимо, чтобы Бог и сейчас продолжал вмешиваться, не оставляя после своих действий никаких материальных следов.

Чтобы разобраться в существе конфликта — и лучше оценить природу науки, — нам нужно более полно понять характерную для науки материалистическую точку зрения, согласно которой

наука работает в материальной Вселенной, а любое активное воздействие имеет физические корреляты. В научный взгляд на мир встроено также представление о том, что мы в состоянии распознать компоненты материи на любом структурном уровне (об этом уже говорилось в главе 1). Объект, существующий в большем масштабе, в меньших масштабах построен из материальных деталей. Даже зная все физические элементы более мелкого масштаба, мы не всегда можем объяснить происходящее на более крупных масштабах, но мелкие компоненты-«кирпичики» все же существенны. Знания вещественной составляющей интересующих нас явлений не всегда достаточно для их объяснения, но без физических коррелятов само существование этих явлений невозможно.

Некоторые люди обращаются к религии в поисках ответов на сложные вопросы, к которым, по их мнению, наука никогда не сможет подступиться. В самом деле, научное материалистическое мировоззрение не гарантирует, что мы сможем все понять и во всем разобраться — по крайней мере одного только понимания базовых компонентов для этого явно недостаточно. Классифицируя объекты Вселенной по масштабу, ученые признают, что мы вряд ли сможем ответить на все вопросы сразу; кроме того, хотя фундаментальная структура вещества очень важна, сама по себе она вряд ли даст ответы на все наши вопросы. Несмотря на знакомство с квантовой механикой, мы продолжаем пользоваться законами Ньютона, потому что именно они определяют движение мяча в земной атмосфере, а вычислить то же самое, исходя из данных об атомной структуре, было бы чрезвычайно трудно. Мяч не может существовать без составляющих его атомов, но атомная картина не поможет рассчитать траекторию его полета, хотя одно с другим, разумеется, вполне согласуется.

Этот урок можно распространить на многие явления, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни. Как правило, мы можем не обращать внимания на подробности внутренней структуры или точный состав, хотя свойства материала имеют значение. Чтобы ездить на автомобиле и даже водить его, не нужно знать его внутреннее устройство. Готовя на кухне, мы смотрим, пропекся ли пирог, достаточно ли разварилась овсянка и поднялось ли суфле.

А вот скрытая внутри продуктов атомная структура, отвечающая за все эти изменения, нас интересует редко, — если, конечно, мы не посвятили себя молекулярной кулинарии. Однако это не отменяет того факта, что без составляющих ее атомов пища не была бы питательной. Ингредиенты суфле совсем не похожи на итоговое блюдо (рис. 12). Тем не менее без элементов и молекул, которые вы предпочитаете не замечать, ваша еда не могла бы существовать.

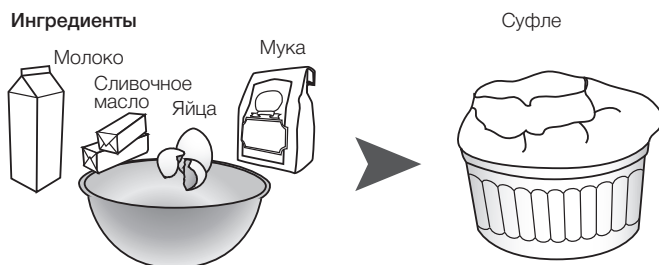


РИС. 12. Суфле сильно отличается от ингредиентов, из которых приготовлено. Точно так же вещество может обладать совершенно другими свойствами — и на первый взгляд подчиняться совершенно другим физическим законам, — нежели те более фундаментальные «кирпичики» вещества, из которых оно построено

Аналогично практически любой человек затруднится точно определить, что такое музыка. Но если все же попытаться описать это явление и нашу эмоциональную реакцию на него, то вряд ли музыка будет рассматриваться на уровне атомов или нейронов. Когда мы слушаем музыку, наши уши регистрируют звуковые колебания, произведенные хорошо настроенным инструментом, но на самом деле музыка — это нечто гораздо большее, чем колебания отдельных атомов воздуха, а наша реакция на музыку — не просто физическое действие ее на ухо и мозг.

Тем не менее материалистическое мировоззрение никуда не девается, и физическая основа происходящего имеет принципиальное значение. Музыка действительно возникает при колебаниях молекул воздуха. Избавьтесь от механической реакции уха на чисто физические явления — и вы не услышите музыки. (Да, и в космосе никто не услышит вашего крика.) Дело просто в том,

что наше восприятие и понимание музыки выходит за рамки чисто материалистического описания. Сосредоточившись только на колебаниях молекул, мы не сможем ответить на вопрос о том, как человек воспринимает музыку. Для понимания музыки необходимо оценивать и аккорды, и гармонию, и отсутствие гармонии такими способами, в которых никак не участвуют молекулы или колебания. Тем не менее музыка без колебаний — или по крайней мере без сенсорного воздействия, которое производят эти колебания на человеческий мозг — невозможна.

Еще один пример. Понимание базовых компонентов, составляющих тело животного, — это лишь первый шаг к пониманию того, что представляет собой жизнь. Мы почти наверняка не сможем понять природу жизни, не разобравшись в том, как эти компоненты, соединившись, порождают знакомые нам явления. Жизнь — *эмерджентное явление**, выходящее за рамки простой суммы составляющих ее элементов.

Скорее всего, сознание — тоже эмерджентное понятие. Хотя у нас нет пока вразумительной теории сознания, ясно, что мысли и чувства коренятся, по существу, в электрических, химических и физических свойствах мозга. Ученые могут наблюдать физические явления в мозгу, связанные с мыслями и чувствами, хотя и не способны пока объединить все это воедино и объяснить, как что работает. Такой материальный взгляд необходим, но не всегда достаточен для понимания всех явлений нашего мира.

Никто не может гарантировать, что мы когда-нибудь сумеем понять сознание до самых фундаментальных его составляющих, но не исключено, что нам удастся в конце концов выработать принципы, применимые на некоем более крупном, более составном или эмерджентном масштабе. Будущие научные успехи помогут ученым лучше понять фундаментальную химию и электрические каналы мозга и таким образом идентифицировать базовые функционирующие единицы. Сознание, вероятно, будет объяснено как явление, которое можно до конца понять, только выделив и изучив правильные составные элементы.

* Эмерджентность — несводимость свойств системы к сумме свойств ее компонентов; синоним — «системный эффект». — Прим. ред.

Это означает, что шанс на серьезное продвижение в этом направлении имеют не только нейробиологи, изучающие базовую химию мозга. Психологи, к примеру, задаются вопросом о том, чем мыслительные процессы младенца отличаются от наших с вами; другие ученые исследуют, чем мысли человека отличаются от собачьих; у тех и других тоже хорошие шансы на успех. Исследуя проблему на более высоком уровне, мы, возможно, сможем понять кое-что о сознании и о том, какие вопросы надо будет задать, когда мы пойдем дальше и начнем изучать строительные кирпичики — а именно химию и физику мозга. Как и в случае с чудесным суфле, нам придется разбираться в эмерджентных системах, которые при этом вскроются. Тем не менее ни одна человеческая мысль не может возникнуть и ни одно действие не может иметь место без того, чтобы не были затронуты физические компоненты нашего тела.

Физика, может быть, не так загадочна, как квантовая теория сознания, но она делает успехи, изучая явления на разных масштабах. Изучая несопоставимые размеры и различные состояния вещества, физики ставят перед собой разные задачи. Вопросы, которые мы задаем себе при разработке проекта космического корабля для путешествия на Марс, существенно отличаются от тех, которые интересуют нас при изучении взаимодействия кварков. Разумеется, те и другие имеют право на существование, но одни из других напрямую не выводятся. Тем не менее материальный объект, который мы отправляем в космос, состоит из тех самых фундаментальных компонентов, в которых мы надеемся разобраться.

Мне не раз случалось слышать, как материалистическую точку зрения, которой придерживаются ученые, изучающие элементарные частицы, критикуют как редукционистскую; при этом нередко нам указывают на все те явления, в которых мы не хотим — или не можем — разобраться. Иногда речь идет о физических или биологических процессах, таких как деятельность мозга или ураганы, иногда о духовных явлениях; здесь я теряюсь и не всегда понимаю, о чем идет речь, но вынуждена согласиться — да, мы их не исследуем. Физические теории имеют отношение к строению вещества на любых масштабах — от крупнейших

до мельчайших. Со временем мы выстраиваем непротиворечивую картину того, как реальность одного уровня переходит в реальность другого уровня. Базовые элементы для реальности принципиально важны, но ученые не считают, что знания о них сами по себе все объясняют. Для объяснений нужны дальнейшие исследования.

Даже если окажется, что теория струн объясняет квантовую гравитацию, понятие «теория всего» все равно не пригодится. В том маловероятном случае, если физикам удастся-таки выработать всеохватывающую фундаментальную теорию, без ответа все равно останется множество вопросов о явлениях более крупных масштабов — ведь для этого недостаточно только знания базовых компонентов. Только когда ученым удастся понять комплексные явления, возникающие на более крупных масштабах, чем те, что описываются элементарными струнами, можно будет надеяться на объяснение сверхпроводящих материалов, чудовищных океанских волн — и жизни. Ученые в своей работе исследуют масштаб за масштабом — последовательно. Это позволяет нам изучать объекты и процессы на гораздо больших расстояниях и масштабах, чем те, что были бы нам доступны, если бы мы пытались непременно отслеживать поведение каждого из их компонентов.

Несмотря на то что для получения ответов на разные вопросы мы обращаемся к разным уровням реальности, материалистический взгляд на вещи остается обязательным. Физика и другие науки изучают вещество — или материю, — существующее в мире. Наука по сути своей имеет дело с механическими взаимодействиями объектов и их результатами. Объект движется, потому что определенная сила оказала на него воздействие. Двигатель работает за счет расходования энергии. Планеты обращаются вокруг Солнца под действием его гравитационного притяжения. С научной точки зрения поведение человека тоже зависит в конечном итоге от химических и физических процессов, даже если мы пока далеки от понимания, как все эти механизмы работают. Моральный выбор человека тоже, вероятно, имеет отношение, по крайней мере отчасти, к нашим генам и, соответственно, к нашей эволюционной истории.

Может быть, мы и не пытаемся ответить на все жизненно важные вопросы одновременно, но основа необходима для научного описания. Для ученого очевидно, что под всяким описанием окружающей действительности кроются материальные механистические элементы. У любого явления в нашем мире есть физические корреляты, без которых это явление невозможно. Они необходимы, даже если с их помощью невозможно объяснить все на свете.

В науке такой материалистический взгляд прекрасно работает. Но как только религия привлекает Бога или какую-то другую нематериальную сущность и начинает объяснять поведение людей или мира с их помощью, неизбежно возникают логические конфликты. Проблема в том, что если вы хотите принять одновременно и науку, и Бога, который управляет Вселенной или действиями людей, то вам придется решить вопрос о том, в какой именно момент в ход вещей вмешивается божество и как именно оно это делает. Материалистическая позиция науки такова: если гены, влияющие на наше поведение, возникли в результате случайных мутаций, позволяющих видам эволюционировать, то Бог может повлиять на поведение человека лишь в том случае, если он физически вмешается и сотворит якобы случайную мутацию. Чтобы управлять нашим поведением сегодня, Бог должен был бы запрограммировать ход якобы случайной мутации, определившей наше развитие. Если он сделал это, то каким образом? Приложил силу? Может ли Бог манипулировать электрическими процессами в мозгу человека? Или на более высоком уровне: если Бог дает Вселенной цель, то как он обеспечивает исполнение своей воли?

Проблема в том, что многое из сказанного выше не просто кажется неимоверно глупым, но и вопросы эти, похоже, не имеют разумных ответов, которые согласовывались бы с наукой в том смысле, в каком мы ее понимаем. На каких принципах, скажите на милость, может работать эта «божественная магия»?

Ясно, что людям, которые хотят верить в возможность божественного вмешательства, в определенные моменты приходится прибегать к ненаучному мышлению. Даже если наука не всегда говорит нам, почему происходит то или иное явление, мы все же знаем, как движутся и взаимодействуют материальные объекты.

Если Бог не окажет физического воздействия, объекты двигаться не будут. Он не сможет подействовать даже на наши мысли, которые в конечном итоге определяются электрическими сигналами в мозгу.

Если подобное внешнее вмешательство признается фактом в религиозном сознании, то логика и научная мысль подсказывают, что должен существовать механизм, при помощи которого осуществляется это воздействие. Религиозная или духовная вера, согласно которой невидимая сила влияет на поступки и поведение человека, порождает ситуацию, в которой верующему ничего не остается, кроме как отбросить логику и продолжать верить.

Такая несовместимость, как мне кажется, создает принципиально безвыходное положение и неразрешимое противоречие в методах и представлениях. «Непересекающиеся магистерии», предложенные Стивеном Джейм Гулдом, — владения науки, охватывающие эмпирическую вселенную, и владения религии, распространяющиеся на нравственные вопросы — на самом деле все же пересекаются и тоже сталкиваются с этим трудноразрешимым парадоксом. Конечно, верующие могут отдать этот вопрос на откуп религии, а науке еще только предстоит ответить на многие глубокие и фундаментальные вопросы, важные для человечества, касаются ли они работы нашего мозга или далеких небесных объектов. Тем не менее, несмотря ни на что, все мы живем в царстве науки.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ КОНФЛИКТЫ И ИРРАЦИОНАЛЬНОЕ СТРЕМЛЕНИЕ УБЕЖАТЬ ОТ РЕАЛЬНОСТИ

Однако несовместимость науки и религии не всегда беспокоит верующих. Однажды в самолете во время рейса из Бостона в Лос-Анджелес я сидела рядом с молодым актером. Он получил образование в области молекулярной биологии, но при этом имел весьма необычные взгляды на эволюцию. Прежде чем податься в актеры, он в течение трех лет занимался тем, что координировал обучение естественным наукам в городских школах. Когда мы встретились, он возвращался с церемонии инаугурации президента Обамы; его

переполняли энтузиазм и оптимизм, он мечтал сделать мир лучше. Параллельно с успешной актерской карьерой он намеревался открывать по всему миру школы, в которых учили бы наукам и научным методам мышления.

Но разговор наш принял неожиданный оборот. Оказалось, что в своих школах он планирует ввести курс религии. В его собственной жизни религия играла очень значимую роль; в то же время он считал, что каждый человек должен сам сделать выбор. Но это было еще не самое удивительное. Он начал объяснять, что, по его мнению, человек произошел от Адама, а не от обезьяны. Я не поняла, как можно, имея биологическое образование, не верить в эволюцию. Это, на мой взгляд, намного более серьезные противоречия, чем те, что связаны с идеей непосредственного вмешательства Бога в материалистическую Вселенную. Молодой человек рассказал мне, что без труда осваивал науку и прекрасно понимал ее логику, но наука — это всего лишь то, как человек (что бы это ни значило) осмысливает окружающее.

Этот разговор утвердил меня во мнении, что нам очень трудно будет ответить на вопрос о совместимости науки и религии. Наука, основанная на эмпирических данных и логике, и религия, по природе своей неотделимая от откровения свыше, пытаются идти к истине совершенно разными путями. Вообще, увидеть противоречие можно только там, где действуют законы логики — ведь логика пытается разрешать парадоксы, тогда как религиозная мысль в них буквально купается. Если вы верите в истину, полученную через откровение свыше, значит, вы уже вышли за пределы действия научных законов и никаких противоречий не увидите. Верующий способен объяснять мир совершенно нерационально и при этом считать, что такое объяснение совместимо с научным; он принимает мир таким, какой он есть «по воле Божьей». Или, как мой сосед по самолету, просто решает, что готов жить с этим противоречием.

Но если Бог и способен обходить логические противоречия, то наука этого делать не умеет. Те приверженцы религии, которые хотят одновременно с религиозным описанием мира принимать и научное мышление, оказываются перед громадной пропастью,

которая разделяет научные открытия и невидимые, неосязаемые божественные воздействия. Пропасть эту невозможно преодолеть логическим путем. У них нет другого выхода, кроме как отказаться на время от логической (или, по крайней мере, от буквальной) интерпретации вопросов веры или просто махнуть рукой на противоречия и не обращать на них внимания.

Надо сказать, что в любом из этих двух случаев человек может стать настоящим ученым. А религия, наверное, будет сильно облегчать ему жизнь. Но в голове каждого верующего ученого научная информация ежедневно бросает вызов его вере. Религиозная часть мозга не способна функционировать одновременно с его познающей частью. Они просто несовместимы.

ГЛАВА 4

В ПОИСКАХ ОТВЕТОВ

Я впервые услышала выражение «Достучаться до небес» в 1987 г. на концерте Боба Дилана и группы Grateful Dead в Окленде, штат Калифорния. Вряд ли надо говорить, что в название моей книги вложен иной смысл, чем тот, что вкладывал в свои стихи автор (хотя мысленно я до сих пор слышу, как Дилан и Джерри Гарсия поют эту песню). Отличается мое название и от библейского источника, хотя эту интерпретацию, признаюсь, мне хотелось обыграть. В Евангелии от Матфея сказано: «Просите, и дано будет вам; ищите, и найдете; стучите, и отворят вам; ибо всякий просящий получает, и ищущий находит, и стучащему отворят».

Следуя этим словам, люди могут искать знания, но конечная их цель — это поиск Бога. Человеческий интерес к устройству окружающего мира и активные познавательные действия — всего лишь ступени на пути к Божественному; Вселенная сама по себе и знания о ней — вторичны. Ответы на вопросы могут быть получены или верующий получит стимулы для более активного поиска истины; в любом случае без Бога знание недостижимо или бессмысленно и не стоит того, чтобы за ним гнаться. Человек не может сам познать истину, не может быть судьей.

Название моей книги говорит о другой — научной — философии и о других целях. Цель науки — не просто пассивное понимание и вера, а правда о Вселенной. Ученые активно стремятся к двери познания — границе уже изведенного. Мы задаем вопросы и исследуем — и меняем свои взгляды, когда факты и логика вы-

нуждают нас сделать это. Мы уверены только в том, что можем проверить при помощи эксперимента или что логически следует из экспериментально подтвержденных гипотез.

Ученые немало знают о Вселенной, но мы знаем также, что неизведанного гораздо больше и что многое еще только предстоит понять. Еще очень многое лежит за пределами возможностей сегодняшних экспериментов — и вообще любых экспериментов, какие мы можем вообразить. Однако, несмотря на все наши ограничения, каждое новое открытие позволяет добавить еще одну — очередную — ступеньку в нашем восхождении к истине. Иногда одна-единственная ступенька способна коренным образом изменить наш взгляд на мир. Конечно, мы признаем, что наши амбициозные устремления реализуются не всегда; тем не менее ученые упорно ищут пути к более полному и глубокому пониманию действительности, а технические достижения постепенно расширяют пределы «территории», где все доступно нашему взгляду. Затем мы переходим к поиску более полных и непротиворечивых теорий, способных вобрать в себя новую, только что полученную информацию.

Итак, перед нами ключевые вопросы. Кто имеет возможность — или право — заниматься поисками ответов? Сами ли люди исследуют окружающий мир или доверяют высшим авторитетам? Прежде чем углубиться в мир физики, завершим эту часть книги анализом и противопоставлением научной и религиозной точек зрения.

КТО ГЛАВНЫЙ?

Мы уже видели, что появление научного мышления в XVII в. раскололо христианский мир в его отношении к знаниям и породило конфликты между принципиально разными подходами, не утихшие до сего дня. Но существовал и второй источник противоречий между наукой и религией, и этот источник — вопрос о власти. В глазах церкви убежденность Галилея в том, что он способен самостоятельно мыслить и независимо осмысливать Вселенную, отклонялась недопустимо далеко от христианских религиозных канонов.

Развивая научный метод, Галилей отказался от слепого следования авторитетам в пользу собственных наблюдений и их независимой интерпретации. Он готов был менять свои взгляды в соответствии с результатами наблюдений. Таким образом, Галилей инициировал совершенно новый подход к познанию мира — тот самый, что позже получил развитие и позволил достичь гораздо более глубокого понимания природы и возможности влиять на нее. И все же, несмотря на опубликование основных своих достижений (или, скорее, вследствие этого), Галилей оказался в тюрьме. Вывод о том, что Земля не является центром Солнечной системы, которого Галилей не скрывал, оказался слишком опасен для религиозных властей того времени и их строгой интерпретации Писания. После трудов Галилея и других независимых мыслителей, положивших начало научной революции, любая буквальная библейская трактовка природы, происхождения и поведения Вселенной стала вызывать серьезные сомнения.

Галилею не повезло: время для радикальных заявлений оказалось чрезвычайно неудачным, поскольку совпало с расцветом контрреформации, которой католическая церковь ответила на появление своих протестантских отпрысков. Католицизм чувствовал серьезную угрозу со стороны Мартина Лютера, который выступил в защиту независимой мысли и права каждого толковать Писание, отталкиваясь непосредственно от текста. Право церкви на исключительную интерпретацию священных текстов, которую прихожанам следовало безоговорочно принимать, было поставлено под сомнение. Галилей не просто поддержал взгляды Лютера, он прошел на шаг дальше. Отвергнув прежние авторитеты, он высказал теорию, прямо противоречившую католическому толкованию религиозных текстов. Его научные методы основывались на прямых наблюдениях природы, которые он затем пытался объяснить при помощи самой экономной гипотезы, охватывающей все полученные данные. Сам Галилей был искренним приверженцем католической церкви, но его исследования, мысли и методы в глазах церкви слишком походили на протестантские. Ученый, сам того не желая, вмешался в религиозную войну за сферы влияния.

По иронии судьбы, движение контрреформации само подтолкнуло Коперника к теории гелиоцентрической вселенной. Католическая церковь хотела убедиться в том, что ее календарь надежен и что праздники приходятся на правильное время года, а обряды совершаются как положено. Церковь обратилась к астрономам, в том числе и к Копернику, с просьбой доработать юлианский календарь и привести его в соответствие с реальным движением планет и звезд. Именно эти исследования привели ученого к неожиданным наблюдениям, а затем и к радикальной теории.

Лютер не принял теории Коперника. Ее вообще почти никто не принял, пока более точные наблюдения Галилея и в качестве решающего аргумента теория тяготения Ньютона не подтвердили ее. Однако Лютер принимал другие научные достижения в астрономии, в медицине — те, которые он считал совместимыми с широким взглядом на природу. В общем-то, он не был большим поклонником науки, но Реформация породила очень своеобразное мышление, атмосферу, где новые идеи можно было обсуждать и принимать, а это, безусловно, способствовало возникновению научных методов мышления. Кроме того, отчасти благодаря развитию книгопечатания научные идеи наряду с религиозными получили возможность стремительно распространяться и снижать авторитет католической церкви.

Лютер считал мирские научные исследования потенциально не менее ценными, чем религиозные. Ученые, такие как великий астроном Иоганн Кеплер, думали так же. Кеплер писал своему бывшему профессору в Тюбингене Михаелю Местлину: «Я хотел стать теологом и долгое время испытывал беспокойство. Однако посмотрите, как теперь благодаря моим усилиям астрономия славит Бога»*.

С этой точки зрения наука была прекрасным способом утвердить сияющее величие Бога и созданного им мира, а также тот факт, что у различных явлений в этом мире могут быть сложные и разнообразные объяснения. Наука стала средством лучше понять разумно устроенную и упорядоченную Богом Вселенную

* Holton G. Johannes Kepler's Universe: Its Physics and Metaphysics // American Journal of Physics, May, 1956, № 24, pp. 340–351.

и помочь человечеству. Следует заметить, что в те времена даже лучшие ученые не только не отвергали религию, но и, наоборот, расценивали свои исследования как способ восславить творение Господа. В книге природы, как и божественных книгах, они видели путь к просветлению и откровению. Изучение природы с этой точки зрения было формой выражения благодарности Создателю всего сущего.

Эту или подобную точку зрения иногда случается услышать и сегодня. В 1979 г. пакистанский физик Абдус Салам в Нобелевской лекции после получения премии за большую роль в создании Стандартной модели элементарных частиц сказал: «Святой пророк ислама всегда говорил, что поиск знаний и учености входит в обязанность всякого мусульманина, будь то мужчина или женщина. Он побуждал своих учеников всюду искать знаний, даже если за ними придется ехать в Китай. Ясно, что здесь имелись в виду скорее научные, нежели религиозные знания, а также делался упор на интернациональность современного научного поиска».

ПОЧЕМУ ЛЮДЯМ НЕ ВСЕ РАВНО?

Несмотря на принципиальные различия, описанные в предыдущей главе, некоторых верующих вполне устраивает ситуация, когда научную и религиозную части мозга им приходится использовать попеременно, а понимание природы рассматривается как способ приблизиться к пониманию Бога. Многие из тех, кто не занимается активно наукой, тоже не возражают против научного прогресса. Тем не менее пропасть между наукой и религией по-прежнему огромна, и многие в США и других частях света это остро ощущают. Время от времени эта пропасть расширяется настолько, что порождает насилие или в самом крайнем случае вызывает протесты по поводу системы образования.

С точки зрения религиозных деятелей, все, что противоречит религии, в том числе наука, должно вызывать подозрения; причин тому много, и далеко не все они имеют отношение к истине и логике. Те, кто стоит у власти, всегда склонны использовать Бога как козырную карту, которая оправдывает именно их точку

зрения. Ясно, что независимое исследование любого рода может быть потенциальной угрозой. А копание в Господних тайнах может еще сильнее подорвать моральный авторитет церкви и могущество мирских властителей. Слишком настойчивые попытки докопаться до истины плохо согласуются со смиренностью, а кое-кто может даже забыть о значении Господа. Неудивительно, что религиозных деятелей это иногда тревожит.

Но почему отдельные люди иногда тоже встают на подобные позиции? Для меня вопрос здесь не в том, чем отличается наука от религии. Разницу между ними можно сформулировать достаточно четко, и об этом уже говорилось в предыдущей главе. Важно другое. Почему людей это так волнует? Почему многие с подозрением смотрят на науку и научный прогресс? И почему вопрос о главенстве вспыхивает так часто?

Однажды я попала на кембриджский круглый стол по вопросам науки, искусства и религии — серии встреч между партнерами Гарварда и МТИ. Темой первого семинара, на который я попала, был поэт XVII в. Джордж Герберт и «новые атеисты». И дискуссия помогла мне в какой-то мере разобраться в этих вопросах.

Основным докладчиком тогда был ученый-литературовед Стенли Фиш. Он начал свое выступление с краткого изложения взглядов «новых атеистов» и их враждебного отношения к вере. «Новыми атеистами» называют таких авторов, как Кристофер Хитченс, Ричард Докинз, Сэм Харрис и Дэниел Деннет, — авторов, которые в книгах-бестселлерах сурово клеймят религию и церковь.

После краткого изложения их взглядов Фиш перешел к критике; он критиковал в них отсутствие понимания и терпимости к религии; его слова падали на благодарную почву, так как мне кажется, что на том семинаре я как неверующая была в меньшинстве. Фиш утверждал, что позиция «новых атеистов» была бы более прочной, если бы они учитывали те проблемы с независимостью, с которыми верующим постоянно приходится иметь дело.

В вере необходимо активное вопрошание, и многие религии просто требуют этого от своих приверженцев. Но в то же время многие религии, в том числе и некоторые ветви протестантизма, призывают к отказу или подавлению независимой воли. Говоря

словами Кальвина, «человек по природе своей склонен к ложному самолюбованию. Поэтому вот что истина Господня побуждает нас искать в себе: знание того рода, который избавит нас от всякой уверенности в собственных силах, лишит всякого повода к хвастовству и приведет к покорности»*.

Борьба между жаждой знаний и недоверием к человеческой природе пронизывает всю религиозную литературу, включая и стихи Герберта, которые обсуждали Фиш и другие участники круглого стола. В Кембридже тогда развернулась дискуссия о внутренних конфликтах Герберта по поводу его отношений со знанием и с Богом. Для Герберта всякое знание, добытое самостоятельно, было признаком греховной гордыни. Аналогичное предупреждение мы находим и в стихах Джона Мильтона. Сам он твердо верил в необходимость упорного интеллектуального поиска; тем не менее Рафаил в «Потерянном рае» говорит Адаму, что ему не следует проявлять слишком большого любопытства к движению звезд, ибо «им не нужна твоя вера».

Удивительно (по крайней мере, для меня), но заметные представители нашей группы профессоров Гарварда и МТИ, присутствовавшие на круглом столе, одобрили попытку самоотречения Герберта, считая, что подавлять собственную индивидуальность правильно и хорошо и что все дело в стремлении настроиться на высшую силу. (Всякий, кто знаком с профессорами Гарварда и МТИ, тоже был бы удивлен таким подозрительным отрицанием собственного «я».)

Возможно, подлинная суть дебатов между наукой и религией заключается как раз в том, может ли человек самостоятельно докопаться до истины. Неужели отрицательное отношение к науке, с которым мы сегодня нередко сталкиваемся, коренится отчасти в тех самых крайних взглядах, которые выражали Герберт и Милтон? Мне кажется, спор идет не столько о возникновении мира, сколько о том, кто имеет право осмысливать окружающее и чьим выводам нам следует доверять.

Вселенная внушает человеку смирение. Природа тщательно прячет ответы на многие самые интересные свои загадки. Но уче-

* Calvin J. Institutes of Christian Religion. — Minneapolis: Fortress Press, 1999.

ные достаточно уверены в себе, чтобы считать, что человек способен их разгадать. Неужели искать ответы кощунственно? Или просто самонадеянно? Ученые, как говорил Эйнштейн, а вслед за ним и нобелевский лауреат Дэвид Кросс, считают, что борются с Богом, пытаясь вырвать у него ответы на глобальные вопросы мироздания. Дэвид, разумеется, не имел в виду буквальной борьбы (и, конечно, не говорил о смирении); он отдавал должное чудесной способности человека осмысливать окружающий мир.

Недоверие к этой способности, доставшееся нам от предков, имеет продолжение и в других областях; его можно видеть в юмористической литературе, в кино, в современной политике. В наше ироничное время серьезное отношение и уважение к фактам стало несколько немодным. Поразительно, до чего доходят некоторые люди в своем стремлении отрицать всякие успехи науки. Однажды на вечеринке я познакомилась с женщиной, которая упрямо утверждала, что не верит в науку. В ответ я спросила, не поднималась ли она случайно на одиннадцатый этаж, где проходила вечеринка, на лифте? Работает ли ее сотовый телефон? Как она сумела получить электронное приглашение на вечеринку?

Многие до сих пор считают, что относиться к фактам или логическим выводам слишком серьезно просто неприлично или по крайней мере странно. Одним из источников антиинтеллектуалистичных или антинаучных настроений может быть обычное раздражение по отношению к человеку, который чувствует себя достаточно сильным, чтобы перевернуть землю. Те, кто чувствует в глубине души, что мы не имеем права принимать этот громадный интеллектуальный вызов, считают все это владением высших сил, недоступных человеку. Это не до конца понятное, направленное против собственного «я» и прогресса мнение можно до сих пор слышать на спортплощадках и в загородных клубах.

Для некоторых мысль о том, что человек способен разгадать все загадки мира, служит источником оптимизма и порождает чувство причастности и понимания. Но остальные воспринимают науку и известных ученых, которые больше знают и больше умеют в соответствующих технических областях, исключительно со страхом. Люди делятся на тех, кто способен заниматься научной

деятельностью и оценивать научные выводы, и тех, кто чувствует полную беспомощность перед лицом научной мысли.

Люди в большинстве своем стремятся ощущать себя сильными и вооруженными знанием. Вот вопрос, который рано или поздно задает себе каждый: с чем именно — с наукой или с религией — можно почувствовать контроль над окружающим миром? Где можно найти надежность, покой и понимание? Предпочитаете ли вы верить, что сами можете проникнуть в тайны природы, или по крайней мере в то, что на это способны ученые? Люди жаждут ответов и прямого руководства, которые наука не всегда может предложить.

Тем не менее наука уже многое узнала о том, как устроена и как работает Вселенная. Если сложить воедино все, что нам известно, то кусочки головоломки, которые ученые постепенно добывали на протяжении столетий, чудесно соединятся и сольются в цельную картину. Научные теории позволяют делать верные предсказания. Поэтому некоторые из нас верят в авторитет науки, а многие признают замечательные уроки, ей преподанные.

Мы непрерывно продвигаемся вперед, расширяя разведанные территории и исследуя районы, к которым у нас нет непосредственного доступа. До сих пор не получено никаких данных, которые заставили бы нас вернуться к представлениям о центральном месте человека в общей картине мира. По мере того как мы осознаем себя принадлежащими всего лишь к одному из множества аналогичных объектов случайного размера в случайном месте — в том, что пока представляется — с научной точки зрения — случайно развивающейся Вселенной, — революция Коперника повторяется вновь и вновь.

Неуемное любопытство и стремление развиваться ради удовлетворения жажды информации действительно делают человека совершенно особым существом. Мы — единственный биологический вид, способный задавать вопросы и систематически работать ради получения ответов. Мы ставим вопросы, взаимодействуем между собой, делимся информацией, строим гипотезы, создаем модели — и в конце концов обогащаем свои представления о Вселенной и о месте человека в ней.

Все сказанное не означает, что наука непременно найдет ответы на все вопросы. Те, кто считает, что наука рано или поздно решит все проблемы человечества, тоже, вероятно, ошибаются. Но это означает, что занятия наукой были и остаются достойным и стоящим занятием. Мы не знаем пока всех ответов. Но люди, склонные к научным занятиям, — не важно, религиозны они или нет — жаждут исследовать Вселенную и отыскать их. В части II мы посмотрим, чего они уже добились и что теперь виднётся на горизонте.

Часть II

МАСШТАБИРОВАНИЕ ВЕЩЕСТВА

ГЛАВА 5

ВОЛШЕБНАЯ ЭКСКУРСИЯ В ГЛУБЬ МАТЕРИИ

Известно, что 2500 лет назад древнегреческий философ Демокрит объявил о существовании атомов и тем самым сделал шаг в правильном направлении, однако ни тогда, ни много позже никто не мог точно сказать, какими на самом деле окажутся элементарные частицы вещества. Некоторые из физических теорий, описывающих сверхмалые расстояния, настолько парадоксальны, что даже самые творческие и открытые всему новому люди не смогли бы их принять, если бы не данные экспериментов. С появлением технологий, позволяющих заглянуть на атомный уровень, ученые обнаружили, что внутренняя структура вещества то и дело обманывает ожидания. Детали головоломки складывались поистине волшебным образом.

Человек так устроен, что ему очень трудно представить себе наглядно все, что происходит на тех крошечных масштабах, которые сегодня изучает физика элементарных частиц. «Кирпичики», из которых складывается то, что мы называем веществом, совершенно не похожи на то, что мы воспринимаем при помощи органов чувств. Эти компоненты подчиняются совершенно иным физическим законам. С уменьшением масштабов меняются свойства вещества — они как будто существуют в другой вселенной.

Много путаницы при попытках понять странную внутреннюю структуру вещества возникает оттого, что набор компонентов, существующих в одном масштабе, совершенно не похож на то,

что обнаруживается в другом; кроме того, много проблем возникает с определением диапазона линейных размеров, в котором применима та или иная теория. Чтобы до конца понять физический мир, нам необходимо не только знать, что в нем существует, но и точно различать размеры и масштабы, описываемые разными теориями.

Позже мы рассмотрим различные масштабы, действующие в космосе — на самой границе непознанного. Эту главу мы начнем с того, что заглянем внутрь вещества; начав с привычных масштабов, заберемся глубоко в недра материи. От повседневных размеров и масштабов до внутреннего пространства атома (царства квантовой механики) и дальше до планковского масштаба; мы посмотрим, что нам известно на сегодняшний день и как все это согласуется. Отправимся же в путь и исследуем то, что удалось за долгие годы открыть ученым.

МАСШТАБЫ ВСЕЛЕННОЙ

Наше путешествие начинается в привычном нам масштабе — том самом, в котором мы живем, пользуемся разными вещами, видим и трогаем их. Неслучайно именно один метр — не одна миллионная его доля и не десять тысяч метров — лучше всего соответствует размеру самого человека. Один метр — это примерно вдвое больше роста младенца и примерно вдвое меньше роста взрослого человека. Согласитесь, было бы странно, если бы базовая единица длины, которой мы пользуемся ежедневно, равнялась длине муравьиной ножки.

Тем не менее стандартная физическая единица, определенная через какого-то конкретного человека, оказалась бы не слишком полезна, потому что измерительная линейка должна иметь длину, известную и понятную каждому*. Поэтому в 1791 г. Французская академия наук установила так называемый стандарт. Метр можно было бы определять либо как длину маятника с полупериодом

* К примеру, единица длины Древней Греции — стадия — не имела фиксированной длины, поскольку в разные времена основывалась на длине различных частей тела человека в разных регионах страны. — *Прим. авт.*

в одну секунду, либо как одну десятиллионную длины одной четверти земного меридиана (квадранта, то есть расстояния от экватора до Северного полюса). Ни одно, ни второе определение не имело непосредственного отношения к человеку. Французы просто пытались найти меру, с которой все согласились бы и которой было бы удобно пользоваться. Сошлись на втором определении, чтобы избежать неопределенностей, связанных с небольшими вариациями силы земного притяжения в разных местах.

Это определение было достаточно произвольным. Оно было придумано, чтобы сделать меру длины — метр — стандартной единицей. Но тот факт, что взята была именно одна десятиллионная часть квадранта, совсем не случаен. Французское определение гарантировало, что метровую палку удобно будет держать в руках.

Если говорить о размерах человека, то рост большинства людей ближе к двум метрам, а не к одному; тем не менее никто из нас не дорос до десяти и даже до трех метров. Метр вполне соответствует человеческому масштабу, и с объектом такого размера удобно иметь дело — если, конечно, это безопасно (к примеру, от метровых крокодилов лучше, наверное, держаться подальше). Мы знаем законы физики, применимые в этом масштабе, потому что каждый день наблюдаем их действие. Наша интуиция основана на постоянном наблюдении за предметами, людьми и животными, размеры которых достаточно удобно выражать в метрах.

Узость и ограниченность рамок, в которых мы чувствуем себя уверенно, иногда забавляют меня. Моя двоюродная сестра дружит с игроком Национальной баскетбольной лиги Джоахимом Ноа, и мы никогда не устаем подшучивать над его ростом. При взгляде на какую-нибудь фотографию или зарубки на дверном косяке, отмечавшие в детстве его рост, нас разбирает смех; так же забавно смотреть, как на площадке он без труда блокирует мяч, брошенный другим, не столь высоким игроком. В общем, Джоаким завораживающе высок. Но если разобраться, то получится, что он всего лишь на 15% выше среднестатистического мужчины. У него немного иные пропорции тела, что в некоторых ситуациях дает механическое преимущество, а в некоторых — мешает. Но кости и мышцы устроены у него, в сущности, на тех же принципах, что и ваши.

Законы движения Ньютона и сегодня безошибочно указывают нам, что произойдет, если приложить определенную силу к определенной массе. Эти законы действуют и в отношении нашего тела, и в отношении мяча, который бросает Джоаким. При помощи этих законов мы можем рассчитать траекторию мяча на баскетбольной площадке на Земле и предсказать орбиту, по которой Меркурий обращается вокруг Солнца. Законы Ньютона говорят нам, что, если на тело не действует какая-нибудь сила, его движение будет продолжаться в том же направлении с той же скоростью, что и изначально. Далее сила, действующая на тело, придаст ему ускорение в соответствии с его массой. Наконец, любое действие вызовет равное по силе и противоположное по направлению противодействие.

Законы Ньютона абсолютно справедливы в привычном человеку диапазоне линейных размеров, скоростей и плотностей. Несоответствия выявляются только на очень малых расстояниях, где меняет правила игры квантовая механика, на очень высоких скоростях, где действует специальная теория относительности, и при громадных плотностях (таких, к примеру, как в черной дыре), где правит бал общая теория относительности.

При обычных расстояниях, скоростях и плотностях действие любой из новых теорий, опровергающих законы Ньютона, слишком слабо, чтобы его можно было обнаружить. Однако с помощью современных технологий можно смоделировать условия, в которых ограничения теории Ньютона проявятся вполне наглядно.

ПУТЕШЕСТВИЕ В ГЛУБЬ

Нам придется копнуть достаточно глубоко, прежде чем мы сможем обнаружить новые физические компоненты и законы. Но следует отметить, что в диапазоне от метра до размера атома тоже происходит немало интересного. Многие объекты, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, обладают важными свойствами, заметить которые можно только при исследовании более мелких систем (некоторые масштабные ориентиры, упоминаемые в данной главе, вы можете увидеть на рис. 13).

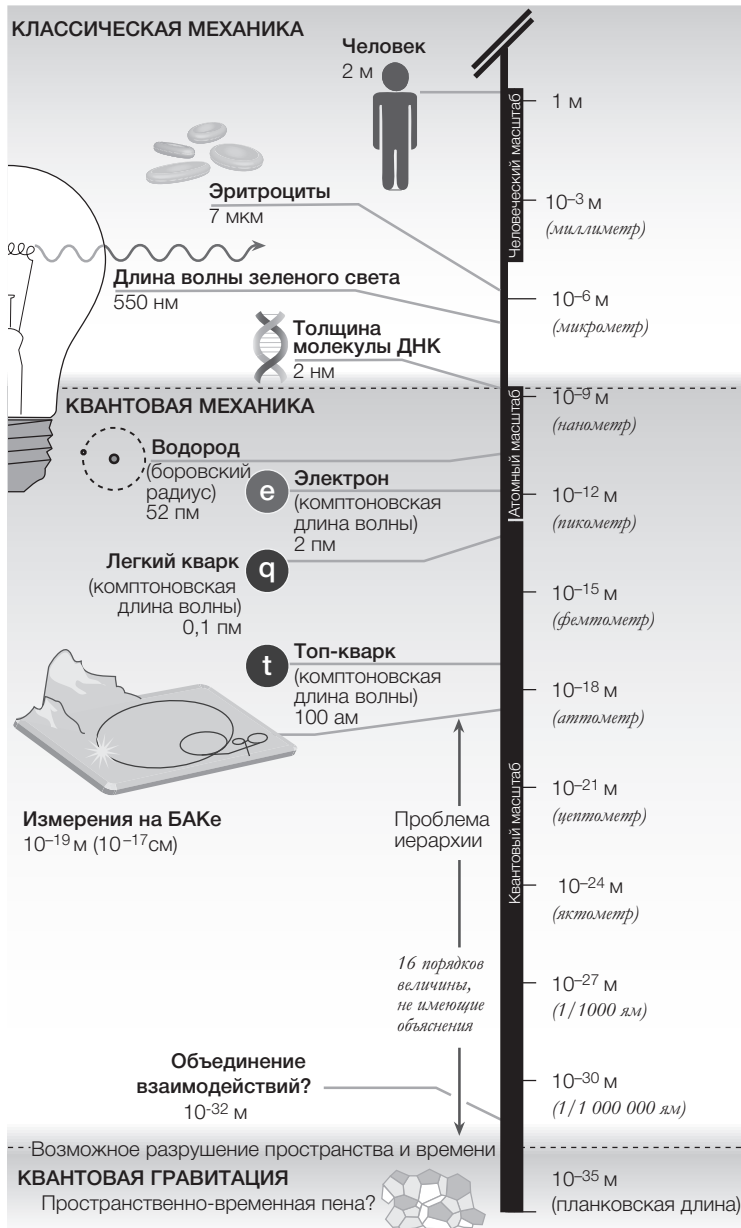


РИС. 13. Обзор мелких масштабов и единиц длины, используемых для их описания

Разумеется, многие объекты, с которыми мы имеем дело, формируются путем простого сложения множества одинаковых фундаментальных элементов, в них нет почти ничего интересного — ни деталей, ни внутренней структуры. Такие *экстенсивные системы* строятся, как кирпичные стены. Можно сделать стену выше или ниже, добавив или убрав несколько кирпичей, но базовая функциональная единица в ней всегда будет одинакова. Высокая стена фактически ничем не отличается от маленькой стенки. В качестве примера можно привести множество крупных систем, которые строятся за счет добавления в них однотипных элементов. Это относится, к примеру, к микросхемам компьютерной памяти, состоящим из большого количества совершенно одинаковых транзисторов.

Другой тип масштабирования, применимый к крупным системам, — это экспоненциальный рост; такой вариант наблюдается в тех случаях, когда поведение системы определяют не столько фундаментальные элементы, сколько связи между ними. Хотя такие системы тоже увеличиваются с добавлением элементарных «кирпичиков», их поведение определяется не просто числом элементов, а количеством связей. Эти связи возникают не только между соседними элементами, как у настоящих кирпичей, они могут протянуться на некоторое расстояние внутри системы к другим элементам. Примерами могут служить нейронные системы, которые состоят из множества синапсов, связывающих клетки при помощи специальных белков, и Интернет, включающий в себя множество связанных между собой компьютеров. Эти системы сами по себе достойны самого тщательного изучения, и некоторые направления физики действительно имеют дело с соответствующим эмерджентным поведением.

Но физика элементарных частиц не занимается сложными многокомпонентными системами. Напротив, она сосредоточена на обнаружении и распознавании элементарных компонентов и физических законов, которым они подчиняются. Физика элементарных частиц занимается базовыми физическими величинами и их взаимодействиями. Эти мельчайшие компоненты, разумеется, значимы для всех типов сложного поведения, в кото-

рое вовлекается множество компонентов. Но наша цель здесь — определить наиболее мелкие базовые компоненты и разобраться в их поведении.

Если говорить о технических и биологических системах, то составные части более крупных систем тоже обладают внутренней структурой. В конце концов, компьютеры построены на микропроцессорах, которые, в свою очередь, построены на транзисторах. А врач, заглядывая внутрь человеческого организма, видит там органы, кровеносные сосуды и все остальное — и все это состоит из клеток и ДНК, которые можно наблюдать только при помощи достаточно сложных приборов. Работа внутренних элементов ничем не напоминает то, что мы наблюдаем на поверхности. С уменьшением размеров элементы, из которых состоят макрообъекты, меняются. Законы, которым эти элементы подчиняются, — тоже.

История изучения человека как организма в некоторых отношениях напоминает историю изучения законов физики; здесь существуют свои масштабы, и их исследование тоже шло от крупного к мелкому. Поэтому, прежде чем обратиться к физике и внешнему миру, давайте отвлечемся ненадолго, подумаем о себе и рассмотрим, как были открыты некоторые — самые известные — аспекты внутреннего устройства человеческого тела.

Возьмем, к примеру, ключицу. По-английски, кстати говоря, эта кость называется «воротниковой» (*collarbone*), потому что при внешнем осмотре действительно напоминает воротник. Но стоило ученым заглянуть внутрь тела человека, и на этой кости обнаружился своеобразный выступ-«ключ», который и дал кости второе название — *clavicle* (от лат. *clavicula* — ключик, втулка).

Точно так же никто не понимал, как устроена у человека система кровообращения, как капилляры соединяют артерии и вены, пока в XVII в. Уильям Гарвей не провел серию педантичных опытов по исследованию сердца и кровеносной сети у животных и человека. Гарвей, хотя и был англичанином, изучал медицину в Университете Падуи. Там он многому научился у своего наставника Иеронима Фабриция, который тоже живо интересовался кровотоком, но неверно интерпретировал роль венозных сосудов и клапанов в них.

Гарвей не просто изменил представления о том, какие объекты задействованы в кровеносной системе, — он показал, что в теле человека есть две системы — артерии и вены, которые по ветвящейся сети доставляют кровь ко все более мелким капиллярам, — но и открыл совершенно новый процесс. Оказалось, что кровь доставляется к клеткам таким образом, какого никто не мог предугадать, пока не всмотрелся внимательно в происходящее. Гарвей обнаружил в теле человека не просто набор различных органов — он обнаружил целую неизвестную систему.

Однако у Гарвея еще не было инструментов, которые позволили бы ему обнаружить капилляры; это удалось сделать только Марчелло Мальпиги в 1661 г. Гарвей же выдвинул несколько гипотез, которые получили экспериментальное подтверждение значительно позже. Хотя Гарвей оставил подробные рисунки, он не мог добиться той детальности, которая стала доступна пользователям микроскопа, например Антони ван Левенгуку.

Система кровообращения человека содержит эритроциты — красные кровяные тельца. Длина этих элементов составляет всего лишь семь микрометров — это одна стотысячная доля длины метровой линейки. Это в сто раз меньше толщины кредитной карты — примерно такой же размер имеют капли тумана. Самые мелкие объекты, которые способен различить невооруженный человеческий глаз, немного меньше толщины человеческого волоса и крупнее эритроцита примерно в десять раз.

Разумеется, кровь и кровообращение — не единственные процессы в человеческом теле, о которых ученым удалось со временем узнать. Кроме того, исследование внутренней структуры тела не ограничивается микронными размерами. После Гарвея были открыты еще более мелкие и совершенно новые элементы и системы как в человеческом организме, так и в неодушевленных физических системах.

Дойдя до размеров в одну десятую микрона — длин, которые примерно в десять миллионов раз меньше длины метровой линейки, — мы обнаруживаем ДНК, фундаментальный строительный элемент любого живого существа, хранящий генетическую информацию. Объекты такого размера все еще в 1000 раз крупнее атома,

но это уже уровень, где важную роль играет молекулярная физика (то есть химия). Молекулярные процессы, протекающие внутри ДНК, до сих пор понятны не до конца; ясно, однако, что они лежат в основе невероятно широкого спектра жизненных форм, завоевавших земной шар. Молекулы ДНК содержат миллионы нуклеотидов, и квантово-механические атомные связи играют на этом уровне очень существенную роль.

Молекулы ДНК также делятся по величине на несколько категорий. Структура ДНК очень сложна, а молекулы так перекручены, что полная длина человеческой ДНК может измеряться метрами. Но ширина двойной цепочки ДНК составляет всего лишь около двух тысячных долей микрона — примерно два нанометра. Это немного меньше самого маленького на сегодняшний день транзисторного ключа в микропроцессоре, размеры которого составляют около 30 нм. Длина одного нуклеотида составляет примерно 0,33 нм; он сравним по размеру с молекулой воды. Средний ген представляет собой цепочку из 1000–100 000 нуклеотидов. Самое информативное и полезное описание гена основано как ответ на совершенно другие вопросы, чем те, которые мы стали бы задавать в отношении единичного нуклеотида. Таким образом, ДНК на разных линейных масштабах работает по-разному, а ученые ищут при этом ответы на разные вопросы и используют разные ее описания.

Биология схожа с физикой в том, что структуры, которые мы видим на крупных масштабах, всегда состоят из более мелких элементов. Но в биологии мало разобраться в отдельных элементах, чтобы понять принципы работы более крупных структур в живых системах. Да и цели у биологии гораздо более амбициозны. Мы считаем, что на самом базовом уровне именно законы физики определяют процессы, протекающие в человеческом теле, но функциональные биологические системы сложны и запутанны, к тому же часто порождают трудно предсказуемые последствия. Распутать структуру из базовых элементов и разобраться в сложнейших механизмах обратных связей необычайно трудно, а комбинаторика генетического кода еще и усложняет эту задачу. Даже если мы узнаем все о базовых элементах, останутся еще эмер-

джентные структуры и эмерджентное же поведение, в которых, по всей видимости, и кроется тайна жизни.

Физики тоже не всегда могут разобраться в процессах, протекающих на более крупных масштабах, при помощи знаний о структуре отдельных «кирпичиков», но физические системы в большинстве своем проще в этом отношении, чем биологические. Хотя структура материи сложна и может иметь совершенно иные свойства, чем составляющие ее элементы, механизмы обратной связи и эволюционные процессы, как правило, не играют здесь столь заметной роли. Для физиков поиск самого простого, самого элементарного компонента представляет собой важную цель.

АТОМНЫЙ МАСШТАБ

Уйдя от механики биосистем и опускаясь глубже по шкале линейных размеров, чтобы разобраться уже в базовых физических элементах, мы остановимся ненадолго на размере атома — около 100 пикометров, что в 10 тысяч миллионов (10^{10}) раз меньше метра. Точный размер атома определить трудно, поскольку в его составе присутствуют электроны, которые циркулируют вокруг ядра, но никогда не застывают на месте. Традиционно, однако, в качестве размера атома указывают среднее расстояние от электрона до ядра.

Говоря о физических процессах, протекающих на этих крошечных расстояниях, нередко прибегают к наглядным изображениям, но необходимо помнить, что все они основаны на аналогиях. У нас нет другого выхода, и для описания непривычных структур, которые ведут себя странно с точки зрения здравого смысла, приходится привлекать описания объектов, с которыми мы сталкиваемся в обычной жизни.

Корректно изобразить внутреннее строение атома невозможно — ведь рассчитывать при этом мы можем лишь на собственные физиологические качества, а именно чувства и двигательные способности, применимые только в человеческом масштабе. Человеческое зрение, к примеру, опирается на явления, которые видимыми делает свет, то есть электромагнитное излучение. Световые

волны — те, что попадают в оптический диапазон — имеют длину волны примерно от 380 до 750 нм. Это намного больше размера атома, который составляет примерно одну десятую нанометра (рис. 14).

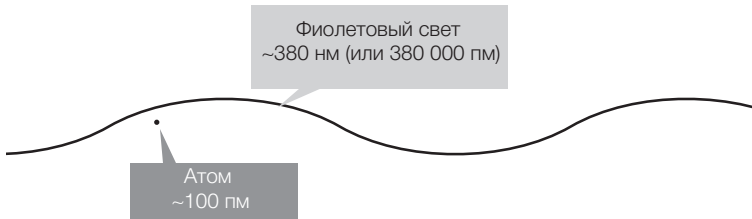


РИС. 14. Отдельный атом — всего лишь крохотная точка по сравнению даже с самой маленькой длиной волны видимого света

Это означает, что исследовать внутреннюю структуру атома при помощи видимого света, пытаясь увидеть его глазами, так же бесполезно, как вдевать нитку в иголку в варежках. Длины волн, о которых идет речь, буквально «размывают» объекты более мелких размеров, и получить с их помощью четкую картинку невозможно, не хватит разрешения. Поэтому, когда мы хотим по-настоящему «увидеть» кварки или даже протон, мы хотим невозможного. У нас просто нет инструмента, который позволил бы точно визуализировать то, что происходит внутри атома.

Но путать способность человека увидеть некие явления и нашу уверенность в том, что эти явления существуют, — серьезная ошибка, которую ученые не могут себе позволить. Тот факт, что мы не только не видим эти явления, но и не имеем их мысленного образа, не означает, что мы не можем логически вычислить физические элементы и процессы, которые имеют место на соответствующих масштабах.

Гипотетически в масштабе атома окружающий мир показался бы нам невероятным, потому что законы физики в этом мире резко отличаются от тех, к которым мы привыкли и которые действуют там, где мы бодро отмеряем расстояния при помощи линеек. Мир атома совершенно не похож на тот образ, что возникает в нашем сознании при мысли о материи (рис. 15).

Части атома

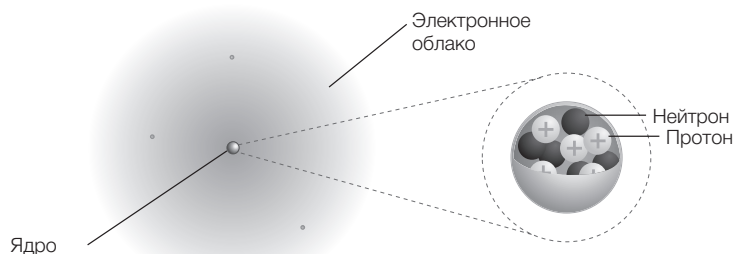


РИС. 15. Атом состоит из электронов, обращающихся вокруг центрального ядра, которое, в свою очередь, состоит из положительно заряженных протонов (заряд каждого из них равен единице) и нейтральных нейтронов (их заряд равен нулю)

Возможно, первое и самое поразительное наблюдение, которое можно было бы сделать в этом масштабе, состояло бы в том, что атом состоит преимущественно из пустого пространства*. Ядро — центр атома — примерно в 10 000 раз меньше по радиусу, чем орбиты электронов. Размер среднего ядра — примерно 10^{-14} м (10 фемтометров). Ядро атома водорода еще примерно в 10 раз меньше. Ядро по сравнению с атомом так же мало, как Солнце по сравнению со всей Солнечной системой. Атом по большей части пуст. Объем ядра составляет всего лишь одну триллионную часть полного объема атома.

Это совсем не то, что мы видим и чувствуем, когда стучимся в дверь или пьем прохладную жидкость через соломинку. Чувства подсказывают нам, что вещество непрерывно. Тем не менее на атомном уровне мы обнаруживаем, что вещество по большей части не содержит ничего «вещественного», просто наши чувства усредняют все, что имеет меньшие размеры; за счет этого вещество кажется нам твердым и непрерывным. На атомном уровне оно совсем не такое.

Почти полная пустота — не единственное, что удивило бы нас при взгляде на вещество в атомном масштабе. В свое время

* Там, конечно, есть электромагнитное поле, но практически нет вещества. — *Прим. авт.*

мир физики был буквально потрясен тем, что на этих крошечных расстояниях нарушаются даже самые фундаментальные основы ньютоновой физики. Понять свойства электронов в атоме невозможно без представления о двух вещах: волновой природе вещества и принципа неопределенности — ключевых элементах квантовой механики. Электроны в атоме вовсе не летают по простым кривым, описывающим конкретные орбиты, изображение которых мы так часто видим. Согласно квантовой механике никто не в состоянии измерить одновременно положение и импульс частицы с бесконечной точностью, а без этого невозможно и проследить точный путь частицы во времени. Принцип неопределенности, выдвинутый Вернером Гейзенбергом в 1926 г., утверждает, что точность, с которой измерены координаты частицы, ограничивает максимальную точность, с которой можно измерить ее импульс*. Если бы электроны двигались по классическим траекториям, мы могли бы в любой момент точно сказать, где находится данный конкретный электрон, а также с какой скоростью и в каком направлении он движется; следовательно, мы могли бы точно сказать, где он будет находиться в любой момент в будущем. Это, однако, противоречит принципу Гейзенберга.

Квантовая механика учит нас, что электроны не занимают в атоме строго определенного положения, как следовало бы из классической картины мира. Вместо этого мы имеем распределение вероятностей, из которого следует, какие у нас шансы в данный момент обнаружить электрон в данном конкретном месте; вероятности — это все, что у нас есть. Мы можем предсказать среднее положение электрона как функцию времени, но любое конкретное измерение подчиняется принципу неопределенности.

Имейте в виду, что эти распределения не произвольны. У электронов может быть далеко не любое распределение энергий или вероятностей. В классической теории не существует внятного способа описать орбиту электрона — ее можно описать только в терминах теории вероятностей. Тем не менее распределение вероятностей — вполне конкретная функция. В квантовой механике

* Величина, на малых скоростях приблизительно равная произведению массы и скорости, а на релятивистских — отношению энергии к скорости света. — *Прим. авт.*

мы можем записать уравнение, описывающее волновое решение для электрона, и это уравнение даст нам вероятность нахождения электрона в конкретной точке пространства.

Еще одно свойство атома, замечательное с точки зрения классической ньютоновой физики, заключается в том, что электроны в атоме могут занимать только фиксированные квантованные энергетические уровни. Орбиты электронов зависят от их энергий, и конкретные энергетические уровни и связанные с ними вероятности должны соответствовать правилам квантовой механики.

Без квантованных уровней электронов невозможно разобраться в атоме. В начале XX в. физики начали понимать, что классические правила придется радикально пересматривать: дело в том, что с точки зрения классической физики электроны, обращающиеся вокруг ядра, нестабильны. По идее они должны были бы излучать энергию и быстро падать на ядро. Такая система не только ничем не напоминала бы атом, но и не допускала бы существование структуры вещества, основанной на стабильных атомах, какими мы их знаем.

Нильс Бор в 1912 г. оказался перед непростым выбором — отказаться от классической физики или отказаться от веры в достоверность наблюдаемых данных. Бор мудро выбрал первый вариант и предположил, что на малых расстояниях, разделяющих электроны в атоме, классические законы неприменимы. Этот вывод стал одним из ключевых факторов, приведших к созданию квантовой физики.

Отказавшись от законов Ньютона, Бор смог постулировать, что электроны в атоме могут занимать только фиксированные энергетические уровни в соответствии с предложенным им условием квантования; условие это было связано с величиной, известной как *орбитальный угловой момент* электрона (он же момент импульса). По Бору, принципу квантования подчинялось все в атомном масштабе. Вообще, в этом масштабе действовали совсем иные правила, нежели те, что применимы в привычном для нас макроскопическом мире и по которым, к примеру, Земля обращается вокруг Солнца.

Технически квантовая механика применима и в макроскопических системах. Но ее действие здесь слишком слабо, чтобы мы

смогли его измерить или хотя бы заметить. Когда вы наблюдаете движение Земли — или, вообще говоря, любого другого макроскопического объекта по орбите, — квантово-механическими эффектами можно пренебречь. В подобных системах они усредняются таким образом, что любое предсказание, сделанное на основе квантовой механики, полностью совпадает с предсказанием, сделанным на базе классической физики. Как уже говорилось в главе 1, для измерений в макроскопическом масштабе классические предположения, как правило, дают чрезвычайно хорошие результаты — настолько хорошие, что заметить действие законов квантовой механики, которые лежат в основе всего этого, невозможно. Проведем следующую аналогию. Текст и изображения на экране компьютера даже с самым хорошим разрешением состоят из точек; точки — аналог квантово-механической атомной структуры. Но нам, как правило, достаточно видеть лишь текст и изображения.

Квантовая механика, безусловно, представляет собой изменение научной парадигмы, однако очевидным оно становится только в атомном масштабе. Несмотря на радикальность предложенной модели, Бору не пришлось отказываться от всего, что было прежде. Он вовсе не считал, что физика Ньютона неверна; он всего лишь предположил, что к электронам в атоме классические законы механики неприменимы. В макроскопическом масштабе вещество состоит из такого количества атомов, что квантовые эффекты выделить невозможно, и в целом оно подчиняется законам Ньютона, по крайней мере на том уровне, на котором можно оценить правильность сделанных на их основе предположений. Ньютоновы законы верны, и мы признаем их справедливость в тех масштабах, где они применимы. Однако на атомном уровне законы Ньютона с неизбежностью отказывают — и отказывают весьма наглядным образом, который и позволил ученым разработать квантовую механику.

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Продолжая наше путешествие по линейке масштабов вниз, в глубину атомного ядра, мы еще не раз увидим новые определения,

новые базовые компоненты и даже новые физические законы, но фундаментальная квантово-механическая парадигма останется нетронутой.

Внутри атома мы первым делом рассмотрим элементы его внутренней структуры с размерами около 10 фемтометров, что соответствует одной стотысячной нанометра. Насколько нам удалось установить на сегодняшний день, электроны действительно фундаментальны, то есть вроде бы не состоят из каких бы то ни было иных, более мелких компонентов. Ядро, с другой стороны, фундаментальным объектом не является. Оно состоит из более мелких элементов, известных как нуклоны, или субъядерные частицы. Нуклоны бывают двух типов: протоны и нейтроны. Протоны обладают положительным электрическим зарядом, а нейтроны электрически нейтральны, то есть не имеют ни положительного, ни отрицательного заряда.

Чтобы разобраться в природе протонов и нейтронов, придется признать, что они тоже не фундаментальны. Великий физик-ядерщик и популяризатор науки Джордж Гамов так обрадовался открытию протонов и нейтронов, что решил, что достигнута окончательная «вторая граница»; он не считал, что возможны еще какие-то субструктуры. Вот его слова:

«Вместо довольно большого числа “неделимых” атомов классической физики мы получили всего лишь три различных сущности: протоны, электроны и нейтроны... Таким образом похоже, что мы действительно достигли дна в поиске базовых элементов, из которых сформировано все вещество».

Оказалось, что ученый немного поторопился. Субструктуры — более мелкие компоненты, чем протон и нейтрон — все же существуют, но обнаружить их было непросто. Должны были появиться технические средства, позволяющие изучать расстояния, меньшие, чем размеры протона и нейтрона; нужны были более высокие энергии или более миниатюрные датчики, чем те, что имелись в распоряжении физиков во времена, когда Гамов сделал свое неточное предсказание.

Если бы мы могли проникнуть в ядро и увидеть нуклоны, размер которых примерно соответствует одному ферми, что при-

мерно в десять раз меньше размеров самого ядра, мы увидели бы также объекты, существование которых внутри нуклонов предсказали Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг. Гелл-Манн назвал эти единицы субструктуры кварками, позаимствовав, по собственному утверждению, это слово из романа Джеймса Джойса «Поминки по Финнегану», где в одном из эпизодов звучит фраза: «Три кварка для мастера Марка!» Нижние и верхние кварки в нуклонах действительно представляют собой фундаментальные объекты меньших размеров (два *верхних* и один *нижний* кварки внутри протона показаны на рис. 16), которые сила, известная как *сильное ядерное взаимодействие*, связывает в протоны и нейтроны. Несмотря на обычное название, сильное взаимодействие представляет собой особую силу природы и дополняет остальные известные типы фундаментальных взаимодействий — электромагнетизм, гравитацию и слабое взаимодействие, о котором мы поговорим позже.

Сильное взаимодействие называется сильным, потому что оно... сильное — это подлинная цитата из объяснения одного из моих коллег-физиков. Звучит глупо, конечно, но на самом деле это правда. Именно поэтому кварки можно обнаружить только в связанном состоянии в таких объектах, как протоны и нейтроны, для которых сильное взаимодействие в целом нейтрализуется. Это взаимодействие настолько сильно, что в отсутствие иных сил компоненты, связанные сильным взаимодействием, невозможно было бы обнаружить отдельно друг от друга.

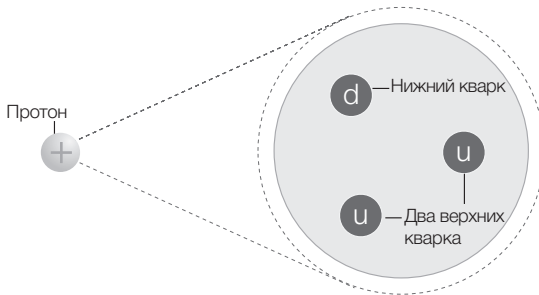


РИС. 16. Заряд протона переносится тремя валентными кварками — двумя верхними и одним нижним

Выделить один-единственный кварк невозможно. Кварки как будто намазаны чем-то особым, которое проявляет свои клеящие свойства на больших расстояниях (поэтому частицы, которые переносят сильное взаимодействие, получили название *глюонов**). Представьте себе эластичную ленту, упругие свойства которой проявляются только тогда, когда ее растягивают. Внутри протона или нейтрона кварки могут свободно двигаться, но попытка удалить один из кварков на сколько-нибудь существенное расстояние потребовала бы дополнительной энергии.

Приведенное описание вполне корректно, но интерпретировать его нужно с осторожностью. Человек, естественно, представляет себе кварки как бы заключенными в мешок, где от внешнего мира их отделяет материальная преграда. Более того, одна из моделей ядерных систем, по существу, рассматривает протоны и нейтроны именно в таком ключе. Однако она, в отличие от других моделей, о которых мы будем говорить позже, вовсе не является гипотезой реальности. Ее единственная цель — производить вычисления в диапазоне расстояний и энергий, где действующие силы так мощны, что обычные методы расчетов неприменимы.

Протоны и нейтроны — не сосиски. У них нет искусственной оболочки, которая удерживала бы кварки внутри. Протон — это стабильный набор из трех кварков, которые удерживает вместе сильное взаимодействие. Благодаря этой силе три легких кварка, по существу, действуют как единый объект — протон или нейтрон.

Еще одно существенное следствие сильного взаимодействия — и квантовой механики — состоит в том, что внутри протона или нейтрона рождаются дополнительные *виртуальные* частицы, которые не живут долго, но в каждый отдельно взятый момент вносят свой энергетический вклад. Массу, а следовательно, и энергию, согласно знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$, в протоне и нейтроне имеют не только сами кварки, но и та сила, что их связывает. Сильное взаимодействие подобно эластичной ленте, которая связывает два мяча и сама по себе содержит энергию. Если

* От англ. glue — клей. — Прим. пер.

«ущипнуть» эту ленту, запасенная в ней энергия позволит родиться новым частицам.

До тех пор пока суммарный заряд новых частиц равняется нулю, этот процесс рождения частиц из энергии в протоне не нарушает никаких известных физических законов. К примеру, положительно заряженный протон при рождении виртуальных частиц не может внезапно превратиться в нейтральный объект.

Это означает, что каждый раз, когда кварк — который сам по себе представляет собой частицу с ненулевым зарядом — рождается, одновременно должен родиться и *антикварк*, то есть частица, по массе идентичная кварку, но с обратным зарядом. Более того, пары «кварк — антикварк» могут как появляться, так и исчезать. К примеру, кварк и антикварк при аннигиляции могут породить фотон (частицу, которая передает электромагнитное взаимодействие), который, в свою очередь, породит новую пару «частица/античастица» (рис. 17). Их суммарный заряд равен нулю, так что ни с рождением, ни с гибелью пары заряд внутри протона не изменится.

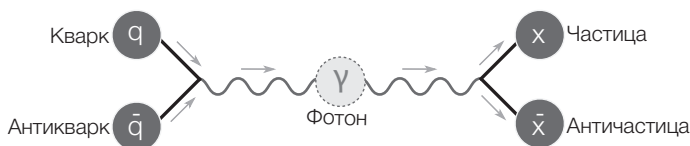


РИС. 17. Достаточно энергичные кварки и антикварки могут аннигилировать с выделением энергии, которая, в свою очередь, создает другие заряженные частицы и соответствующие им античастицы

Помимо кварков и антикварков *протонное море* (это не метафора, а технический термин!), состоящее из возникающих виртуальных частиц, содержит также *глюоны* — частицы, отвечающие за сильное взаимодействие. Они аналогичны фотонам, при обмене которыми между электрически заряженными частицами возникает электромагнитное взаимодействие. Глюоны (их существует восемь различных типов) подобным образом передают сильное взаимодействие. Ими обмениваются частицы, обладающие зарядом, который является объектом сильного взаимодей-

ствия; обмен глюонами связывает кварки воедино или отталкивает их друг от друга.

Однако в отличие от фотонов, которые не имеют электрического заряда и потому не подвергаются непосредственному действию электромагнитных сил, глюоны и сами являются объектом сильного воздействия! В то время как фотоны способны передавать взаимодействие на громадные расстояния — ведь мы можем включить телевизор и увидеть сигнал, переданный в эфир за много километров от нашего дома, — глюоны, как и кварки, не могут уйти далеко, прежде чем взаимодействие осуществится. Глюоны связывают объекты на расстояниях, сравнимых по размеру с протоном.

Если представить себе внешний вид протона и сосредоточиться только на элементах, несущих его заряд, можно сказать, что протон состоит из трех кварков. Это три *валентных* кварка — два верхних и один нижний, — которые вместе формируют его заряд. Однако помимо трех кварков, ответственных за заряд, внутри протона существует целое море виртуальных частиц — пар «кварк — антикварк» и глюонов. Чем подробнее мы будем рассматривать протон, тем больше виртуальных кварк-антикварковых пар и глюонов обнаружим. Их конкретное распределение зависит от энергии, с которой мы будем их зондировать. При тех энергиях, с которыми сегодня можно сталкивать протоны, мы видим, что значительную часть их энергии несут виртуальные глюоны, кварки и антикварки различных типов. Они никак не влияют на электрический заряд частицы, но, как мы увидим позже, важны для корректного предсказания результатов протонных столкновений, когда нам необходимо знать, что находится внутри протона и что конкретно переносит его энергию (более подробно строение протона см. на рис. 18).

Теперь, когда мы дошли до масштаба кварков, удерживаемых вместе сильным взаимодействием, мне бы хотелось рассказать, что происходит на еще более мелких масштабах. Имеет ли кварк внутреннюю структуру? Имеет ли ее электрон? На данный момент у нас нет этому никаких свидетельств. Ни один эксперимент до сих пор не дал никаких подтверждений существования

структур более низкого уровня. В контексте нашего путешествия в глубь вещества кварки и электроны — это конец пути. Пока.

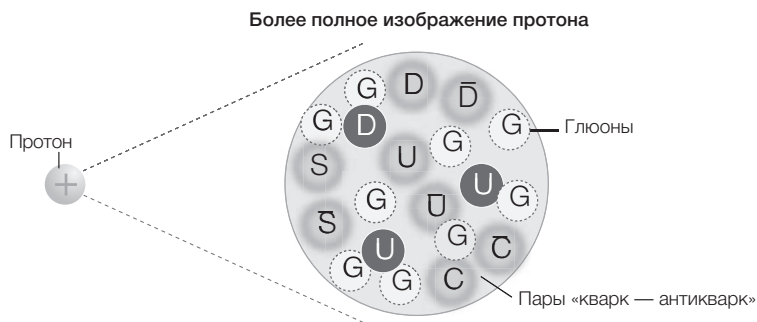


РИС. 18. Большой адронный коллайдер сталкивает высокоэнергетические протоны между собой; каждый из протонов содержит три валентных кварка и множество виртуальных кварков и глюонов, которые тоже могут принимать участие в столкновениях

Однако в настоящее время БАК исследует энергии, более чем в 1000 раз превосходящие, — и соответственно расстояния, в 1000 с лишним раз меньшие, — чем энергии и расстояния, связанные с массой протона. БАК сталкивает между собой два протонных пучка, которые предварительно разгоняет до чрезвычайно высоких энергий — более высоких, чем все, что когда-либо имело место на Земле. Протонные пучки, о которых идет речь, состоят из нескольких тысяч сгустков по 100 млрд тщательно выровненных, или коллимированных, протонов, собранных в крохотные субстанции, циркулирующие по подземному туннелю. Вокруг кольца расположены 1232 сверхпроводящих магнита, назначение которых — удерживать протоны внутри трубы, пока электрические поля разгоняют их до высоких энергий. Другие магниты (392 штуки) переориентируют лучи таким образом, что два луча, вместо того чтобы лететь рядом, сталкиваются.

Затем — здесь-то все и происходит — магниты проводят два протонных луча по кольцу так точно, что они сталкиваются в области, меньшей по размеру, чем толщина человеческого волоса. При столкновении некоторая часть энергии ускоренных протонов

превращается в массу, как гласит знаменитая формула Эйнштейна $E = mc^2$. И при этих столкновениях высвобождается столько энергии, что могут родиться новые невиданные элементарные частицы, более тяжелые, чем все, что нам удавалось получить прежде.

При встрече протонов кварки и глюоны иногда сталкиваются на высоких энергиях в очень ограниченном пространстве — примерно как если бы сталкивались между собой набитые камешками воздушные шарики. БАК сообщает частицам столь высокую энергию, что в случае удачи друг с другом сталкиваются отдельные компоненты встречных протонов. В их числе, разумеется, те самые два верхних и один нижний кварки, которые обеспечивают заряд протона. При этом заметная часть энергии протона достается и виртуальным частицам. Поэтому в БАКе в столкновении участвуют не только три кварка, отвечающие за заряд, но и виртуальное «море» частиц.

Во время этого процесса — и именно здесь кроется ключ ко всей физике элементарных частиц — количество и типы частиц могут измениться. Полученные на БАКе результаты должны многое рассказать нам о самых маленьких расстояниях и размерах. Помимо информации о возможных субструктурах, они должны раскрыть перед нами новые аспекты физических процессов, существенные на этих расстояниях. Энергии, достигаемые на БАКе, представляют собой последний, по крайней мере в обозримом будущем, экспериментальный рубеж в мире сверхмалых масштабов.

ТЕХНОЛОГИИ. ЧТО ДАЛЬШЕ?

Мы закончили вводное путешествие в мир малых расстояний, доступных человеку при нынешнем уровне развития технологий. Однако границы исследовательских возможностей человека не могут ограничивать природу реальности. Пусть сегодня кажется, что нам трудно придумать и изготовить технические средства, позволяющие напрямую исследовать еще более мелкие размеры и расстояния, мы все же можем попытаться сделать некоторые выводы о структуре и взаимодействиях на них при помощи математических аргументов.

Мы признаем, что без экспериментальных данных невозможно точно определить, что существует на тех невообразимо малых масштабах, в которых нам тоже очень хотелось бы разобраться. Тем не менее даже в отсутствие измерений у нас остаются теоретические рассуждения, способные направить наши усилия и подкрепить догадки о том, как вещество и силы природы могут вести себя на еще более мелких масштабах. Мы можем искать на доступных нам масштабах новые возможности — средства и способы, которые помогли бы объяснить и соотнести между собой наблюдаемые явления, даже если их фундаментальные компоненты недоступны для непосредственных наблюдений.

Мы пока еще не знаем, какие из наших теоретических построений окажутся верными. Но даже без непосредственного экспериментального доступа к самым маленьким расстояниям можно сказать точно: то, что нам удалось наблюдать, серьезно ограничивает спектр явлений, которые в принципе могут быть обнаружены — ведь именно фундаментальная теория в итоге должна объяснить все, что мы видим. А значит, экспериментальные результаты даже на более крупных расстояниях ограничивают спектр возможностей и заставляют нас рассуждать в определенных, достаточно конкретных направлениях.

Кое-кто даже предполагает, что между энергиями БАКа и еще более высокими энергиями, действующими на еще более маленьких расстояниях, существует *пустыня*, то есть некий промежуток, практически лишенный значимых расстояний или энергий. Вероятно, подобные теории возникают от недостатка воображения или данных. Но многие ученые считают, что следующие по-настоящему интересные открытия на сверхмалых масштабах должны быть связаны с *унификацией* всех физических взаимодействий на малых расстояниях.

Эта концепция способна расpalить воображение как ученых, так и обычных людей. Согласно такому сценарию мир, который мы видим вокруг, пока не раскрывает нам фундаментальную, очень красивую и простую теорию, лежащую в основе всего на свете, которая охватывает все известные физические взаимодействия (или, по крайней мере, все взаимодействия, кроме гравитации). С того

самого момента, когда ученые впервые поняли, что сил в природе больше, чем одна, множество физиков посвятило свою жизнь поиску единой теории.

Одно из самых интересных рассуждений на эту тему представили Говард Джорджи и Шелдон Глэшоу в 1974 г. Они предположили, что, хотя мы наблюдаем при низких энергиях три негравитационных взаимодействия, в которых фигурируют различные силы (электромагнитные, а также слабые и сильные ядерные), при гораздо более высоких энергиях останется лишь одно взаимодействие, одна сила (рис. 19)*. Эта сила охватывает все три известных типа взаимодействия (сильное, слабое и электромагнитное). Данное теоретическое построение получило название теории великого объединения (GUT — Grand Unified Theory).

Сила взаимодействий Стандартной модели как функция энергии

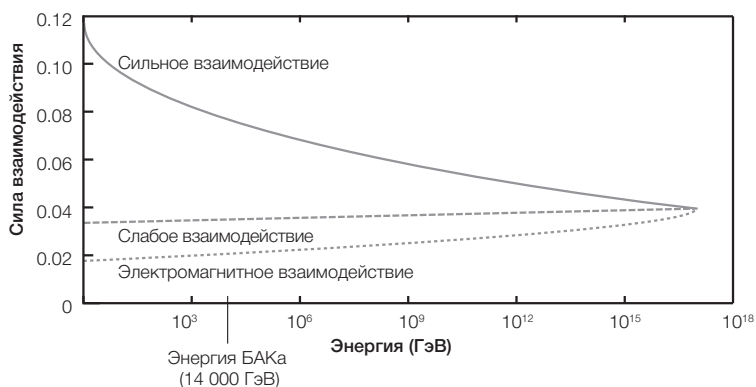


РИС. 19. При высоких энергиях три известных негравитационных взаимодействия могут иметь одинаковую силу, и не исключено, что их можно было бы свести в одно взаимодействие

Возможность того, что силы всех трех взаимодействий действительно сходятся в одной точке, представляется не просто кра-

* Обратите внимание, что этот рисунок соответствует более точной версии объединения, чем первоначальный вариант Джорджи и Глэшоу, в котором линии сходились почти, но не совсем. Несовершенство теории удалось показать позже, когда появились более точные данные об интенсивности взаимодействий. — Прим. авт.

сивой гипотезой. Расчеты с использованием квантовой механики и специальной теории относительности указывают: дело, вполне возможно, обстоит именно так*. Однако энергетический диапазон, в котором это происходит, намного превышает все те энергии, которые мы можем изучать в своих экспериментах на коллайдере. Расстояния, на которых согласно расчетам должно «работать» единое взаимодействие, составляют порядка 10^{-30} см. Но, несмотря на то что подобные расстояния выходят далеко за пределы наших возможностей по непосредственному наблюдению, мы можем подумать о том, какие косвенные следствия унификации взаимодействий можно было бы зарегистрировать имеющимися средствами.

Одним из таких явлений мог бы стать распад протона. Согласно теории Джорджи и Глэшоу — а она попутно вводит новые виды взаимодействий между кварками и лептонами — протоны должны самопроизвольно распадаться. Учитывая достаточно специфическую природу этой теории, ученые смогли подсчитать, с какой частотой должен происходить этот распад. До сих пор никому не удалось его наблюдать, что, по идее, исключает вариант теории, предложенный Джорджи и Глэшоу. Это не означает, однако, что теория великого объединения обязательно неверна. Просто в реальности она может оказаться более сложной, чем предполагали эти ученые.

Теория великого объединения наглядно демонстрирует, как можно расширить наши знания за пределами непосредственно наблюдаемых размеров. Пользуясь теоретическими допущениями, мы можем попытаться экстраполировать то, что уже сумели экспериментально проверить, на область пока недоступных прямому измерению энергий. В случае теории великого объединения попытки экспериментально наблюдать распад протона позволили ученым косвенно изучить взаимодействия на расстояниях, выходящих далеко за пределы возможностей непосредственного наблюдения. Эти эксперименты позволили проверить

* Они сближаются, но сегодня мы знаем, что в пределах стандартной модели объединение невозможно. Однако ее можно достичь в модифицированных вариантах стандартной модели, например с привлечением суперсимметрии, о чем пойдет речь в главе 17. — *Прим. авт.*

выдвинутое предположение. Приведенный пример показывает, что иногда нам удастся сделать интересные заключения о свойствах вещества и фундаментальных взаимодействиях и даже придумать способы распространить выводы, основанные на экспериментальных данных, на гораздо более высокие энергии и более общие классы явлений при помощи рассуждений о расстояниях и масштабах, которые на первый взгляд представляются слишком далекими, чтобы принимать их во внимание. Следующая (и последняя) остановка нашего воображаемого путешествия — так называемая *планковская длина*, а именно 10^{-33} см. Чтобы получить некоторое представление о том, насколько реально мала эта величина, представьте, что она настолько же меньше протона, насколько сам протон меньше... ну, к примеру, Род-Айленда. В этом масштабе даже самые фундаментальные наши представления о пространстве и времени, вероятно, окажутся неверными. Мы не представляем даже, как мог бы выглядеть гипотетический эксперимент по исследованию расстояний, меньших, чем планковская длина. Это самый маленький размер, какой мы в принципе можем вообразить.

Тот факт, что мы не можем даже представить эксперимент, при помощи которого можно было бы исследовать планковские расстояния, вполне может оказаться не просто симптомом ограниченности человеческого воображения, техники или даже финансирования. Недоступность расстояний, меньших, чем планковская длина, может оказаться подлинным ограничением, обусловленным законами природы. Как мы убедимся в следующей главе, из законов квантовой механики следует, что для зондирования малых расстояний необходимы высокие энергии. Но стоит энергии, заключенной в небольшом объеме, оказаться слишком большой, как вещество коллапсирует и образуется черная дыра. В этот момент на передний план выходит гравитация. Дополнительная энергия лишь сделает черную дыру еще больше, в чем мы успели уже убедиться на примере ситуаций, в которых влияние законов квантовой механики невелико. Мы не знаем, как вообще можно исследовать расстояние, уступающее планковской длине. Дополнительная энергия здесь не поможет. Вероятно, что на этих

невообразимо крошечных расстояниях традиционные представления о пространстве уже неприменимы.

Мне недавно довелось читать лекцию. После того как я сказала о нынешнем состоянии физики элементарных частиц и наших предположениях о природе дополнительных измерений, кто-то из слушателей процитировал мне мое собственное забытое заявление о возможных ограничениях наших представлений о пространстве-времени. Меня спросили, как можно совместить рассуждения о дополнительных измерениях с мыслью о том, что на каких-то расстояниях пространство-время просто не существует.

Вообще, рассуждения о том, что категории пространства и времени теряют свою актуальность в определенных условиях, относятся лишь к невообразимо малой планковской длине. Поскольку никто до сих пор не видел объектов размером меньше 10^{-17} см, можно сказать, что классическая геометрия на измеримых расстояниях не нарушается. Даже если понятие пространства на расстояниях, сравнимых с планковской длиной, теряет актуальность, не стоит забывать, что речь здесь идет о расстояниях много меньших, чем все, что мы до сих пор исследовали. Здесь нет никакого противоречия, если предположить, что при усреднении на много больших наблюдаемых расстояниях возникает узнаваемая структура. В конце концов, на разных масштабах вещество нередко ведет себя очень по-разному. Эйнштейн говорил о непрерывной геометрии пространства на больших расстояниях. Однако его мысли могут оказаться неверными на малых расстояниях, если, конечно, они пренебрежимо слабо влияют на явления, наблюдаемые на измеримых расстояниях, так что добавление еще нескольких фундаментальных ингредиентов не даст различного эффекта, который мы могли бы зарегистрировать.

Независимо от того, существуют ли на самых малых расстояниях пространство и время, принципиальное свойство планковской длины, о котором сообщают нам уравнения, состоит в том, что гравитация, действие которой на фундаментальные частицы на измеримых расстояниях пренебрежимо мало, становится серьезной силой, сравнимой по интенсивности с остальными

известными нам силами. На планковской длине стандартная формула тяготения, согласно теории относительности Эйнштейна, уже неприменима. В отличие от более крупных расстояний, где мы можем предсказать поведение системы таким образом, чтобы оно хорошо согласовывалось с экспериментальными данными, на этих крохотных расстояниях квантовая механика и теория относительности несостоятельны и применять теории, которым мы обычно пользуемся, невозможно. Мы даже не знаем, как подойти к прогнозированию. Общая теория относительности основана на классической пространственной геометрии. На планковской длине категории пространства и времени из-за квантовых флуктуаций может образовать слишком сложную структуру, к которой уже неприменимы традиционные формулы тяготения.

Чтобы делать какие бы то ни было предсказания о планковских расстояниях, нам необходимо обзавестись новой концептуальной теорией, объединяющей квантовую механику и гравитацию в единую теорию, известную как теория *квантовой гравитации*. Законы природы, наиболее эффективно работающие на планковских расстояниях, должны сильно отличаться от тех, которые уже доказали свою справедливость на доступных нашему наблюдению масштабах. Не исключено, что для понимания планковского масштаба понадобится не менее фундаментальный сдвиг парадигмы, чем переход от классической механики к квантовой. Пусть мы не можем производить измерения на самых крохотных расстояниях, но у нас есть шанс больше узнать о фундаментальной теории гравитации, пространстве и времени при помощи все более сложных теоретических построений.

Самый популярный кандидат на роль «теории всего» — так называемая *теория струн*. Первоначально в ней речь шла о том, что на определенных масштабах фундаментальные частицы заменяются на фундаментальные струны. Сегодня нам известно, что в теории струн помимо собственно струн фигурируют и другие фундаментальные объекты (в главе 17 мы узнаем об этом больше), а ее название иногда заменяют на более широкое (но менее определенное) — М-теория. В настоящее время эта теория — самое многообещающее направление исследований квантовой гравитации.

Однако теория струн ставит перед исследователями громадные концептуальные и математические проблемы. Никто пока не знает, как сформулировать теорию струн, чтобы ответить на все вопросы, с которым должна иметь дело теория квантовой гравитации. Более того, размеры струн порядка 10^{-33} см, скорее всего, неподвластны экспериментам.

Поэтому возникает резонный вопрос: стоит ли тратить время и ресурсы на исследования в области теории струн? Мне очень часто задают этот вопрос. Зачем изучать теорию, из которой вряд ли следует хоть что-нибудь, что можно проверить экспериментально? Некоторые физики считают, что достаточным основанием для этого является математическая и теоретическая непротиворечивость теории. Эти люди надеются повторить успех Эйнштейна, которому удалось разработать общую теорию относительности на основе почти исключительно теоретических и математических построений.

Другим мотивом к изучению теории струн — мотивом, который лично мне представляется очень важным — является то, что она позволяет нам по-новому взглянуть на идеи, следствия из которых могут проявляться и на измеримых расстояниях. Приведем две такие идеи: это *суперсимметрия* и теории *дополнительных измерений*, о которых мы тоже поговорим в главе 17. В физике элементарных частиц эти теории имеют экспериментальные следствия. Более того, если некоторые теории, связанные с дополнительными измерениями, подтвердятся и смогут объяснить явления, наблюдаемые на энергиях БАКа, то можно будет рассчитывать на получение данных по теории струн тоже на гораздо более низких энергиях, чем считается в настоящий момент. Открытие суперсимметрии или дополнительных измерений само по себе не докажет теорию струн, но это будет сильный аргумент в пользу работы над абстрактными идеями, у которых нет прямых экспериментально проверяемых следствий.

ГЛАВА 6

«ВИДЕТЬ» — ЗНАЧИТ ВЕРИТЬ

Ученые смогли определить, из чего состоит вещество, только после того, как появились инструменты, позволившие заглянуть в его глубины. Слово «заглянуть» здесь означает не прямые наблюдения, а методики не прямых исследований, которые используются для зондирования крохотных расстояний, недоступных невооруженному глазу.

Сделать это без труда удастся редко. Тем не менее, несмотря на проблемы и интуитивно непонятные результаты, иногда получаемые в ходе экспериментов, окружающая действительность реальна. Законы природы, даже те, что действуют на крохотных расстояниях, порождают измеримые следствия, до которых рано или поздно добиваются самые изобретательные исследователи. Наши сегодняшние знания о веществе и его взаимодействиях — это квинтэссенция многих лет наблюдений, озарений, инноваций и теоретических разработок, позволяющих нам непротиворечиво объяснить огромное разнообразие экспериментальных результатов. При помощи не прямых наблюдений, начало которым положил несколько веков назад Галилей, физики выяснили, что скрывает вещество в своих глубинах.

Теперь мы поговорим о современном состоянии физики элементарных частиц, о теоретических прорывах и экспериментальных открытиях, которые привели нашу науку к ее нынешнему состоянию. Конечно, рассказ об этом будет похож скорее на сухой список: мне придется перечислить ингредиенты, входящие

в состав вещества, и рассказать, как каждый из них был открыт. Список станет куда интереснее, если не забывать о том, что эти разнообразные ингредиенты на разных масштабах ведут себя очень по-разному. Кресло, в котором вы сидите, в итоге можно разложить на эти элементы, но, для того чтобы разобраться в его подлинной структуре, понадобилась длинная цепочка открытий.

Ричард Фейнман в свое время пошутил, говоря об одной из своих теорий: «Если она вам не нравится, отправляйтесь куда-нибудь в другое место — может быть, в другую Вселенную, где правила проще...» Возможно, некоторые утверждения или предположения, которые кажутся нам истинными, слишком громоздки и невняты. Но человеческое нежелание их принимать, не изменит того факта, что природа устроена именно так — сложно и запутанно.

МАЛЫЕ ДЛИНЫ ВОЛН

Маленькие расстояния кажутся нам непривычными. Мы не можем узнать, что происходит на самых маленьких расстояниях, без специальных крохотных инструментов. Страница (или экран), которую вы сейчас читаете, выглядит совершенно не так, как элементы, из которых состоит ее вещество. Все дело в том, что человеческое зрение по природе своей основано на наблюдении видимого света. Этот свет излучают электроны, находящиеся на орбитах вокруг центров атомов. Как показано на рис. 14, длина волны видимого света не настолько мала, чтобы позволить нам заглянуть внутрь ядра.

Нам нужно быть умнее — или смелее — и определить, что происходит в атоме на крохотных расстояниях, сравнимых с размером ядра. Для этого необходимо излучение с гораздо меньшей длиной волны, чем у видимого света. Поверить в это, пожалуй, нетрудно. Представьте себе воображаемую волну, длина которой равна размеру Вселенной. С чем бы эта волна ни взаимодействовала, информации от этого взаимодействия не хватит, чтобы обнаружить в пространстве хоть что-нибудь. Если в этой волне не будет более коротких колебаний, у нас не будет возможности определить — одной только гигантской волной никак не обойтись, — что какой-то опре-

деленный объект находится в каком-то определенном месте. Это как если накрыть кучу вещей мелкой сетью и спросить, где в этой куче находится ваш бумажник. Вы не сможете его отыскать без инструмента с достаточным разрешением, который позволил бы заглянуть внутрь кучи и различить там более мелкие вещи.

Если имеешь дело с волнами, нужно, чтобы их гребни и впадины располагались на правильном расстоянии, примерно соответствующем размеру объекта, который ученые пытаются рассмотреть. Волна в этом смысле подобна сети, размер ячейки которой соответствует длине волны. Если известно только, что в сети что-то есть, это «что-то» гарантированно находится в пределах области, по размерам соответствующей размерам сети. Чтобы узнать о положении объекта точнее, потребуется либо сеть с меньшими ячейками, либо другой способ поиска неоднородностей в более мелком масштабе.

Квантовая механика говорит нам, что по характеристикам волны можно судить о вероятности обнаружения частицы в конкретной точке пространства. Волны, о которых идет речь, могут быть обычными световыми волнами, а могут оказаться теми, которые несет в себе каждая отдельная частица. Длина такой волны говорит нам о том, на какое минимальное разрешение мы можем рассчитывать, если будем зондировать малые расстояния с помощью частицы или излучения.

Квантовая механика также утверждает, что короткие волны требуют высоких энергий. Дело в том, что с энергией связана частота, и волны самой высокой частоты — с самой короткой, соответственно, длиной — несут в себе максимальную энергию. Таким образом, квантовая механика связывает высокие энергии и малые расстояния и подсказывает нам, что только эксперименты, оперирующие высокими энергиями, могут помочь ученым проникнуть в тайны внутреннего устройства вещества. Именно по этой принципиальной причине для зондирования самой сердцевины вещества и его фундаментального строения нам необходимы устройства, способные разгонять частицы до высоких энергий.

О том, что высокие энергии позволяют исследовать крохотные расстояния и взаимодействия на этих расстояниях, говорят и квантово-механические волновые соотношения. Чем меньшие

расстояния мы хотим рассмотреть, тем более высокие энергии — и, следовательно, более короткие волны — нам потребуются. Квантово-механический принцип неопределенности, утверждающий, что малые расстояния связаны с большими импульсами, получает дополнение в лице специальной теории относительности, которая устанавливает связь между энергией, массой и импульсом и делает эту связь более отчетливой.

Ко всему прочему, Эйнштейн научил нас, что энергия и масса взаимозаменяемы и могут превращаться друг в друга. Так, при столкновении частиц их масса может обернуться энергией, поэтому чем выше энергия, тем более тяжелые материальные частицы могут быть получены, так как $E = mc^2$. Это уравнение означает, что высокая энергия — E — делает возможным создание более тяжелых частиц с большей массой — m . И эта энергия носит всеобщий характер, из нее может возникнуть частица любого типа, если только она кинематически возможна (иначе говоря, достаточно легка).

Таким образом, высокие энергии, исследованием которых мы занимаемся в настоящее время, — это мостик к меньшим расстояниям и размерам, а возникающие в ходе эксперимента частицы — ключ к пониманию фундаментальных законов природы, действующих на этих расстояниях. Любые новые частицы и взаимодействия, проявляющиеся на малых расстояниях, могут стать ключом к пониманию основы так называемой Стандартной модели элементарных частиц — наших нынешних представлений о самых базовых, самых фундаментальных структурных элементах вещества и их взаимодействиях. Теперь давайте рассмотрим некоторые ключевые открытия, связанные со Стандартной моделью, и методы, которые используют сегодня ученые, чтобы еще немного продвинуться в этом направлении.

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И КВАРКОВ

Все объекты в атоме — электроны, обращающиеся вокруг ядра, и кварки, удерживаемые глюонами внутри протонов и нейтронов — были экспериментально обнаружены учеными при помощи миниатюрных «зондов» с высокими энергиями. Мы уже видели,

что электроны в атоме привязаны к ядру силой притяжения противоположных электрических зарядов. Благодаря этой силе энергия системы в целом — атома — оказывается ниже, чем суммарная энергия отдельных его элементов. Поэтому, для того чтобы выделить и исследовать электроны, кто-то должен передать атому достаточно энергии, чтобы его *ионизировать* — иначе говоря, освободить электроны, оторвав их от ядра. Отдельный электрон для физиков гораздо удобнее: его свойства, такие как заряд и масса, можно исследовать.

Открытие ядра — другой составной части атома — было еще более удивительным событием. Эрнест Резерфорд и его студенты обнаружили ядро в ходе опытов, аналогичных сегодняшним экспериментам с элементарными частицами. Они обстреливали ядрами гелия (которые тогда называли альфа-частицами, потому что о существовании у атомов ядер еще ничего не было известно) тонкую золотую фольгу. Энергия альфа-частиц оказалась достаточной, чтобы Резерфорд смог выявить некие структуры внутри ядра. Он обнаружил, что альфа-частицы, которыми они обстреливали фольгу, иногда отклонялись на значительно больший угол, чем рассчитывали ученые (рис. 20). Они ожидали, что частицы будут равномерно рассеиваться, а вместо этого обнаружили, что некоторые из них отлетают от фольги, будто рикошетируют от заключенных внутри тяжелых шариков. Сам Резерфорд описывал это так:

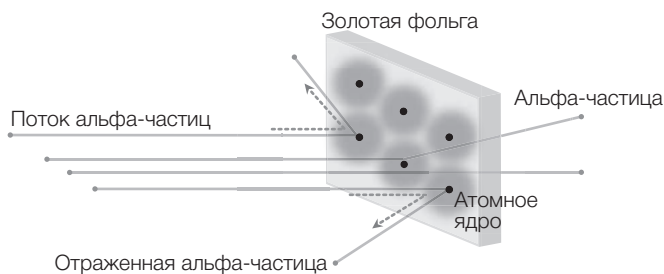


РИС. 20. В эксперименте Резерфорда альфа-частицы (которые, как нам сегодня известно, представляют собой ядра гелия) рассеиваются на золотой фольге. Неожиданно большой угол отражения некоторых альфа-частиц продемонстрировал существование в центре атома концентрированной массы — атомного ядра

«Это было самое невероятное событие из всех, с какими я сталкивался в жизни. Это было почти столь же невероятно, как если бы вы стреляли 15-дюймовым снарядом по листу папиросной бумаги, а снаряд отскочил бы и попал рикошетом в вас самих. После, как следует поразмыслив, я пришел к выводу, что такое отражение должно быть результатом одного-единственного столкновения; я провел расчеты и убедился, что невозможно получить реакцию такой силы, если не взять систему, в которой большая часть массы атома сконцентрирована в крохотном ядре. Именно тогда у меня появилась мысль об атоме с маленьким массивным центром, несущим электрический заряд».

При экспериментальном обнаружении кварков внутри протонов и нейтронов также использовались методы, во многом аналогичные методам Резерфорда, но энергии для этого потребовались намного большие, чем были у его альфа-частиц. Требовался ускоритель частиц. Он должен был придавать электронам — и излучаемым ими фотонам — достаточно высокие энергии.

Первый кольцевой ускоритель элементарных частиц получил название циклотрон, поскольку частицы в нем, ускоряясь, двигались по окружности. Первый циклотрон построил в 1932 г. Эрнест Лоуренс в Университете Калифорнии. Это был очень маленький (около 30 см в диаметре) и слабый по современным стандартам циклотрон. Энергии, которые он позволял получать, даже близко не подходили к уровню, необходимому для обнаружения кварков. Это знаменательное открытие стало возможным лишь после многочисленных усовершенствований конструкции ускорителей; в ходе которых, кстати говоря, было сделано несколько важных открытий.

Задолго до того, как появилась возможность исследовать кварки и внутреннюю структуру атомного ядра, в 1959 г., Эмилио Сегре и Оуэн Чемберлен получили Нобелевскую премию за открытие антипротона (в 1955 г. на бэватроне Лаборатории имени Лоуренса в Беркли). Бэватрон — ускоритель более сложный, чем циклотрон — уже мог доводить энергию протонов до уровня, соответствующего шестикратной массе покоя; этого более чем достаточно для создания пар «протон — антипротон». Протонным

пучком на бэватроне бомбардировали различные мишени и (согласно все той же волшебной формуле $E = mc^2$) получили невиданные прежде разновидности вещества, в том числе антипротоны и антинейтроны.

Вообще, антивещество играет в физике элементарных частиц очень существенную роль, поэтому давайте отвлечемся ненадолго и поговорим об этом замечательном явлении — своеобразном двойнике того вещества, которое мы наблюдаем вокруг. Поскольку заряд любой частицы и соответствующей ей античастицы в сумме дает нуль, вещество при встрече с антивеществом может аннигилировать, то есть взаимно уничтожаться. К примеру, антипротон — одна из форм антивещества — может сливаться с протоном с образованием чистой энергии согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$.

Британский физик Поль Дирак «открыл» антивещество математически в 1927 г. при попытке отыскать уравнение, которое описывало бы электрон. Единственное уравнение, соответствующее всем известным принципам симметрии, которое ему удалось записать, подразумевало существование частицы с той же массой, что у электрона, но с противоположным зарядом, — частицы, которой до того момента никто никогда не видел.

Дирак в конце концов капитулировал перед уравнением и признал, что эта загадочная частица должна существовать. Американский физик Карл Андерсон открыл позитрон в 1932 г., подтвердив тем самым утверждение Дирака, который сказал как-то, что «уравнение оказалось умнее меня». Антипротоны — частицы гораздо более тяжелые — были открыты на 20 с лишним лет позже.

Открытие антипротона было важно еще и потому (помимо доказательства существования самой частицы), что наглядно продемонстрировало *симметрию* вещества и антивещества в природе, которая играет в физическом устройстве нашей Вселенной принципиальную роль. Однако мир наш состоит из вещества, а не из антивещества, и большая часть массы обычного вещества заключена в протонах и нейтронах, а не в соответствующих им античастицах. Для существования нашего человеческого мира — такого, каким мы его знаем, — в количестве вещества и антивеще-

ства необходима *асимметрия*, однако пока нам неизвестно, каким образом она возникла.

ОТКРЫТИЕ КВАРКОВ

С 1967 по 1973 г. Джером Фридман, Генри Кендалл и Ричард Тейлор провели серию экспериментов, которые помогли установить существование кварков внутри протонов и нейтронов. Эксперименты проводились на линейном ускорителе, который, в отличие от прежних бэватронов и циклотронов, ускорял электроны на прямой траектории. Лаборатория в Пало-Альто получила название Стэнфордский линейный ускоритель, или сокращенно SLAC. Электроны, разогнанные на SLAC, начинали излучать фотоны. Эти энергичные — а значит, коротковолновые — фотоны взаимодействовали с кварками внутри атомных ядер. Фридман, Кендалл и Тейлор измерили, как меняется частота взаимодействий с ростом энергии столкновения. Если бы у частиц в атомном ядре не было внутренней структуры, эта частота падала бы. При наличии структуры частота тоже падала, но значительно медленнее. Как и в опыте Резерфорда, приведшем много лет назад к открытию атомного ядра, налетающие частицы (в данном случае фотоны) рассеивались иначе, чем это происходило бы, если бы протон представлял собой просто шарик без внутренней структуры.

Тем не менее даже в экспериментах, проводившихся на необходимом энергетическом уровне, распознать и классифицировать кварки оказалось непросто. Для этого и технологии, и теория должны были достичь такой стадии развития, на которой экспериментальные движения частиц можно было предсказать и понять. Глубокие эксперименты и теоретический анализ, проведенный физиками-теоретиками Джеймсом Бьеркеном и Ричардом Фейнманом, показали, что частота взаимодействий хорошо согласуется с предположением о существовании внутри атомного ядра некой структуры; таким образом было доказано наличие внутренних элементов протонов и нейтронов, то есть кварков. В 1990 г. за это открытие Фридман, Кендалл и Тейлор были удостоены Нобелевской премии.

Никто не мог надеяться на то, что кварки и их свойства можно будет увидеть собственными глазами. В этой области реально применимы только непрямые методы исследований. Тем не менее измерения подтвердили существование кварков. То, что предсказания и измеряемые характеристики хорошо согласуются между собой, а также вполне наглядная гипотеза о кварках говорили в пользу их существования.

Со временем физикам и инженерам удалось создать новые, усовершенствованные типы ускорителей, способные разгонять частицы до все более высоких энергий. Чем совершеннее становились ускорители, тем более высокоэнергетические частицы можно было использовать для зондирования структуры вещества — и, соответственно, тем меньшие расстояния исследовать. Открытия, сделанные в этот период, помогли разработать Стандартную модель — ее элементы обнаруживались один за другим.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С НЕПОДВИЖНОЙ МИШЕНЬЮ ИЛИ КОЛЛАЙДЕРЫ?

Эксперименты, аналогичные тем, благодаря которым были открыты кварки, где пучок ускоренных электронов направляется на закрепленный образец вещества, называются экспериментами с *неподвижной мишенью*. В них один пучок ускоренных электронов направляется на вещество, которое играет роль своеобразной неподвижной мишени.

В современных ускорителях, работающих со сверхвысокими энергиями, все иначе. В них происходят столкновения двух потоков частиц, причем оба потока предварительно разгоняются до высоких энергий (рис. 21). Несложно догадаться, что пучки при этом должны быть точно сфокусированы и направлены в одну и ту же крошечную область — только так можно обеспечить какие бы то ни было столкновения. Это значительно уменьшает число получаемых столкновений, поскольку вероятность того, что частица в пучке взаимодействует с чем-нибудь во фрагменте вещества, намного больше вероятности ее взаимодействия с частицей во встречном пучке.

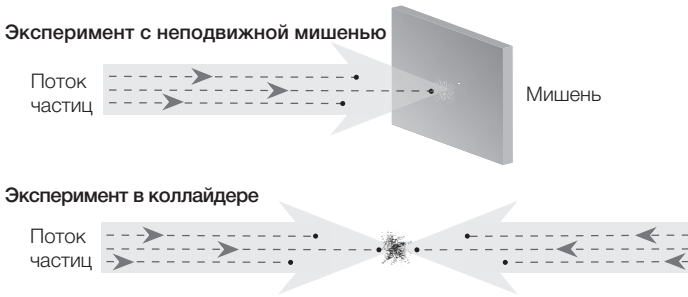


РИС. 21. В одних ускорителях элементарных частиц пучок частиц взаимодействует с неподвижной мишенью. В других — два пучка частиц сталкиваются друг с другом

Однако столкновение двух пучков имеет одно серьезное преимущество. При таких столкновениях можно получить гораздо более высокие энергии. Уже Эйнштейн мог бы объяснить, почему современные ученые однозначно предпочитают коллайдеры экспериментам с неподвижной мишенью. Это связано с понятием «*инвариантная масса системы*». Хотя сегодня даже ребенок знает, что Эйнштейн создал теорию относительности, сам ученый считал, что более подходящим названием для нее было бы теория инвариантов. Подлинной целью его исследований было найти способ, при помощи которого можно было бы уйти от влияния конкретной системы отсчета, то есть найти инвариантные величины, характеризующие систему.

Вероятно, вы больше знакомы с этой идеей на примере пространственных характеристик, таких как линейный размер. Линейный размер неподвижного объекта не зависит от того, как именно он ориентирован в пространстве. Объект имеет фиксированный размер, который никак не связан с вашими наблюдениями, в отличие от его координат, которые зависят от произвольного набора осей и направлений, которые вы выбираете.

Эйнштейн показал, как описать явление, чтобы его характеристики не зависели от ориентации или собственного движения наблюдателя. Инвариантная масса — это мера полной энергии системы. Она говорит о том, объект какой массы может быть в принципе создан из энергии, содержащейся в вашей системе.

Чтобы определить показатель инвариантной массы, можно задать следующий вопрос: если бы ваша система была неподвижна, то есть если бы у нее не было ни скорости, ни импульса, сколько бы энергии она в себе содержала? Если система не имеет импульса, к ней применима формула Эйнштейна $E = mc^2$. Следовательно, если известна энергия системы в покое, известна и ее инвариантная масса. Если система находится не в покое, следует использовать более сложный вариант той же формулы, где помимо энергии фигурирует и величина импульса.

Предположим, мы сталкиваем между собой два пучка элементарных частиц с одинаковой энергией и равными по величине импульсами, направленными в противоположные стороны. При столкновении импульсы пучков складываются и в сумме дают нуль. Это означает, что система в целом находится в покое. Таким образом, вся энергия — сумма энергии частиц в двух отдельных пучках — может быть превращена в массу.

Эксперимент с неподвижной мишенью проходит совсем иначе. Пучок элементарных частиц в нем обладает большим импульсом, а мишень импульса не имеет. Для образования новых частиц доступна не вся энергия частицы, потому что система в целом продолжает двигаться. Из-за этого движения не вся энергия столкновения может быть пущена на создание новых частиц — ведь некоторая ее часть останется в виде связанной с ними кинетической энергии. Оказывается, доступная энергия системы растет пропорционально всего лишь квадратному корню суммарной энергии частиц в пучке и в мишени. Это означает, к примеру, что если бы мы увеличили энергию протонного пучка в 100 раз и столкнули бы такой протон с другим — неподвижным — протоном, то энергия, пригодная для создания новых частиц, увеличилась бы всего в 10 раз.

Значит между столкновением во встречных пучках и столкновением с неподвижной мишенью есть большая разница. Энергия столкновения пучков намного выше — и она отнюдь не вдвое превосходит энергию столкновения пучка с неподвижной мишенью, как вы, вероятно, могли бы подумать. Такая догадка была бы основана на классическом подходе, который не годится для релятивистских частиц в пучке, летящем со скоростью, близкой к ско-

рости света. Разница суммарной энергии между столкновениями пучок — мишень и пучок — пучок намного больше, поскольку на таких скоростях действует теория относительности. Так что если нам нужны по-настоящему высокие энергии, то выбора у нас не остается: придется обращаться к ускорителю-коллайдеру. В нем два пучка элементарных частиц будут разогнаны до высоких энергий, а затем направлены навстречу друг другу.

БАК — типичный пример ускорителя-коллайдера. В нем сталкиваются два пучка элементарных частиц, которые при помощи магнитов направляют навстречу друг другу. Основными параметрами, определяющими возможности любого коллайдера, являются тип частиц, с которыми он работает, их энергия после разгона и *светимость* установки (суммарная интенсивность пучков и, следовательно, число происходящих в ускорителе событий).

ТИПЫ КОЛЛАЙДЕРОВ

Итак, столкновение двух пучков позволяет получить более высокие энергии (а значит, исследовать меньшие расстояния), чем эксперименты с неподвижной мишенью, поэтому мы выбираем коллайдер. Возникает следующий вопрос: что сталкивать? Этот вопрос порождает несколько интересных вариантов, из которых нам предстоит выбрать один. В частности, мы должны решить, какие элементарные частицы следует ускорять, чтобы они могли принять участие в столкновении.

Имеет смысл воспользоваться готовым материалом, легко доступным на Земле. В принципе, мы могли бы сталкивать между собой нестабильные частицы: к примеру, частицы, получившие название *мюонов* (они быстро распадаются на электроны), или тяжелые кварки, такие как *t-кварки* (они распадаются на другие, более легкие виды частиц).

В этом случае нам, прежде чем начать разгон пучков, необходимо было бы получить нужные частицы в лаборатории, поскольку под рукой их нет. Но, даже если бы мы смогли изготовить нужное количество частиц и разогнать их, прежде чем они распадутся, нам бы пришлось еще позаботиться о безопасности и подумать,

как отвести излучение. Ни одно из этих препятствий не является непреодолимым — и особенно это относится к мюонам, возможность использовать которые в пучках в настоящее время исследуется. Ясно, однако, что по сравнению со стабильными частицами нестабильные ставят перед исследователями дополнительные проблемы.

Так что давайте остановимся на более понятном и простом варианте: возьмем стабильные частицы, которые имеются на Земле в любом необходимом количестве и сами по себе не распадаются. В эту категорию попадают легкие частицы или на крайний случай связанные стабильные конфигурации легких частиц, такие как протоны. Кроме того, мы предпочли бы заряженные частицы, которые можно без труда разгонять электрическим полем. Это оставляет нам на выбор протоны и электроны — частицы, которых вокруг полным-полно.

Что же выбрать? У той и другой частицы есть свои сильные и слабые стороны. Электроны хороши тем, что столкновения у них получаются чистые и понятные — в конце концов, это фундаментальные частицы. Когда электрон с чем-то сталкивается, его энергия не расплывается на входящие в его состав субструктуры: насколько нам известно на настоящий момент, электрон дальше уже не делится. А раз сам по себе он не делится, мы можем очень точно проследить за тем, что происходит при его столкновении с иным объектом.

А вот с протонами дело обстоит иначе. Напомню, что протон состоит из трех кварков, связанных сильным взаимодействием; кварки обмениваются глюонами, которые «склеивают» протон воедино, как уже говорилось в главе 5. Когда протон с высокой энергией сталкивается с чем-то, в интересующем нас взаимодействии — том, при котором могут возникнуть тяжелые частицы — обычно участвует только одна из частиц в составе протона, то есть один из кварков или глюонов.

Разумеется, кварку достается далеко не вся энергия протона. Сам протон может обладать очень высокой энергией, но составляющим его кваркам энергии достается гораздо меньше. Тем не менее энергия кварка тоже может быть достаточно высока.

Помимо всего прочего, картина столкновения с участием протонов всегда очень сложная. Дело в том, что остальные части протона хоть и не участвуют в сверхвысокоэнергетическом столкновении, но продолжают лететь рядом и тоже взаимодействуют между собой — а это означает, что вокруг интересующего нас взаимодействия происходит множество других, мешающих увидеть картину.

Казалось бы, при описанных условиях никому не захочется иметь дело с протоном, но на самом деле желающие находятся. Почему? Дело в том, что протон тяжелее электрона; его масса превосходит массу электрона примерно в 2000 раз — а это очень важно, когда пытаешься разогнать протон до высокой энергии. Чтобы передать протону энергию, электрическое поле разгоняет частицу по кругу, и с каждым витком она движется все быстрее. Но движущиеся с ускорением частицы излучают, и чем они легче, тем больше излучение.

Это означает, что как бы нам ни хотелось столкнуть между собой электроны со сверхвысокой энергией, вряд ли это удастся сделать в ближайшее время. Вообще-то, электрон можно разогнать до очень высоких энергий, но такие электроны, разгоняясь по кругу, излучают значительную часть своей энергии в пространство. (Именно поэтому в Лаборатории SLAC в Пало-Альто, где ускоряют электроны, используется *линейный* коллайдер.) Так что протоны все же побеждают в соревновании с точки зрения как чистой энергии, так и исследовательских возможностей. Протоны можно разогнать до достаточно высоких энергий, чтобы их составные части — кварки и глюоны — несли больше энергии, чем ускоренный электрон.

Надо сказать, что оба типа коллайдеров — и протонные, и электронные, — многое рассказали физикам об элементарных частицах. Коллайдеры, оперирующие пучком электронов, не работают с такими высокими энергиями, какие достигаются в лучших протонных ускорителях. Но эксперименты на коллайдерах с электронными пучками позволяют провести более точные измерения; на протонных коллайдерах о такой точности не приходится даже мечтать. В частности, проведенные в 1990-е гг. эксперименты

на SLAC и на Большом электронно-позитронном коллайдере LEP в Европейском центре ядерных исследований помогли проверить предсказания Стандартной модели элементарных частиц с впечатляющей точностью.

Эксперименты, связанные с *точным измерением электро-слабых взаимодействий*, помогли исследовать множество самых разных процессов. К примеру, были измерены массы переносчиков слабого взаимодействия, скорости распада на разные типы частиц, а также явления асимметрии в сигналах регистрируемых передней и задней (по отношению к движению частиц) частями детектора.

Точное измерение электрослабых взаимодействий стало возможным в результате разумного применения эффективной теории. Как только физики смогли провести достаточное количество экспериментов, чтобы точно определить некоторые параметры Стандартной модели (к примеру, силы, задействованные в каждом из фундаментальных взаимодействий), оказалось, что все остальное можно предсказать. Ученые проверяют все экспериментальные данные на непротиворечивость и ищут отклонения, которые могли бы указать на какое-то недостающее звено. До сих пор все известные наблюдения и измерения указывают на то, что Стандартная модель прекрасно работает — настолько хорошо, что мы до сих пор не имеем никаких зацепок, по которым можно было бы судить, что нас ожидает на следующем уровне. Пока ясно одно: что бы это ни было, его влияние при достигнутых на LEP энергиях чрезвычайно слабо.

Из этого можно сделать вывод о том, что получить больше информации о еще более тяжелых частицах и еще более энергичных взаимодействиях невозможно без прямого исследования процессов, протекающих при энергиях, значительно более высоких, чем все, что удалось достичь на LEP и SLAC. В столкновениях электронов попросту не будут получены энергии, нужные, по мнению ученых, для ответа на вопрос о том, что придает частицам массу и почему они обладают именно такой массой, какой обладают, по крайней мере этого не удастся сделать в ближайшем будущем. Для ответа на эти вопросы нужны столкновения протонов.

Вот почему физики решили разгонять в тоннеле, построенном в 1980-е гг. для LEP, протоны, а не электроны. В конце концов Центр вывел LEP из эксплуатации, чтобы дать дорогу новому колоссальному проекту — Большому адронному коллайдеру. Поскольку протоны излучают во много раз меньше энергии, чем электроны, сам процесс разгона проходит гораздо более эффективно, и протоны удастся разогнать до более высоких энергий. При столкновениях протонов, конечно, возникает больше мусора, чем при столкновениях электронов, и перед экспериментаторами встает множество сложнейших проблем, но при работе с пучком протонов появляется шанс задействовать в одном столкновении достаточно высокие энергии и получить прямой ответ на вопрос, который не дает нам покоя уже несколько десятилетий.

Но, прежде чем окончательно решить, какие именно частицы сталкивать в коллайдере, мы должны ответить еще на один вопрос. Итак, в столкновении участвует два пучка. Мы уже решили, что один из пучков должен состоять из протонов. Но из чего должен состоять второй пучок — из тех же частиц (протонов) или из соответствующих античастиц (антипротонов)? Масса протона и антипротона одинакова, поэтому и излучают они при разгоне одинаково, поэтому при выборе между тем и другим следует использовать иные критерии.

Ясно, что протонов в окружающем нас мире гораздо больше, чем антипротонов. Антипротон практически невозможно встретить просто так, случайно, ведь если бы он появился, то тут же аннигилировал бы с одним из многочисленных протонов, превратившись в энергию или другие, более элементарные частицы. Почему же тогда вопрос об использовании антипротонов вообще рассматривается? Какую выгоду мы от них получим?

Ответить на этот вопрос можно просто: немалую. Во-первых, разгонять пучки будет проще, поскольку одно и то же магнитное поле можно использовать для разгона протонов и антипротонов в противоположных направлениях. Но главный аргумент — частицы, которые можно получить при столкновении.

Частицы и античастицы обладают одинаковой массой, но противоположным зарядом. Это означает, что суммарный заряд стал-

кивающих частиц вполне соответствует заряду, который может нести чистая энергия, — а именно нулевому заряду. Согласно формуле $E = mc^2$ это означает, что при столкновении частица и античастица могут целиком превратиться в энергию, которая, в свою очередь, может породить любую другую пару частица — античастица; для этого нужно лишь, чтобы новая пара не была слишком тяжелой и обладала достаточно сильным взаимодействием с первоначальной парой.

Возникшие частицы могут оказаться совершенно новыми и обладать зарядом, отличным от заряда частиц Стандартной модели. У новой пары нет суммарного заряда, как и у первоначальной пары. Поэтому даже если заряды новых частиц будут отличаться от зарядов Стандартной модели, вместе они будут иметь нулевой заряд и — по крайней мере в принципе — смогут возникнуть.

Попробуем рассмотреть с этой точки зрения электроны. При столкновении двух частиц с одинаковыми зарядами, к примеру двух электронов, можно получить только объекты с тем же суммарным зарядом. Могут родиться либо один объект с двойным зарядом, либо два разных объекта, которые, подобно электронам, будут нести на себе единичный заряд. Это несколько ограничивает наши возможности.

Итак, столкновение двух частиц с одинаковым зарядом сильно ограничивает экспериментаторов. С другой стороны, столкновение частицы и античастицы открывает множество новых путей, в противном случае невозможных. При электронно-позитронном столкновении (а именно так работал LEP) возникает гораздо больше потенциальных возможностей, чем при столкновении двух электронов, — ведь и число возможных конечных состояний гораздо больше. К примеру, именно в столкновениях электронов с соответствующими античастицами — позитронами — были наряду с множеством достаточно легких пар частица — античастица получены и тяжелые незаряженные частицы, такие как калибровочный Z-бозон. Хотя за использование античастиц в столкновениях приходится дорого платить — слишком уж сложно их хранить, — выигрыш тоже достаточно велик, особенно в тех случаях,

когда новые частицы, которые мы надеемся обнаружить, обладают не такими зарядами, как исходные.

В последнее время в самых высокоэнергетических коллайдерах ученые использовали один пучок протонов и один пучок антипротонов. Для этого потребовался, конечно, надежный способ получения и хранения антипротонов. Вообще, способ эффективного хранения антипротонов — одно из серьезнейших достижений CERN. Еще до того, как там был создан электронно-позитронный коллайдер LEP, европейская лаборатория работала с высокоэнергетическими пучками протонов и антипротонов.

Самым важным открытием, сделанным в Центре при столкновениях протонов и антипротонов, был электрослабый калибровочный бозон, передающий электрослабое взаимодействие. За это открытие в 1984 г. Карло Руббиа и Симон ван дер Мер получили Нобелевскую премию. Слабое взаимодействие, как и другие виды взаимодействия, передается частицами. В данном случае это *слабые калибровочные бозоны* — положительно и отрицательно заряженные *W-бозоны* и нейтральные *Z-бозоны*; именно эти три частицы отвечают за слабое взаимодействие. Для меня W- и Z-бозоны до сих пор остаются «чертовыми векторными бозонами»; так, помнится, называл их подвыпивший британский физик, который бродил по комнатам, где жили в то время приглашенные физики и студенты-практиканты (в том числе и я). Его очень беспокоило доминирование Америки, и он с нетерпением ждал первого крупного открытия европейских ученых в этой области науки. Калибровочные, или векторные, бозоны W и Z, открытые в начале 1980-х гг. в CERN, экспериментально подтвердили Стандартную модель элементарных частиц, в которой слабое взаимодействие играет принципиальную роль.

Решающую роль в успехе тех экспериментов сыграл новый метод хранения антипротонов, разработанный ван дер Мером. Ясно, что хранение антипротонов — сложная задача, ведь каждая из этих частиц только и ждет встречи с каким-нибудь случайным протоном, с которым можно будет аннигилировать. Метод ван дер Мера, получивший название метода *стохастического охлаждения*, заключается в том, что специальный датчик отслеживает электри-

ческие характеристики сгустка частиц, а корректирующее устройство — так называемый кикер — «дает пинка» тем частицам, которые обладают максимальным импульсом, охлаждая таким образом весь сгусток; частицы в нем начинают двигаться медленнее и уже не могут легко столкнуться со стенками контейнера. Таким способом можно хранить даже антипротоны.

Идея коллайдера, в котором сталкивались бы протоны и антипротоны, рассматривалась не только в Европе. Самым высокоэнергетическим коллайдером такого типа был *Тэватрон* в городке Батавия (штат Иллинойс). В тэватроне удалось достичь энергии 2 ТэВ (что примерно в 2000 раз превышает энергию покоя протона)*. Протоны и антипротоны сталкивались там с образованием новых частиц, которые мы могли затем изучить во всех подробностях. Самым значительным открытием, сделанным на тэватроне, стало открытие *t*-кварка — самой тяжелой и последней по времени обнаружения из частиц Стандартной модели.

Однако БАК отличается и от первого коллайдера CERN, и от тэватрона (обзор различных типов коллайдеров см. на рис. 22). БАК сталкивает не протоны с антипротонами, а два протонных пучка. Причина, по которой ученые предпочли работать с двумя протонными пучками вместо одного пучка протонов и одного — антипротонов, требует дополнительных пояснений. Как мы уже говорили, максимальными потенциальными возможностями обладают те столкновения частиц, при которых суммарный заряд участвующих частиц равен нулю. В этом случае можно получить что угодно плюс соответствующую античастицу (если, конечно, хватит энергии). Если в столкновении участвует два электрона, суммарный заряд того, что получится, должен будет равняться -2 , что, понятно, заранее исключает множество возможностей. Можно подумать, что столкновение двух протонов — столь же неудачная идея. В конце концов, их суммарный заряд равен $+2$, и на первый взгляд кажется, что плюс два ничем не лучше минус двух.

* Физики в области элементарных частиц измеряют энергию в электронвольтах. Энергию в 1 эВ приобретает электрон, ускоряясь в электрическом поле при разности потенциалов в один вольт. В дальнейшем изложении потребуются гига- и тераэлектронвольты: 1 ГэВ = 1 млрд эВ, 1 ТэВ = 1 трлн эВ. — *Прим. авт.*

Если бы протоны были фундаментальными частицами, это был бы совершенно правильный вывод. Однако, как мы уже говорили в главе 5, протоны состоят из более мелких деталей. Протоны содержат кварки, связанные глюонами. Но даже в этом случае, если бы дело ограничивалось тремя *валентными* кварками — двумя верхними и одним нижним, — которые, собственно, несут на себе заряд частицы, дело обстояло бы немногим лучше: никакая пара валентных кварков не дает нулевого суммарного заряда.

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОЛЛАЙДЕРОВ

УСКОРИТЕЛЬ/ГОД ПУСКА/ЛАБОРАТОРИЯ@ МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ	СТАЛКИВАЮЩИЕСЯ ЧАСТИЦЫ	ФОРМА	ЭНЕРГИЯ/РАЗМЕР
Стэнфордский линейный коллайдер/1989/ <i>SLAC@Менло-Парк (Калифорния)</i>	Электрон и позитрон	Линейный 	100 ГэВ/3,2 км
Тэватрон/1983/ <i>Фермилаб@Батавия (Иллинойс)</i>	Протон и антипротон	Кольцевой 	1960 ГэВ/6,3 км
Большой электронно- позитронный коллайдер (LEP/LEP2)*/1989–2000/ <i>CERN@Женева (Швейцария)</i>	Электрон и позитрон	Кольцевой 	90–209 ГэВ/26,6 км
Большой адронный коллайдер (БАК)/2008/ <i>CERN@Женева (Швейцария)</i>	Протон и протон	Кольцевой 	7000–14 000 ГэВ/ 26,6 км

* LEP был модернизирован и превратился в LEP2.

РИС. 22. Сравнительная таблица коллайдеров. Показаны их энергии, что именно сталкивается и форма ускорителя

Однако большая часть массы протона обусловлена не массой содержащихся в нем кварков. Своей массой протон обязан прежде всего энергии связей, удерживающих эту частицу как единое целое. Летящий с высокой скоростью протон несет на себе огромное количество энергии. При этом он помимо трех валентных кварков, ответственных за заряд, содержит целое море кварков, антикварков и глюонов. Это значит, что, если заглянуть внутрь высокоэнергетического протона, там обнаружатся не только три валентных кварка,

но и множество виртуальных кварков, антикварков и глюонов, заряды которых складываются и дают в сумме ноль.

Из сказанного следует, что при рассмотрении протонных столкновений нам следует быть немного более аккуратными в своих логических построениях и выводах, чем когда мы рассуждаем об электронах. Интересные события — результат столкновения субчастиц и заряды в них складываются тех же субчастиц, а вовсе не протонов. Хотя на общий заряд протона «дополнительные» кварки и глюоны не влияют, в его составе они все же присутствуют.

При столкновении протонов может так случиться, что один из трех валентных кварков одного протона столкнется с одним из валентных кварков другого протона, и тогда суммарный заряд частиц, участвующих в столкновении, будет ненулевым. Даже при ненулевом суммарном заряде могут иногда происходить интересные события с участием удачной суммы зарядов, но такое столкновение, конечно, не имеет тех широчайших возможностей, которые характерны для столкновения с нулевым суммарным зарядом.

Однако мы будем наблюдать немало и других интересных столкновений с участием частиц из виртуального моря; здесь вполне возможны ситуации, когда какой-нибудь кварк столкнется с соответствующим антикварком или глюон с глюоном, и тогда столкновение будет иметь нулевой суммарный заряд. При столкновении протонов любой кварк одного из них может столкнуться с соответствующим антикварком из другого, хотя, конечно, это не самый распространенный тип столкновения. Если задаться вопросом, что происходит в БАКе, то окажется, что свою роль в столкновениях протонов играют все возможные процессы, включая и столкновения субчастиц из виртуального моря. Более того, по мере ускорения протонов и, соответственно, повышения их энергии, «морские» столкновения становятся все более вероятными.

Полный заряд протона не определяет, какие частицы образуются при столкновении, потому что остальная часть протона просто улетает дальше. Части протонов, не участвующие в событии, уносят с собой остальную часть заряда частицы, которая затем теряется. Это, кстати говоря, ответ на вопрос падуанского мэра,

который спросил, куда деваются при столкновениях в БАКе заряды протонов. Все дело в составной природе протона и высокой энергии летящих частиц; именно она гарантирует, что в столкновении непосредственно участвуют лишь самые мелкие из известных нам элементов — кварки и глюоны.

Поскольку в столкновении участвуют только части протонов, причем иногда (при столкновениях с нулевым суммарным зарядом) это виртуальные фрагменты, выбор между протон-протонным и протон-антипротонным коллайдерами не так уж очевиден. Если в прошлом в низкоэнергетических коллайдерах имело смысл идти на дополнительные сложности, связанные с производством и хранением антипротонов, чтобы обеспечить как можно большее число интересных событий, то теперь в БАКе все иначе. При тех уровнях энергии, с которыми работаем, на виртуальные кварки, антикварки и глюоны приходится значительная часть энергии протона.

Итак, физики и инженеры проекта БАКа выбрали вариант с двумя пучками протонов и отказались от работы с протонами и антипротонами*. При этом высокая светимость, то есть высокое число событий, становится гораздо более достижимой целью, а получить пучок протонов все же гораздо проще, чем пучок антипротонов такой же плотности.

Так что БАК — протон-протонный, а не протон-антипротонный коллайдер. В нем происходит очень много столкновений (конечно, ведь с двумя протонными пучками добиться этого гораздо проще), и потенциал его огромен!

* Занятно, что сюжет романа «Ангелы и демоны» Дэна Брауна построен на антивеществе, в то время как БАК — первый коллайдер CERN, в котором используется только «обычное» вещество. — *Прим. авт.*

ГЛАВА 7

НА КРАЮ ВСЕЛЕННОЙ

Первого декабря 2009 г. я неохотно проснулась в шесть часов утра в отеле Marriott в Барселоне, чтобы отправиться в аэропорт. Я прилетала в город на испанскую премьеру небольшой оперы о физиках и открытиях, написанную на мое либретто. Уикенд получился просто замечательный, но я очень устала и с нетерпением ждала возвращения домой. Однако меня задержал в пути еще один приятный сюрприз.

Заголовок ведущей новости в свежей газете, которую работники отеля не забыли оставить возле моей двери, звучал так: «Ядерный ускоритель устанавливает рекорд». Да, представьте себе! Главной новостью дня была не какая-нибудь жуткая катастрофа и не забавный случай, а рассказ о том, что пару дней назад ученым удалось получить на Большом адронном коллайдере рекордное значение энергии. Журналист писал о новом достижении БАКа с неподдельным возбуждением.

Еще через пару недель, когда два высокоэнергетических протонных пучка и в самом деле столкнулись, на первой полосе *The New York Times* появилась новостная статья под заголовком «Коллайдер устанавливает рекорд, а Европа принимает у США эстафету лидерства». О рекордной энергии, ставшей темой первой новости, здесь уже говорилось как всего лишь о первом из целой серии рубежей, которых должен достигнуть БАК в ближайшем десятилетии.

В настоящее время на БАКе исследуются самые крохотные расстояния за всю историю человечества. В то же время спутнико-

вые телескопы и обсерватории исследуют крупнейшие расстояния в космосе и разбираются в подробностях реликтового микроволнового фонового излучения, сохранившегося со времен Большого взрыва.

Мы сегодня много знаем о строении Вселенной. Тем не менее, как и в большинстве аналогичных случаев, расширение круга знаний порождает новые вопросы. Некоторые открытия буквально обнажают принципиальные пробелы в наших теоретических построениях. Во многих случаях, однако, мы понимаем природу недостающих звеньев достаточно хорошо, чтобы сознавать, что именно следует искать и как.

Давайте подробнее рассмотрим, какие в настоящий момент ведутся эксперименты и что, согласно нынешним представлениям, мы можем обнаружить с их помощью. В этой главе я расскажу о некоторых главных вопросах и физических исследованиях, которым будет посвящена остальная часть книги.

ЧТО ТАМ, ЗА СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛЬЮ? ПОМОЖЕТ ЛИ БАК ПОЛУЧИТЬ ОТВЕТ НА ЭТОТ ВОПРОС?

Стандартная модель элементарных частиц учит нас делать верные предсказания о легких частицах, из которых все мы состоим. Она также описывает другие, более тяжелые частицы с аналогичными взаимодействиями. Эти тяжелые частицы взаимодействуют с легкими частицами и с атомными ядрами посредством тех же самых взаимодействий, которые действуют на частицы, составляющие наши тела и нашу Солнечную систему.

Физикам известно об электроне и о более тяжелых, но аналогичных заряженных частицах, которые называются *мюон* и *тау-лептон*. Мы знаем, что каждая из этих частиц, известных под общим именем *лептоны*, имеет парную нейтральную частицу (то есть частицу без заряда, которая не участвует непосредственно в электромагнитных взаимодействиях) под названием *нейтрино*; все нейтрино взаимодействуют с другими частицами только посредством силы с прозаическим названием *слабое взаимодействие*. Именно слабым взаимодействием объясняются радиоак-

тивный бета-распад нейтронов с образованием протонов (а также бета-распад атомных ядер в целом) и некоторые ядерные процессы, протекающие в глубинах Солнца. Все вещество Стандартной модели подвержено слабому взаимодействию.

Нам известно также о кварках, обнаруженных внутри протонов и нейтронов. Кварки подвержены как слабому, так и электромагнитному взаимодействию, а также сильному взаимодействию, которое удерживает легкие кварки вместе внутри протонов и нейтронов. Сильное взаимодействие ставит перед нами некоторые вычислительные проблемы, но базовую его структуру мы себе представляем.

Кварки и лептоны вместе с сильным, слабым и электромагнитным типами взаимодействия составляют суть Стандартной модели (рис. 23). До сих пор этих ингредиентов хватало, чтобы успешно предсказывать результаты всех экспериментов с элементарными частицами. Мы очень хорошо понимаем и частицы Стандартной модели, и то, как работают задействованные в ней силы.

Остается, однако, немало серьезных вопросов и загадок.

Основная проблема здесь — как вписывается во всю эту систему гравитация. Это главный вопрос, в котором БАК имеет некоторый шанс разобраться, но который он вовсе не обязательно решит. Энергия БАКа — достаточно высокая как с точки зрения того, что нам прежде удавалось достичь на Земле, так и по отношению к решению некоторых других крупных вопросов из этого списка — слишком низка, чтобы наверняка получить ответы на вопросы, имеющие отношение к квантовой гравитации. Для этого нам пришлось бы изучить те бесконечно малые расстояния, где могут проявиться и квантово-механические, и гравитационные эффекты, а эти расстояния выходят далеко за пределы возможностей проекта БАКа. Если нам повезет и окажется, что гравитация играет существенную роль в проблемах частиц, которыми мы вскоре займемся, то нам будет гораздо проще искать ответ на этот вопрос, а БАК, возможно, станет источником важной информации о гравитации и пространстве. В противном случае экспериментальной проверки любой квантовой теории гравитации, включая и теорию струн, придется, скорее всего, ждать еще долго.

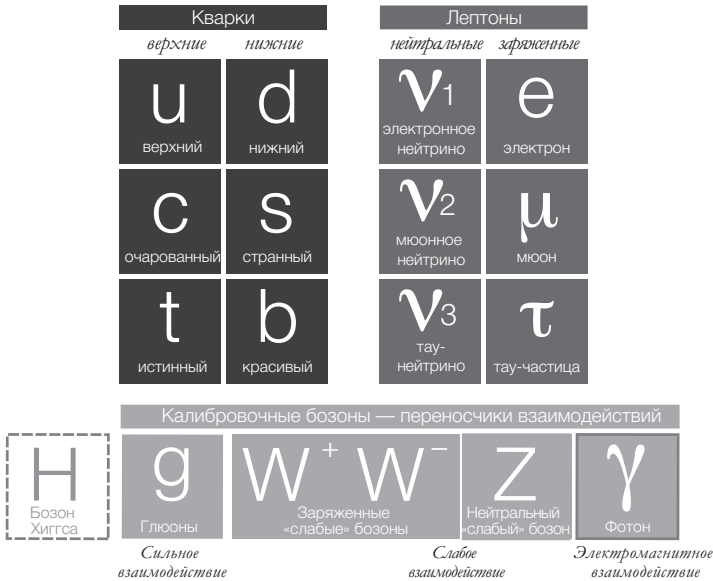


РИС. 23. Элементы Стандартной модели элементарных частиц, описывающей самые фундаментальные из известных элементов вещества и их взаимодействия. Кварки верхнего и нижнего ряда участвуют в сильном, слабом и электромагнитном взаимодействиях. Заряженные лептоны участвуют в слабом и электромагнитном взаимодействиях, тогда как нейтрино участвуют только в слабом взаимодействии. Глюоны, слабые калибровочные бозоны и фотоны передают эти взаимодействия. Бозон Хиггса по состоянию на 2010 г. еще только предстояло обнаружить

Однако отношение гравитационного взаимодействия к другим типам взаимодействий — не единственный серьезный вопрос, на который у нас до сих пор нет ответа. Еще один важный пробел в наших знаниях — причем такой, что БАК, по идее, может его заполнить — это вопрос о том, откуда берутся массы фундаментальных частиц.

Вероятно, на первый взгляд такой вопрос кажется странным (если только вы не читали моей первой книги): ведь мы обычно представляем себе массу как некую данность, изначальное и неотъемлемое свойство частицы. В определенном смысле это правда. Масса — это одно из свойств, определяющих тип частицы

(вместе с зарядом и типами взаимодействий). Любая частица несет ненулевую энергию, но масса — это изначально присущее частице свойство, которое может принимать разные значения, в том числе и нулевое. Одна из главных заслуг Эйнштейна заключается в выводе о том, что масса частицы говорит, сколько энергии имеет эта частица в состоянии покоя. Но частицы не всегда имеют исчезающую массу, а те, что имеют нулевую массу покоя, как фотон, никогда в покое не находятся.

Однако ненулевые массы элементарных частиц, присущие им изначально, — громадная загадка. Ненулевую массу имеют не только кварки и лептоны, но и «слабые» калибровочные бозоны — частицы, передающие слабое взаимодействие. Экспериментаторы сумели измерить эти массы, но согласно простейшим законам физики их просто не должно быть. Предсказания Стандартной модели «работают», если мы просто примем эти массы как данность. Но мы не знаем, откуда они берутся. Ясно, что простейшие законы здесь неприменимы и что в данном случае действуют другие, более сложные правила.

Специалисты по физике элементарных частиц считают, что исчезающие массы возникают только потому, что в самом начале истории нашей Вселенной произошло что-то серьезное и имел место процесс, получивший название *механизма Хиггса* в честь шотландского физика Питера Хиггса, который одним из первых показал, как могли возникнуть эти массы. Аналогичные мысли, правда, высказали тогда по крайней мере шесть авторов, так что иногда можно услышать и о механизме Энглерта — Браута — Хиггса — Гуральника — Хагена — Киббла; я буду в дальнейшем придерживаться варианта с одним именем*. Идея (как бы мы ее ни называли) заключается в том, что имел место фазовый переход (похожий, воз-

* В 1997 г. Европейское физическое общество признало вклад Роберта Браута, Франсуа Энглерта и Питера Хиггса, а в 2004 г. им была присуждена премия Вольфа по физике. В 2010 г. Франсуа Энглерт, Роберт Браут, Питер Хиггс, Джеральд Гуральник, К. Р. Хаген и Том Киббл получили от Американского физического общества премию Сакураи в области теоретической физики частиц. Я буду далее ссылаться только на Хиггса, так как меня интересует физический механизм, а не личности. Конечно, если бозон Хиггса будет открыт, Нобелевскую премию получат не более чем три человека, и вопросы приоритета будут весьма сложными. — *Прим. авт.*

можно, на фазовый переход кипящей воды в газообразный пар)*, изменивший ни много ни мало природу Вселенной. Если в самом начале частицы не имели массы и носились повсюду со скоростью света, то позже — после фазового перехода с участием так называемого поля Хиггса — они уже обладали массой и летали медленнее. Механизм Хиггса говорит о том, как элементарные частицы видоизменились от нулевой массы при отсутствии поля Хиггса к ненулевой массе, которую мы можем измерить экспериментально.

Если физики правы и во Вселенной действительно действует механизм Хиггса, то БАК покажет характерные признаки, которые позволят судить о прошлом Вселенной. В простейшем варианте свидетельством должна стать частица — бозон, названный в честь Хиггса. В более сложных физических теориях, где тем не менее действует указанный механизм, бозон Хиггса может сопровождаться другими частицами примерно той же массы или заменяться какой-то совершенно иной частицей.

Независимо от того, как реализуется механизм Хиггса, мы ждем от БАКа новых интересных открытий. Это может быть бозон Хиггса. Это могут быть свидетельства в пользу другой, более экзотической теории, такой как теория *техноцвета*, о которой мы поговорим позже. Или это может оказаться что-то совершенно неожиданное. Если все пойдет по плану, эксперименты на БАКе помогут установить, что запустило механизм Хиггса. Но вне зависимости от того, что именно будет обнаружено, это открытие сможет рассказать нам немало интересного о том, как частицы обрели массу.

Стандартная модель элементарных частиц, описывающая самые фундаментальные элементы вещества и их взаимодействия, прекрасно работает. Ее предсказания уже не раз подтверждались с высокой точностью. Не обнаруженная пока частица Хиггса — последняя деталь нашей головоломки**. Сегодня мы говорим, что ча-

* В рамках Стандартной модели физики частиц, как она описана в этой книге и где есть только один хиггсовский бозон, в эпоху температур порядка 100 ГэВ в ранней Вселенной имел место фазовый переход другого типа — гладкий кроссовер. — *Прим. науч. консульт.*

** Неясно, должна ли Стандартная модель включать очень тяжелые нейтрино с «правой» киральностью, которые, по-видимому, существуют и играют роль в массе нейтрино. — *Прим. авт.*

стицы обладают массой. Разобравшись в механизме Хиггса, мы узнаем, откуда взялась у частиц масса. Механизм Хиггса, о котором мы поговорим подробнее в главе 16, очень важен для глубокого понимания массы.

В физике элементарных частиц существует еще одна, даже более крупная загадка, в решении которой БАК вполне может сыграть важную роль. Возможно, что эксперименты на коллайдере помогут осветить вопрос, известный как *проблема иерархии в физике элементарных частиц*. Если механизм Хиггса имеет отношение к вопросу о том, почему частицы обладают массой, то проблема иерархии задает другой вопрос: почему эти массы именно таковы?

В физике элементарных частиц считается, что массы возникают из-за так называемого поля Хиггса, которое пронизывает Вселенную; кроме того, считается, что нам известна энергия, при которой произошел переход от частиц, не обладающих массой, к частицам массивным. Дело в том, что механизм Хиггса придает некоторым частицам массу вполне предсказуемым образом, который зависит только от силы слабого взаимодействия и от энергии, при которой происходит переход.

Странность в том, что эта энергия перехода с точки зрения фундаментальной теории представляется бессмысленной. Если сложить все, что мы знаем из квантовой механики и специальной теории относительности и вычислить на основании этих данных массу частиц, то расчетные величины окажутся намного больше тех, что измерены экспериментально. По расчетам на основе квантовой механики и специальной теории относительности массы частиц (если не найдется новой, более подходящей теории) должны быть намного больше — ни много ни мало в 10 квадрильонов, или 10^{16} , раз больше. Теория держится лишь за счет огромной «заплатки», которую физики, ничуть не смущаясь, назвали «тонкой подстройкой».

Проблема иерархии в физике элементарных частиц представляет собой одну из величайших проблем фундаментальной теории вещества. Мы хотим знать, почему массы частиц настолько отличаются от ожидаемых. Из квантово-механических расчетов следует, что их массы должны выходить далеко за пределы *масшта-*

ба слабых взаимодействий, которые, вообще говоря, эти массы определяют. Мы не в состоянии понять масштаб слабых энергий в совсем несложной, казалось бы, версии Стандартной модели, и это очень серьезное препятствие к созданию полной законченной теории.

Существует вероятность, что нынешнюю весьма наивную модель когда-нибудь сменит более интересная, тонкая и точная теория; физикам такая перспектива представляется куда более убедительной, чем разговоры о тонкой настройке теории и, соответственно, научного взгляда на мир. Несмотря на то что решение проблемы иерархии представляется весьма амбициозной задачей, БАК, скорее всего, сможет пролить на нее свет. Квантовая механика и теория относительности задают не только вклад в массу частицы, но и энергию, при которой должны появиться (или, скорее, проявиться) новые явления. В данном случае речь идет как раз о том диапазоне энергий, с которым будет работать БАК.

Ожидается, что именно эксперименты на БАКе помогут появиться новой интересной теории. Этой теории — а она обязательно попытается объяснить загадки, связанные с массами частиц — по идее следовало бы появиться в тот момент, когда будут обнаружены новые частицы, силы или симметрии. Вообще, это одна из самых серьезных загадок, решению которых, как мы надеемся, будут способствовать эксперименты на Женевском коллайдере.

Ответ на этот вопрос интересен и сам по себе, но важно еще и то, что он, возможно, окажется ключом к другим, еще более глубоким тайнам природы. Два наиболее убедительных возможных ответа предполагают либо расширение набора симметрий пространства и времени, либо пересмотр наших представлений о пространстве.

В сценариях, которые будут разъяснены более подробно в главе 17, говорится, что пространство может содержать больше, чем три известных нам измерения. В частности, в нем, возможно, имеются совершенно невидимые измерения, в которых заключен ключ к пониманию свойств и масс элементарных частиц. Если это на самом деле так, то БАК поможет ученым доказать это: в экспериментах на коллайдере будут получены свидетельства

их существования — так называемые частицы Калуцы — Клейна, путешествующие в полном многомерном пространстве-времени.

Пока же ясно одно: какая бы из теорий ни разрешила проблему иерархии, она должна обеспечить экспериментально доступные доказательства тому в масштабе слабых энергий. Цепочка логически безупречных рассуждений свяжет находки, сделанные на БАКе, с теорией, которая в конечном итоге решит проблему иерархии. Эта теория может оказаться одной из уже предложенных или совершенно неожиданной, но, так или иначе, она должна быть убедительной и безумно интересной.

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Не исключено, что помимо вопросов физики элементарных частиц БАК поможет осветить природу *темной материи* (известной также как *скрытая масса*) Вселенной — вещества, которое оказывает гравитационное воздействие, но не излучает и не поглощает свет. Все, что мы видим, — Земля, стул, на котором вы сидите, ваш любимый попугайчик — состоит из частиц Стандартной модели, взаимодействующих со светом. Но видимое вещество, которое взаимодействует со светом и взаимодействие которого с окружающим миром мы понимаем, составляет всего лишь около 4% энергетической плотности Вселенной. Еще около 23% энергии Вселенной заключено в так называемом темной материи, сущность которой остается пока для нас совершенной загадкой.

Темная материя — это на самом деле некое вещество. Это значит, что оно собирается в сгустки под действием гравитационных сил и таким образом (вместе с обычным веществом) вносит свой вклад в существующие во Вселенной структуры, к примеру галактики. Однако в отличие от привычного нам вещества, из которого состоим и мы сами, и звезды в небе, оно не излучает и не поглощает света. Наше зрение основано на восприятии излученного или поглощенного света, поэтому «увидеть» темное вещество очень трудно.

На самом деле термин «темная материя» ошибочен. Так называемая темная материя, в общем-то, вовсе не темная. Все тем-

ное поглощает свет. Там, где свет поглощается, мы видим темные объекты. А вот темная материя не взаимодействует ни с каким светом никаким наблюдаемым образом, и, говоря формально, это «темное» вещество прозрачно. Но я и дальше буду использовать традиционную терминологию и называть эту неуловимую субстанцию «темной».

О том, что темная материя существует, мы можем судить по ее гравитационному воздействию. Но непосредственно мы ее не видим и не можем знать, что она из себя представляет. Состоит ли она из множества крохотных идентичных частиц? Если так, то какова масса такой частицы, как и с чем она взаимодействует?

Не исключено, однако, что в самом ближайшем будущем мы будем знать больше. Возможно, энергии, достигаемой в БАКе, окажется достаточно для получения частиц, из которых состоит темное вещество. Ключевой критерий темного вещества — то, что во Вселенной его содержится ровно столько, сколько нужно для получения измеренных гравитационных эффектов. Следовательно, *реликтовая плотность* — количество запасенной энергии, уцелевшей до наших дней согласно предсказанию наших космологических моделей — должна совпасть с измеренной величиной. Удивительно, но если взять стабильную частицу с массой, соответствующей диапазону слабых энергий, которых будет исследовать БАК (согласно все той же формуле $E = mc^2$), причем такую, которая взаимодействует с другими частицами того же диапазона энергий, то ее реликтовая плотность по приблизительной оценке будет примерно соответствовать характеристикам темного вещества.

Не исключено, таким образом, что БАК не только поможет ученым глубже заглянуть в тайны физики элементарных частиц, но и позволит понять, что происходит сегодня там, во Вселенной, и как это все начиналось. Эти вопросы относятся скорее к сфере космологии — науки, которая изучает эволюцию Вселенной.

Об истории Вселенной, как и об элементарных частицах и их взаимодействиях, мы знаем на удивление много. Но и здесь, как и в физике элементарных частиц, остается немало очень серьезных вопросов. Вот главные среди них. Что такое темное ве-

щество (скрытая масса)? Что представляет собой еще более загадочная сущность, получившая название *темной энергии*? Что было причиной экспоненциального расширения ранней Вселенной, известного как *космологическая инфляция*?

Сегодня великолепное время для наблюдений, которые, возможно, смогут подсказать нам ответы на эти вопросы. На переднем плане науки, на стыке между физикой элементарных частиц и космологией, активно идут исследования скрытой массы, или темного вещества. Считается, что темное вещество взаимодействует с обычным веществом — таким, из которого мы можем изготовить детекторы — чрезвычайно слабо, причем настолько слабо, что мы до сих пор не видели никаких свидетельств существования темного вещества, кроме его гравитационного воздействия.

В основе нынешних поисков, таким образом, лежит принятое на веру утверждение о том, что темное вещество, несмотря на практически полную невидимость, все же взаимодействует слабо (но не невозможно слабо) с известным нам веществом. Считая так, мы не просто принимаем желаемое за действительное. Мы опираемся на уже упоминавшиеся расчеты, которые показывают, что стабильные частицы с энергией взаимодействия, лежащей в диапазоне, который очень скоро будет исследовать БАК, имели бы подходящую плотность, чтобы быть темным веществом. Так что, хотя до сих пор нам не удалось определить состав темного вещества, мы очень надеемся сделать это в ближайшем будущем.

Однако в большинстве своем космологические эксперименты проходят не на ускорителях. Решением космологических проблем мы обязаны в основном другим экспериментам, направленным вовне и проводимым как на Земле, так и в космосе.

К примеру, астрофизики отправили в космос спутники, которые теперь наблюдают за Вселенной оттуда, где им не мешают физические и химические процессы, протекающие на поверхности Земли и над ней, а также пыль. В то же время земные телескопы и эксперименты, проводимые на поверхности планеты, позволяют получать информацию в среде, которую ученые могут непосредственно контролировать в большей степени. Все эти экс-

перименты — и земные, и космические — призваны пролить свет на многие вопросы, связанные с рождением Вселенной.

Мы надеемся, что достаточно мощный сигнал в каком-нибудь из этих экспериментов (подробнее мы поговорим о них в главе 21) позволит нам разгадать загадки темного вещества. Возможно, эти эксперименты расскажут нам о природе темного вещества, осветят проблемы, связанные с его взаимодействием и массой. А пока теоретики продумывают всевозможные модели темного вещества и рассуждают о том, как можно при помощи имеющихся у нас средств и методов определить, что оно собой представляет.

ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Но обычного вещества и темного вещества, даже вместе взятых, недостаточно, чтобы объяснить суммарную энергию Вселенной. Все вещество — и темное, и обычное — составляет здесь всего лишь около 27%. Субстанция, представляющая оставшиеся 73% энергии и еще более загадочная, чем темное вещество, получила название темной энергии.

Открытие темной энергии стало самым крупным событием в физике конца XX в. Конечно, мы многого еще не знаем об эволюции Вселенной, но у нас имеется весьма успешная теория, основанная на представлениях о так называемом Большом взрыве и дополнительном периоде экспоненциального расширения Вселенной, известного как космологическая инфляция.

Эта теория согласуется с широким спектром самых разных наблюдательных данных, включая данные о микроволновом космическом излучении — фоновом излучении, оставшемся со времен Большого взрыва. Первоначально Вселенная представляла собой горячий плотный огненный шар. За 13,75 млрд лет своего существования она успела сильно разредиться и остыть, и температура реликтового излучения на сегодня составляет всего лишь 2,7 К — всего на пару градусов выше абсолютного нуля. Кроме того, в пользу теории Большого взрыва и расширения Вселенной свидетельствуют подробные подсчеты количества ядер, которые были

«изготовлены» на ранних стадиях эволюции Вселенной, и данные о скорости ее расширения.

Фундаментальные уравнения, которыми мы пользуемся при описании эволюции Вселенной, — это уравнения, полученные Эйнштейном в начале XX в. Они говорят о том, как получить характеристики гравитационного поля на основании данных о распределении вещества и энергии. Эти уравнения можно использовать для описания гравитационного поля между Землей и Солнцем, но с тем же успехом они справедливы и по отношению к Вселенной в целом. В любом случае, чтобы вычислить что-то на основании этих уравнений, необходимо знать все о веществе и энергии вокруг нас.

Тот факт, что измеренные параметры Вселенной требуют присутствия новой неизвестной формы энергии, стал для ученых настоящим шоком. Эта неизвестная энергия не переносится ни частицами, ни какой бы то ни было другой формой вещества, и не собирается в сгустки, подобно традиционному веществу. Она также не становится более разреженной по мере расширения Вселенной, а сохраняет постоянную плотность. Благодаря этой таинственной энергии, равномерно пронизывающей всю Вселенную даже там, где в ней совсем нет вещества, расширение Вселенной постепенно ускоряется.

Эйнштейн первоначально предложил учесть существование такой формы энергии в виде константы, которую он назвал *универсальной константой*; позже она получила известность среди физиков под именем *космологической константы*. Однако Эйнштейн вскоре решил, что это была ошибка и что он зря попытался объяснить таким образом стационарность Вселенной, — ведь Вселенная на самом деле расширяется, как установил Эдвин Хаббл вскоре после того, как Эйнштейн предложил свою константу. Расширение Вселенной вполне реально, но в настоящее время считается, что она расширяется все быстрее благодаря той самой забавной энергии, которую в 1930-е гг. сначала предложил, а затем отверг Эйнштейн.

Мы, ученые, хотим больше узнать о загадочной темной энергии и лучше понять ее. В настоящее время разрабатываются экспери-

менты, цель которых — определить, что она собой представляет — просто фоновую энергию, которую предлагал ввести Эйнштейн, или новую форму энергии, изменяющейся во времени. А может, это что-то третье и совершенно неожиданное — что-то такое, чего мы пока даже представить не в состоянии.

ДРУГИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Это всего лишь пример — хотя и весьма важный — тех задач, которые мы сегодня решаем. Кроме уже описанных, в настоящее время готовится немало и других космологических экспериментов. Детекторы гравитационных волн попытаются уловить гравитационное излучение, возникающее при слиянии черных дыр и при других интереснейших явлениях, в которых принимают участие громадные количества массы и энергии. Космические эксперименты по регистрации микроволнового излучения позволят нам больше узнать об инфляции. Детекторы космических лучей расскажут нам новые подробности о составе Вселенной. А детекторы инфракрасного излучения, возможно, обнаружат в небе новые необычные объекты.

В некоторых случаях мы сможем понять данные, полученные в результате экспериментов, достаточно хорошо, чтобы сделать на их основе новые выводы о фундаментальной природе вещества и законов природы. В других случаях нам придется потратить немало времени на то, чтобы разобраться в полученных данных и понять, что же они означают. В любом случае работа по согласованию теории и экспериментальных данных позволит нам пройти еще несколько шагов по пути познания окружающего мира и расширит наши знания на новые, пока недоступные области.

Результаты некоторых экспериментов, вполне вероятно, будут получены очень скоро. Другие, может быть, растянутся на много лет. Но так или иначе по мере поступления данных теоретики вынуждены будут пересматривать и иногда даже отвергать существующие объяснения; теории придется дорабатывать и учиться корректно применять. Возможно, это звучит не слишком оптимистично, но на самом деле все не так плохо. Мы очень рассчитываем

на новые ориентиры, которые помогут нам ответить на старые вопросы, а результаты экспериментов указывают нам путь и гарантируют, что когда-нибудь прогресс будет достигнут, даже если новые данные потребуют отказаться от старых представлений. Научные гипотезы зачастую основываются на теоретической непротиворечивости, но, как мы убедимся далее, в итоге именно эксперимент — а ни в коем случае не слепая вера — определяет, которая из них верна.

Часть III

АППАРАТУРА, ИЗМЕРЕНИЯ И ВЕРОЯТНОСТИ

ГЛАВА 8

ОДНО КОЛЬЦО, ЧТОБЫ ПРАВИТЬ ВСЕМ...

Вообще-то, я не люблю преувеличений и уверена, что великие события и достижения говорят сами за себя. В Америке нежелание приукрашивать — не популярный подход, ведь люди здесь так часто используют превосходные степени, что даже обычная похвала без эпитета «самый» иногда воспринимается как принижение заслуг. Мне часто советуют добавить к похвальному отзыву несколько красивостей. Но в случае с БАКом я не стану экономить на эпитетах и сразу скажу, что это громадное достижение. БАК невероятно красив и притягателен, а уровень примененных в нем технологий просто ошеломляет.

В этой главе мы начнем знакомство с этим невероятным аппаратом. В следующей главе совершим путешествие по кольцу БАКа, а еще через несколько глав попадем в мир экспериментов, которые регистрируют все, что в нем происходит. Но пока мы сосредоточимся на самом агрегате, способном выделять, ускорять и сталкивать между собой протоны высоких энергий, которые, как мы надеемся, откроют перед нами новые миры.

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР

В первый раз, когда мне случилось побывать на БАКе, он внушил мне восторг и благоговение, несмотря на то что я много раз бывала на коллайдерах и видела установленное на них оборудование

и детекторы. Но здесь все было в другом масштабе. Мы вошли, надели каски, прошли в тоннель, остановились у громадной выемки, куда предполагалось опустить детектор ATLAS, и наконец добрались до самой экспериментальной установки. Она все еще строилась, и ATLAS пока стоял на виду (позже его установили на место и закрыли).

Ученый во мне, разумеется, не склонен был видеть в этом невероятно точном и сложном техническом чуде произведение искусства, но я все же не удержалась и полезла за фотоаппаратом. Сложность, выверенность да и просто масштаб установки, не говоря уже о сочетании цветов — трудно передать словами, — все в целом производит сильнейшее впечатление.

Надо сказать, что люди искусства реагировали на это зрелище точно так же. Коллекционер Франческа фон Габсбург привезла с собой на строительство профессионального фотографа, и снимки получились настолько красивыми, что их опубликовал известный журнал *Vanity Fair*. Кинопродюсер Джесс Дилан увидел в Большом адронном коллайдере громадный и совершенно замечательный арт-проект — «высшее достижение», к величию и красоте которого хочется приобщиться. Джесс попытался передать свои впечатления при помощи видео.

Актер и ведущий Алан Алда сравнил коллайдер с одним из древних чудес света. Физик Дэвид Гросс — с египетскими пирамидами. Инженер и предприниматель Элон Маск — один из основателей системы PayPal, руководитель компании Tesla, выпускающей электромобили, создатель и руководитель SpaceX (компания — производителя ракет и космических кораблей, которые будут доставлять грузы на Международную космическую станцию) — сказал о БАКе: «Определенно, это одно из величайших достижений человечества».

Мне приходилось слышать подобные утверждения от людей самых разных профессий. Интернет, гибридные автомобили, «зеленая» энергетика и космические путешествия — лишь некоторые из наиболее интересных и активных на сегодняшний день областей прикладных научных исследований. Но попытка познать фундаментальные законы Вселенной даже в этом ряду сто-

ит особняком, а масштабы исследований и экспериментов, принимаемых в этой области, поражают. И художники, и ученые стремятся познать мир и разгадать загадку его происхождения. Конечно, можно спорить о том, что именно считать величайшим достижением человечества, но я не думаю, что кто-то усомнится, что стремление человека заглянуть за грань доступного и выяснить, что там, — одна из самых замечательных его черт. Только человеку свойственно стремиться к неведомому.

Столкновения, которые мы планируем изучать на БАКе, сродни тем, что происходили в первую триллионную долю миллисекунды после Большого взрыва. Они расскажут нам о малых расстояниях, о характере вещества и взаимодействий в самом начале времен. Вообще, коллайдер можно представить таким супермикроскопом — ведь он позволяет изучать частицы и взаимодействия на невероятно малых расстояниях порядка одной десятой от одной тысячной от одной триллионной доли миллиметра*.

БАК достигает результатов на этом крохотном масштабе за счет того, что столкновения частиц в нем проходят при таких высоких энергиях, какие до сих пор на Земле не имели места; энергия столкновения в БАК примерно в семь раз выше, чем энергия столкновения в мощнейшем из прежних коллайдеров — тэватроне, расположенном в Батавии (штат Иллинойс). В главе 6 я уже объяснила, почему квантовая механика и волновые процессы в ней требуют таких высоких энергий для исследования столь крохотных расстояний. Кроме того, светимость (интенсивность столкновений частиц) нового коллайдера будет в 50 раз выше, чем у тэватрона, поэтому там гораздо чаще будут происходить редкие события, позволяющие проникнуть во внутреннюю суть природы, и вероятность обнаружения таких событий, соответственно, будет намного выше.

Хоть я и не люблю преувеличений, но БАК принадлежит к миру, описывать который можно только превосходными степенями. Он не просто огромен: БАК — самая крупная в истории человечества машина. В нем не просто холодно: температура в 1,9 К (то есть

* 10^{-19} м. — *Прим. пер.*

на 1,9 градуса выше абсолютного нуля), необходимая для работы сверхпроводящих магнитов, делает соответствующие участки самыми холодными известными человеку протяженными областями во Вселенной; там холоднее, чем в космосе. Магнитное поле в БАКе не просто сильное: сверхпроводящие дипольные магниты генерируют поле в 1 000 000 раз более мощное, чем магнитное поле Земли, и это самые сильные из когда-либо производившихся магнитов.

Рекорды на этом не заканчиваются. Вакуум в протонных каналах БАКа (давление там составляет 10 триллионных долей атмосферного) — это самый глубокий вакуум, когда-либо достигнутый в таком объеме. Энергия столкновений — самая высокая из всех, когда-либо имевших место на Земле, что позволяет нам изучать взаимодействия, происходившие в ранней Вселенной, ближе чем когда-либо к моменту Большого взрыва.

Кроме того, в БАКе задействованы громадные энергии. Одно только магнитное поле эквивалентно по энергии паре тонн тринитротолуола, да и каждый из протонных пучков несет в себе примерно 10% от этого количества. Эта энергия сосредоточена в одной миллиардной доле грамма вещества — крохотной пылинке, не видимой при обычных обстоятельствах даже под микроскопом. После окончания работы с пучком аппарат сбрасывает эту энергию в графитовый цилиндр восьмиметровой длины и метрового диаметра, заключенный в бетонную оболочку весом 1000 т.

Невозможные ранее результаты, достигнутые на БАКе, стали возможны благодаря новейшим технологиям. Такие технологии недешевы, а превосходные степени, как правило, зримо отражаются на стоимости. БАК можно признать самой дорогой из всех когда-либо построенных машин. Примерно две трети стоимости установки оплатил Европейский центр ядерных исследований, бюджет которого формируют 20 стран-участников (размеры взноса каждой страны зависят от средств и колеблются от 20% для Германии до 0,2% для Болгарии). Оставшуюся треть стоимости строительства оплатили страны, не входящие в организацию, в том числе США, Япония и Канада. Кроме того, Центр взял на себя 20% расходов на экспериментальные установки, которые финансируются

международными научными коллективами. Так, в 2008 г., когда строительство установки было в основном завершено, на детекторах CMS и ATLAS работало более тысячи американских ученых, и США вложили в БАК 531 млн долларов.

КАК НАЧИНАЛСЯ БАК

Европейский центр ядерных исследований, где разместился Большой адронный коллайдер, — это исследовательская организация, где одновременно реализуется множество научных программ. Однако основные ресурсы Центра, как правило, сосредоточены в одной флагманской программе. В 1980-е гг. такой программой был протон-антипротонный коллайдер SppS*; именно на нем были обнаружены частицы — переносчики фундаментальных взаимодействий, без которых Стандартная модель** физики элементарных частиц была бы невозможна. В ходе знаменитых экспериментов 1983 г. были открыты слабые калибровочные бозоны — переносчики слабого взаимодействия (два по-разному заряженных W-бозона и нейтральный Z-бозон). Именно их на тот момент не хватало в Стандартной модели, и это открытие принесло ведущим ученым проекта SppS Нобелевскую премию.

Еще в ходе работы на SppS ученые и инженеры начали планировать строительство нового коллайдера, получившего название LEP; в нем предполагалось сталкивать электроны и соответствующие им античастицы — позитроны, что позволяло изучать слабое взаимодействие и Стандартную модель в мельчайших подробностях. Эти планы были реализованы в 1990-е гг.; благодаря высочайшей точности измерений на LEP и исследованию миллионов событий с участием слабых калибровочных бозонов физики очень многое узнали о взаимодействиях частиц Стандартной модели.

* Первоначально он предназначался для ускорения протонов и антипротонов. В настоящее время он используется в составе БАКа в качестве протонного суперсинхротрона SPS и ускоряет только протоны. — *Прим. авт.*

** Стандартная модель — теоретическая конструкция в физике элементарных частиц, описывающая электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия всех элементарных частиц. Стандартная модель не является теорией всего, так как не описывает темную материю, темную энергию и не включает в себя гравитацию. — *Прим. ред.*

LEP представлял собой кольцевой коллайдер с длиной окружности 27 км. Электроны и позитроны, кружа по кольцу, раз за разом получали все новые порции энергии. Электронный пучок с обычной для LEP энергией примерно в 100 ГэВ на каждом обороте терял около 3% своей энергии. Потери вроде бы невелики, но, если бы мы захотели разогнать электроны в этом тоннеле до более высоких энергий, такие потери не позволили бы нам это сделать. При увеличении энергии пучка в 10 раз энергетические потери при кольцевом движении выросли бы в 10 000 раз, и эффективность ускорителя очень быстро упала бы до неприемлемого уровня.

Поэтому, когда LEP только еще проектировался, ученые уже думали о следующем флагманском проекте Европейского центра ядерных исследований, который, по идее, должен был оперировать еще более высокими энергиями. С учетом неприемлемых энергетических потерь при разгоне электронов было ясно, что если Центр захочет построить следующий, еще более высокоэнергетический ускоритель, то работать он должен будет с протонами, которые намного тяжелее электронов и потому излучают намного меньше. Физики и инженеры, проектировавшие LEP, прекрасно знали о такой перспективе и построили кольцевой тоннель для LEP достаточно широким, чтобы в будущем, когда электронно-позитронная машина будет остановлена и разобрана, он мог вместить гипотетический протонный коллайдер.

Сегодня, спустя около 25 лет, протонные пучки носятся по тоннелю, построенному первоначально для ускорителя LEP (рис. 24). Большой адронный коллайдер на пару лет отстаёт от графика и уже процентов на 20 вышел из первоначального бюджета. Прискорбно, конечно, но, может быть, все не так уж страшно — ведь это самый крупный, самый международный, самый высокоэнергетический, самый амбициозный эксперимент из всех, проводившихся когда-либо. Сценарист и режиссер Джеймс Брукс, услышав о задержках и проблемах при строительстве БАКа, шутливо сказал: «Я знаю людей, у которых примерно столько же времени уходит на то, чтобы кое-как наклеить обои. Не исключено, что разгадка тайн Вселенной — несколько более достойная цель».

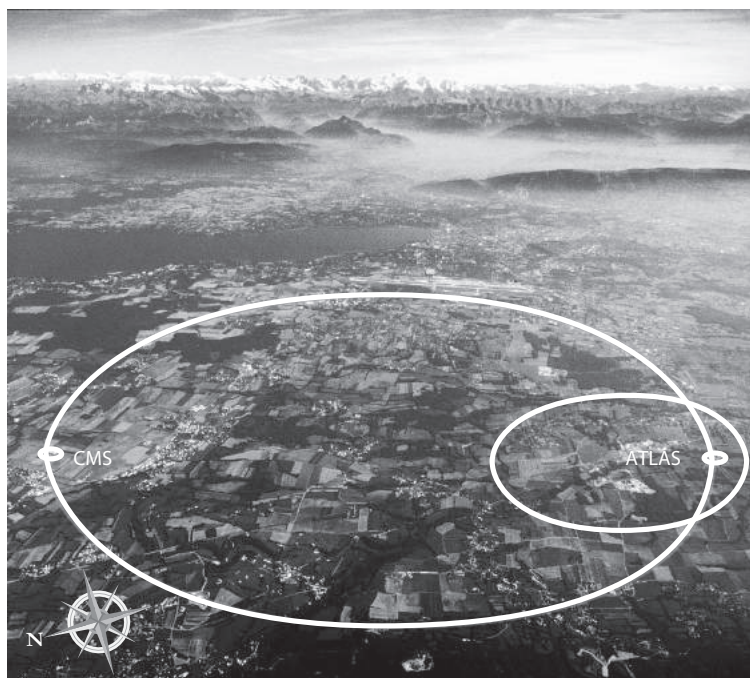


РИС. 24. Примерное расположение Большого адронного коллайдера. Белым условно обозначен подземный тоннель, дальше видны Женевское озеро и горы. (Фото предоставлено Европейским центром ядерных исследований.)

БРАТСТВО КОЛЕЦ

Протоны всюду — и вокруг, и внутри нас. Как правило, однако, они связаны в ядрах атомов, окруженных к тому же электронами. Они не изолированы от электронов и не коллимированы (то есть не выстроены параллельными рядами) в пучках. БАК первым делом выделяет и разгоняет протоны, а затем направляет пучок частиц навстречу уготованной им судьбе. При этом многочисленные рекордные возможности БАКа оказываются совсем не лишними.

Первый шаг в подготовке протонных пучков — нагревание атомов водорода; при этом атомы теряют электроны и остаются

одни протоны (ядро атома водорода — это, собственно, и есть протон). Магнитные поля задают этим протонам направление движения и формируют из них пучки. Затем БАК в несколько этапов разгоняет эти пучки. Происходит это в определенных зонах; протоны, двигаясь от одного «акселератора» к другому, всякий раз увеличивают свою энергию, пока, наконец, не отклоняются от одного из двух параллельных пучков, чтобы столкнуться.

Первая фаза ускорения происходит в линейных ускорителях типа Linac — на прямых участках тоннеля, где протоны разгоняются по прямой при помощи радиоизлучения. В пике стоячей радиоволны связанное с ней электрическое поле разгоняет протоны. Затем пучок протонов вынуждают выйти из поля, чтобы при его ослаблении протоны не замедлились. Далее, при приближении к очередному пику волны, протоны возвращаются в поле и вновь ускоряются — и так раз за разом. По существу, электромагнитная волна здесь периодически подталкивает протоны — примерно так же, как вы подталкиваете ребенка, раскачивая его на качелях. Энергия протонов растет, но на этой — первой — стадии ускорения частицы получают лишь крохотную ее долю.

На следующей стадии магниты направляют протоны в систему колец, где они продолжают ускоряться. Каждый из этих циклических ускорителей действует примерно так же, как описанный выше линейный ускоритель, однако кольцевая форма позволяет им подталкивать протоны и повышать тем самым их энергию на каждом круге в тысячи раз. Промежуточные кольцевые ускорители передают частицам значительную часть энергии.

«Братство колец», ускоряющее протоны перед подачей их в большое кольцо БАКа, состоит из протонного синхротрона-разгонщика (protonsynchrotronbooster, PSB), обеспечивающего разгон частиц до 1,4 ГэВ, протонного синхротрона (protonsynchrotron, PS), поднимающего энергию частиц до 26 ГэВ, и протонного суперсинхротрона (superprotonsynchrotron, SPS), доводящего ее до так называемой энергии впрыска, равной 450 ГэВ (маршрут путешествия протона можно увидеть на рис. 25). Именно с такой энергией протоны попадают в 27-километровый тоннель на последнюю стадию ускорения.

Два ускорительных кольца из перечисленных «пришли» из прежних проектов Европейского центра ядерных исследований. Старейшее из них — кольцо PS — в ноябре 2009 г. отметило золотой юбилей, а PSB в 1980-е годы играл важнейшую роль в предыдущем крупном проекте — ускорителе LEP.

После SPS для протонов начинается двадцатиминутная *фаза впрыска, или инжекции*. За это время пришедшие из SPS протоны с энергией 450 ГэВ разгоняются в большом кольце БАКа до полной энергии. Протоны в тоннеле движутся двумя отдельными пучками в противоположных направлениях по тонким трехдюймовым трубам, протянувшимся на все 27 км подземного кольца.

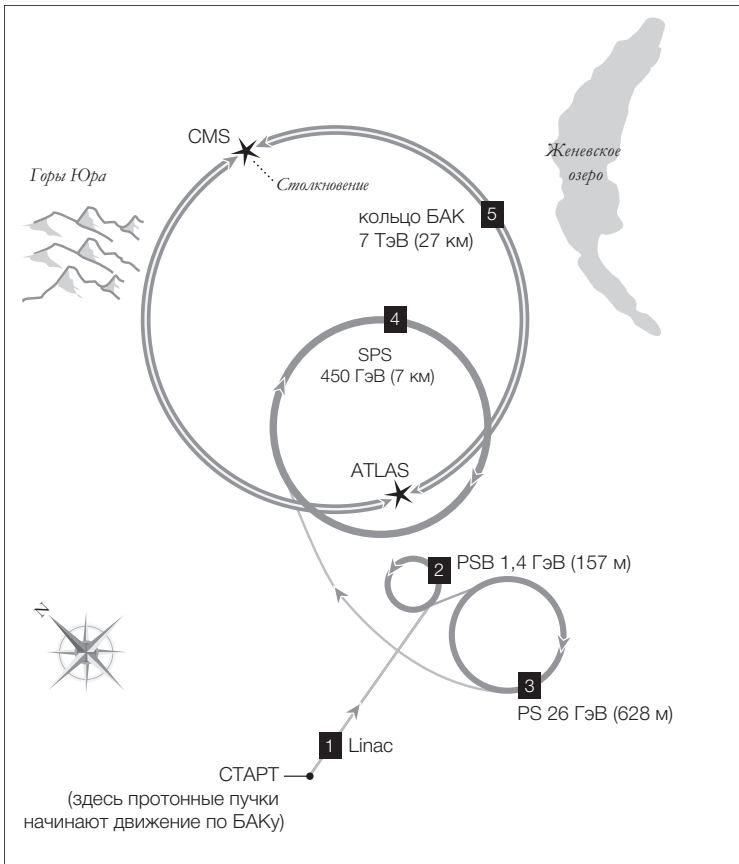


РИС. 25. Путь, который проходит протон в процессе ускорения в БАКе

В тоннеле шириной 3,8 м, построенном в 1980-е гг., протонные пучки проходят сегодня последнюю стадию ускорения. В тоннеле светло и прохладно, он достаточно просторен. Мне довелось прогуляться по нему еще в те времена, когда коллайдер только строился. Я прошла по нему совсем немного, но на эти несколько шагов потребовалось гораздо больше времени, чем те 89 миллионных долей секунды, за которые проходит все кольцо длиной 26,6 км ускоренный высокоэнергетический протон, летящий со скоростью в 99,9999991% скорости света.

Тоннель находится на глубине около 100 м под землей; в разных местах глубина его заложения колеблется от 50 до 175 м. Это защищает поверхность земли от излучения и означает также, что во время строительства не пришлось сносить все фермы и сельхозугодия над местом прохождения тоннеля. Тем не менее в 1980-е гг. вопросы имущественных прав задержали строительство тоннеля, тогда еще для LEP. Проблема в том, что во Франции землевладелец имеет права не только на сельскохозяйственные угодья, которые обрабатывает, но и на недра под своим участком, вплоть до центра Земли. Тоннель удалось прорыть только после того, как французские власти позаботились об этом и подписали Декларацию об общественной пользе (*Declaration d'Utilite Publique*), сделав таким образом скальное основание — и, в принципе, магму под ним тоже — общественной собственностью.

Физики спорят о том, зачем тоннель сделали наклонным, а его глубину соответственно — неравномерной. То ли дело в геологии, то ли целью было дополнительно защитить поверхность от излучения, но так или иначе наклон тоннеля оказался полезен в обоих отношениях. Неоднородный рельеф района поставил перед строителями тоннеля сложную задачу и, безусловно, повлиял на его расположение и форму. Под этой местностью залегают в основном осадочные горные породы, но под речными и морскими отложениями имеются водоносные слои — гравий, песок и глина, и строить тоннель в таких грунтах вряд ли стоило. Таким образом, наклон помогает тоннелю все время оставаться в прочных скальных породах. Благодаря этому, кстати, одна из секций тоннеля у подножья живописных гор Юра на окраине Центра находится

чуть ближе к поверхности, так что поднимать и опускать грузы и людей по вертикальной шахте в этом месте было немного проще (и дешевле).

Ускоряющие электрические поля в главном тоннеле организованы не совсем правильным кольцом. Большое кольцо БАКа состоит из восьми больших дуг, перемежающихся восьмью семисотметровыми прямыми участками. Каждый из восьми секторов можно независимо нагревать и охлаждать, что очень облегчает ремонт и обслуживание. Впрыснутые в тоннель протоны ускоряются на каждом из коротких прямых участков при помощи радиоволн примерно так же, как они разгонялись на предыдущих этапах, пока не достигли энергии впрыска. Ускорение происходит на *ускоряющих промежутках*, содержащих радиосигнал частотой 400 МГц — той самой, которой вы пользуетесь при дистанционном открывании дверцы автомобиля. Сгусток протонов, проходя через ускоряющий промежуток, получает приращение энергии всего лишь в 485 миллиардных долей ТэВ. На первый взгляд это немного, но ведь протоны делают полный круг по кольцу БАКа 11 000 раз в секунду! Таким образом, всего за 20 минут удастся поднять энергию протонов в пучке от энергии впрыска (450 ГэВ) до целевой энергии (7 ТэВ), то есть примерно в 15 раз. Часть протонов теряется из-за столкновений и просто случайных отклонений, но большая их часть будет кружить по кольцу еще примерно 12 часов, прежде чем поредевший пучок пора будет сбрасывать в грунт и заменять свежим пучком только что впрыснутых протонов.

Протоны, циркулирующие по кольцу БАКа, распределены по его окружности неравномерно. Их посылают по кольцу так называемыми сгустками — всего их 2808 — по 115 млрд протонов в каждом. Вначале каждый сгусток представляет собой вытянутую группу протонов длиной 10 см и шириной 1 мм; расстояние между соседними сгустками составляет примерно 10 м. Так проще, потому что каждый сгусток ускоряется отдельно, сам по себе. Есть и еще одно преимущество: такая группировка протонов гарантирует, что сгустки частиц взаимодействуют с промежутками по крайней мере 25–75 нс; этого достаточно, чтобы каждое стол-

кновение двух сгустков записывалось отдельно. В сгустке во много раз меньше протонов, чем в целом пучке, поэтому и разбираться в столкновениях намного проще, ведь одновременно могут сталкиваться только протоны одного сгустка, а не всего пучка сразу.

ДИПОЛЬНЫЕ КРИОГЕННЫЕ МАГНИТЫ

Разгон протонов до столь высоких энергий — безусловно, серьезное достижение. Но самой сложной в техническом отношении задачей при строительстве коллайдера стала разработка и изготовление мощных магнитов, которые должны удерживать протоны на правильной кольцевой траектории. Без магнитов протоны летели бы по прямой, а для удержания высокоэнергетических протонов в кольце магнитное поле должно быть чрезвычайно мощным.

Тоннель БАКа очень велик, поэтому главной инженерно-технической задачей оказалось изготовление мощнейших магнитов в промышленных масштабах, то есть практически серийно. Сильное поле требуется для удержания высокоэнергетических протонов в тоннеле. Чем выше энергия протонов, тем более мощные магниты нужны для удержания их в тоннеле — и тем больше должен быть диаметр ускорительного кольца, чтобы протоны могли поворачивать по нему плавно. Размер кольца был известен заранее, так что целевая энергия протонов в нем определяется максимальной мощностью магнитного поля, которой удастся достигнуть.

Американский сверхпроводящий суперколлайдер SSC, если бы он был достроен, располагался бы в гораздо большем по протяженности тоннеле длиной 87 км (его даже успели частично проложить) и по проекту должен был разгонять протоны до энергии 40 ТэВ, что почти втрое превышает целевую энергию проекта БАКа. Такая значительная разница объясняется тем, что эта установка разрабатывалась заново, практически с нуля и проектировщиков не ограничивали размеры уже существующего тоннеля и, соответственно, не слишком реалистичные требования по поддержанию мощнейшего магнитного поля. Однако предложенный европейцами план имел немало практических преимуществ,

начиная от существующего тоннеля и заканчивая развитой научной, инженерной и транспортной инфраструктурой Европейского центра ядерных исследований.

Едва ли не самое сильное впечатление во время визита в Центр на меня произвел прототип гигантского цилиндрического магнита для БАКа (на рис. 26 он изображен в сечении). Таких магнитов вокруг разгонного кольца БАКа установлено немало — 1232 штуки, но и каждый из них в отдельности — это нечто грандиозное. Это машина весом 30 т и длиной 15 м. Надо заметить, что длина магнита определена относительно небольшой шириной тоннеля — и, конечно, необходимостью перевозить готовые магниты по европейским дорогам. Каждый из магнитов обошелся в 700 000 евро; соответственно, общая стоимость одних только магнитов в БАКе превысила миллиард долларов.

Тонкие трубки, по которым разгоняются протонные пучки, проложены внутри дипольных магнитов, которые установлены вплотную один за другим и тянутся, таким образом, внутри тоннеля по всей его длине. Они генерируют магнитное поле напряженностью до 8,3 Тл — это примерно в тысячу раз выше, чем напряженность поля, создаваемого магнитиком на холодильнике. По мере того как энергия протонов в пучке увеличивается с 450 до 7 ТэВ, напряженность магнитного поля, которое должно удерживать все более энергичные протоны на их кольцевом маршруте, возрастает с 0,54 до 8,3 Тл.

Магнитное поле, которое генерируют эти магниты, настолько мощно, что сами магниты не удержались бы на месте, если бы не специальные крепления. Отчасти сила, действующая на магнит, компенсируется за счет геометрии витков, но в конечном итоге магниты удерживают на месте специально спроектированные стальные «воротники», или хомуты, толщиной 4 см.

Мощные магниты БАКа были бы невозможны без сверхпроводящих технологий. Инженеры БАКа пользовались при проектировании технологиями, разработанными для американского проекта SSC, для тэватрона Лаборатории имени Ферми, расположенной в штате Иллинойс, а также для немецкого электронно-позитронного коллайдера в гамбургском ускорительном центре DESY.

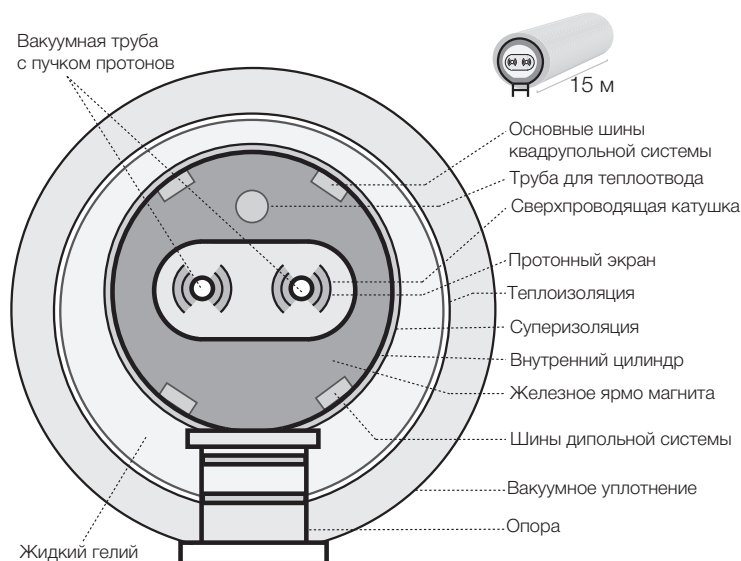


РИС. 26. Схема устройства дипольного криомагнита. Протоны удерживаются на кольцевом маршруте внутри туннеля при помощи 1232 таких сверхпроводящих магнитов

В обычных условиях провода (к примеру, медные провода, из которых сделана проводка в вашем доме) имеют сопротивление. Это означает, что при прохождении по ним электрического тока теряется энергия. А вот сверхпроводящие проводники не рассеивают энергию, и электрический ток проходит по ним без помех. Витки сверхпроводящей проволоки способны генерировать очень мощные магнитные поля; более того, такое поле, раз установившись, будет поддерживаться без дополнительного притока энергии.

Каждый диполь БАКа содержит катушку ниобиево-титанового сверхпроводящего кабеля, каждый из которых свит из тончайших проволочек толщиной всего шесть микрон — намного тоньше человеческого волоса. Всего на сооружение БАКа пошло 1200 т этой замечательной проволоки. Если размотать, ее длина сравнялась бы с длиной орбиты Марса.

В процессе работы сверхпроводящие диполи должны быть очень холодными, так как сверхпроводимость «включается» лишь

при достаточно низких температурах. Вокруг сверхпроводящих кабелей поддерживается температура на 1,9 градуса выше абсолютного нуля, то есть на 271 градус ниже температуры замерзания воды. Это даже ниже температуры фонового микроволнового излучения в открытом космосе, которая составляет 2,7 К. В тоннеле БАКа находится самая холодная протяженная область во Вселенной — по крайней мере насколько нам известно. Из-за сверхнизких температур магниты БАКа называют *криодиполями*.

Помимо невероятных «проволочных» технологий, использованных в магнитах БАКа, нельзя не упомянуть и систему охлаждения (*криогенную систему*), которая сама по себе является серьезным достижением и заслуживает самых восторженных эпитетов. Естественно, это самая большая в мире система охлаждения. Сверхнизкую температуру в ней обеспечивает проточный гелий. Магниты, нуждающиеся в охлаждении, окружает специальная оболочка, в которой содержится примерно 97 т жидкого гелия. Это не обычный гелий в виде газа, а гелий, который при помощи давления поддерживают в состоянии *сверхтекучести*. Сверхтекучий гелий не обладает вязкостью обычных материалов и способен очень эффективно рассеивать все тепло, выделяемое в дипольной системе. Сначала охлаждают 10 000 т жидкого азота, который, в свою очередь, охлаждает 130 т жидкого гелия, циркулирующего в диполях.

Не все части БАКа располагаются под землей. У коллайдера есть и наземные здания, где размещены оборудование, электроника и рефрижераторные установки. Традиционная морозильная установка охлаждает гелий до 4,5 К, а затем происходит окончательное охлаждение со снижением давления. Этот процесс (так же, как и согревание) занимает около месяца. Ясно, что при любом включении или выключении коллайдера, а также при любой попытке ремонта на согревание и охлаждение уходит много дополнительного времени.

Если в системе случается какой-то сбой — к примеру, где-то выделилось небольшое количество тепла и чуть поднялась температура, — происходит так называемый *квенч*, или *аварийное расхолаживание*; это означает, что сверхпроводимость потеряна. Вообще,

потеря сверхпроводимости может иметь катастрофические последствия, поскольку вся энергия магнитов высвобождается разом. Поэтому в БАКе существует специальная система обнаружения квенчей и распределения высвобождающейся энергии. Эта система следит, чтобы нигде не возникало разности потенциалов: ведь при сверхпроводимости ее быть не может. Если такое случается, то меньше чем за секунду энергия высвобождается всюду и диполь выходит из сверхпроводящего состояния.

Но даже с применением сверхпроводящих технологий для генерации магнитного поля напряженностью 8,3 Тл требуются громадные токи. Ток в криодиполях доводится почти до 12 000 А, что в 40 000 раз превышает ток в горячей у вас на столе электрической лампочке.

Учитывая токи и охлаждение, неудивительно, что работающий БАК потребляет громадное количество электроэнергии — примерно столько же, сколько небольшой город, такой как близлежащая Женева. Чтобы избежать лишних расходов на электричество, на зимние месяцы коллайдер останавливают — зимы в Швейцарии холодные, и цены на электроэнергию заметно выше летних. (Исключение было сделано для пробного пуска в 2009 г.) У такой политики есть и дополнительное преимущество — ученые и инженеры получают замечательные рождественские каникулы.

СКВОЗЬ ВАКУУМ К СТОЛКНОВЕНИЯМ

Наконец, еще одно качество БАКа, заслуживающее превосходных оценок, — вакуум в трубах, по которым циркулируют протоны. Чтобы сохранить охлажденный гелий, систему необходимо в максимальной степени освободить от лишнего вещества, потому что любые посторонние молекулы могут передавать тепло и энергию наружу. Самое главное, из областей, по которым путешествует протонный пучок, следует удалить всякие газы. Если в трубке присутствует газ, протоны будут сталкиваться с его молекулами, и правильная циркуляция протонного пучка нарушится. Поэтому давление внутри пучка чрезвычайно мало: оно в десять триллионов раз меньше атмосферного и соответствует давлению на вы-

соте 1000 км над поверхностью Земли, где воздух чрезвычайно разрежен. Чтобы получить пространство, пригодное для разгона протонных пучков, из БАКа пришлось откачать 9000 м^3 воздуха.

Но даже при таком невероятно низком давлении в каждом кубическом сантиметре пространства внутри разгонной трубки присутствует около трех миллионов молекул газа, так что протоны иногда все же сталкиваются с молекулами газа. И если в сверхпроводящий магнит попадет достаточное количество протонов, чтобы нагреть его, произойдет все тот же квенч и магнит выйдет из состояния сверхпроводимости. Для удаления случайно «отбившихся» от пучка частиц вдоль траектории пучка расставлены углеродные коллиматоры, которые поглощают все, что не попадает в трехмиллиметровую апертуру (вполне достаточную по размеру для прохождения пучка толщиной около 1 мм).

И все же собрать протоны в сгусток миллиметровой толщины — непростая задача. Выполняют ее другие магниты, *квадрупольные*; они весьма эффективно сжимают и фокусируют пучок. В тоннеле БАКа 392 таких магнита. Кроме того, квадрупольные магниты в нужный момент отклоняют два протонных пучка с их независимых траекторий, чтобы они могли столкнуться.

Пучки сталкиваются не в точности на встречных курсах, не совсем лоб в лоб, а под крохотным углом примерно в одну тысячную радиана (около 0,06 градусов). Делается это для того, чтобы за один раз в столкновении участвовало лишь по одному сгустку из каждого пучка; тогда в остальном пучки остаются нетронутыми.

Когда сталкиваются два сгустка из двух циркулирующих по тоннелю пучков, сотня миллиардов протонов из одного пучка сходится «врукопашную» с сотней миллиардов протонов из другого. На квадрупольные магниты возлагается чрезвычайно сложная задача фокусирования обоих пучков именно в тех областях, где должны происходить столкновения и где, соответственно, размещается экспериментальное оборудование для регистрации событий. В этих местах магниты сжимают пучки до крохотной толщины 16 микрон. Пучки и должны быть чрезвычайно тонкими и плотными, чтобы сто миллиардов протонов одного сгустка, проходя сквозь второй сгусток, с как можно большей вероятно-

стью встретились хотя бы с одним из ста миллиардов его протонов.

Большая часть протонов сгустка не увидит встречных протонов на своем пути, несмотря на то что пучки встречаются практически в точке. Индивидуальный протон — это крохотная частица, диаметр которой составляет всего около одной миллионной доли нанометра. А значит, несмотря на то что оба сгустка сжаты до толщины 16 микрон, при каждой встрече двух сгустков всего около 20 протонов испытывают лобовые столкновения со встречными протонами.

На самом деле это очень хорошо. Если бы одновременно происходило слишком большое число столкновений, разобраться в данных было бы трудно. Было бы невозможно понять, какие частицы получились при каком именно столкновении. Но плохо также, если бы столкновений не происходило вовсе. Сфокусировав сто миллиардов протонов в «иглу» именно такой толщины, конструкторы БАКа получили оптимальное число событий на одно столкновение сгустков.

Столкновение двух протонов, если уж оно имеет место, происходит почти мгновенно — за время примерно на 25 порядков меньше секунды. Это означает, что время между группами протонных столкновений практически полностью определяется частотой встречи протонных сгустков, которые в полном рабочем режиме БАКа сталкиваются каждые 25 наносекунд. Иначе говоря, пучки пересекаются больше 10 млн раз в секунду! При такой частоте БАК генерирует громадное количество информации: в среднем за секунду происходит около миллиарда событий. К счастью, промежутки между столкновениями сгустков достаточно велики, чтобы компьютеры могли отслеживать отдельные интересные события, не путая между собой столкновения частиц из разных сгустков.

По существу, исключительные параметры БАКа должны гарантировать одновременно максимальную возможную энергию столкновений и максимальное число событий, которые можно аккуратно отследить. Большая часть энергии бесконечно кружит по тоннелю, и только иногда происходят столкновения, достойные внимания ученых. Несмотря на немалую суммарную

энергию пучков, энергия отдельного столкновения сгустков немалого превышает кинетическую энергию нескольких комаров в полете. Все-таки здесь сталкиваются протоны, а не футболисты и не автомобили. БАК концентрирует энергию в крохотной области и в таких столкновениях элементарных частиц, за которыми могут следить ученые. Чуть позже мы поговорим о скрытых факторах, которые они надеются обнаружить, и об открытиях о природе вещества и пространства, которые, как надеются физики, будут сделаны в результате этих экспериментов.

ГЛАВА 9

ВОЗВРАЩЕНИЕ КОЛЬЦА

Я поступила в аспирантуру в 1983 г., а проект БАКа был официально предложен в 1984 г. Так что в определенном смысле четверть века своей научной деятельности я ждала этот БАК! Теперь, наконец, я и мои коллеги получаем с БАКа данные и можем реально предположить, какие на этом пути нас могут ожидать открытия, к каким результатам в отношении массы, энергии и вещества могут в ближайшее время привести нас эксперименты.

В настоящее время БАК — это важнейшая экспериментальная установка в физике элементарных частиц. Понятно, что стоило коллайдеру заработать, как моих коллег-физиков охватили тревога и нетерпеливое возбуждение. Невозможно было войти в зал какого-нибудь семинара, чтобы на тебя не накнулись с вопросами. Что происходит? Какая достигнута энергия столкновений? Теоретики интересовались такими подробностями, которые прежде для тех из нас, кто занимался расчетами и был далек от датчиков и экспериментальных установок, были едва ли не абстракцией. Наблюдался и обратный процесс. Экспериментаторы как никогда живо интересовались нашими последними разработками и жаждали побольше узнать о том, что им следует искать и что есть шанс открыть.

Даже на конференции в декабре 2009 г., посвященной темному веществу, участники с огромным интересом обсуждали БАК, который тогда только что завершил свой невероятно успешный дебют, получив первые высокоэнергетические протоны и первые

столкновения. В то время после почти отчаяния, испытанного год назад, все просто горело энтузиазмом. Экспериментаторы с облегчением думали, что у них теперь есть данные, которые можно изучать и при помощи которых можно лучше разобраться в своих детекторах. Теоретики были счастливы, предвкушая скорое появление хоть каких-нибудь ответов и достоверных выводов. Все работало просто сказочно хорошо. Пучки получались замечательные. Столкновения происходили. Аппаратура регистрировала события.

Однако путь к этой вехе оказался очень непростым, и в этой главе я подробнее расскажу об этом. Так что пристегните ремни — мы выезжаем на неровную дорогу!

ЭТОТ МАЛЕНЬКИЙ МИР

История Европейского центра ядерных исследований (CERN) началась на несколько десятилетий раньше истории БАКа. Вскоре после окончания Второй мировой войны был заложен первый Европейский ускорительный центр, в котором должны были проводиться эксперименты по изучению элементарных частиц. В то время многие европейские физики — и те, кто эмигрировал в США, и те, кто по-прежнему жил во Франции, Италии и Дании — мечтали о том, чтобы в их родные страны вернулась передовая наука. Американцы и европейцы договорились, что для ученых и науки будет лучше, если европейцы объединятся в достижении этой общей цели и вернут исследования в Европу, чтобы залечить следы разорения и всеобщего недоверия, оставленные недавно закончившейся войной.

В 1950 г. на конференции ЮНЕСКО во Флоренции американский физик Исидор Раби посоветовал создать лабораторию, которая способствовала бы восстановлению в Европе сильного научного сообщества. В 1952 г. для этого был основан Европейский совет по ядерным исследованиям — Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, или CERN. Первого июля 1953 г. представители 12 европейских государств собрались вместе, чтобы создать Европейскую организацию ядерных исследований, а в следующем

году была ратифицирована соответствующая конвенция. Аббревиатура CERN давно уже не отражает название исследовательского центра, да и изучают здесь сегодня не ядерную, а субъядерную физику, или физику элементарных частиц. Но, как часто бывает в бюрократических системах, за Центром сохранилось первоначальное название.

Исследовательский центр был специально построен в самом центре Европы, недалеко от Женевы, на границе Франции и Швейцарии. Центр расположен в сказочном месте у подножья гор Юра среди полей и лугов, а на горизонте прекрасно видны Альпы. Ученые, работающие в CERN, весьма спортивные — ведь в тех местах все под рукой, можно заниматься горными лыжами, кататься на велосипеде и просто ходить по горам. Улицы здесь названы именами знаменитых физиков, так что, будучи в гостях, можно прокатиться по улице Кюри, улице Паули или улице Эйнштейна. А вот архитектуре Центра не повезло — она стала жертвой времени; комплекс был построен в 1950-е гг. в безликом и экономном стиле, так что здания Центра выглядят очень просто, а внутри его — бесконечные коридоры и безликие кабинеты. Не помогло и то, что строился здесь научный комплекс, — стоит взглянуть на естественнонаучные корпуса почти любого университета, и увидишь, как правило, самые страшные здания во всем университетском городке. Оживляют это место (помимо природы, конечно) работающие здесь люди.

Вообще, всем международным сообществам ученых не вредно было бы внимательно изучить эволюцию CERN и его нынешнюю деятельность. Не исключено, что это самое успешное международное предприятие всех времен и народов. Даже в непростые послевоенные годы, когда Европа только что вышла из тяжелейшего конфликта, ученые 12 стран сумели объединить усилия и обеспечить развитие своему начинанию.

В первую очередь усилия ученых были направлены на соревнование с Соединенными Штатами и их научными институтами, не испытывавшими нужды в деньгах. До открытия в CERN калибровочных W- и Z-бозонов почти все открытия в физике элементарных частиц делались на американских ускорителях. Однажды,

когда я еще студенткой в 1982 г. была на практике в Лаборатории имени Ферми, один физик вышел в холл и сказал, что они «просто обязаны открыть эти чертовы векторные бозоны» и покончить с доминированием Америки. Он выражал, вероятно, точку зрения многих европейских физиков того времени, хотя, вероятно, не слишком красноречиво, да и язык у него порядком заплетался.

И вот ученые Центра действительно нашли векторные бозоны, а теперь, после строительства БАКа, женеvский объект, бесспорно, стал мировым центром экспериментальной физики элементарных частиц. Однако нельзя сказать, что это было очевидно заранее, в момент зарождения проекта БАКа. Американский сверхпроводящий суперколлайдер SSC, проект которого президент Рейган одобрил в 1987 г., разгонял бы частицы до почти втрое больших энергий, если бы Конгресс не прекратил его финансирование. Администрация Клинтона поначалу не поддерживала проект, начатый их республиканскими предшественниками, но ситуация изменилась после того, как президент Клинтон лучше понял, каковы в этом деле ставки. В июне 1993 г. он попытался предотвратить закрытие проекта, обратившись к Уильяму Нэтчеру, председателю Комитета по ассигнованиям Палаты представителей Конгресса; в письме было сказано: «Я хочу, чтобы вы знали о моей поддержке сверхпроводящего суперколлайдера... Отказаться от SSC в настоящий момент означало бы показать всему миру, что Соединенные Штаты отказываются от лидерства в фундаментальной науке — позиции, которую никто не оспаривает уже несколько поколений. Времена в экономике сейчас тяжелые, но наша Администрация поддерживает этот проект как инвестицию в науку и технику...». Когда в 2005 г. я встретилась с бывшим президентом, он напомнил мне о проекте SSC и спросил, что мы потеряли, отказавшись от него. Он признал, что, отказавшись от этого проекта, человечество упустило ценную возможность.

Примерно в то же время, когда Конгресс расправился с SSC, налогоплательщики выложили около 150 млрд долларов на борьбу с кризисом в области банковского кредитования; эта сумма многократно превосходила те 10 млрд долларов, в которые обошелся бы Соединенным Штатам SSC. Для сравнения: годовой де-

фицит бюджета США составляет солидную сумму — 600 долларов на каждого американца, а война в Ираке обошлась в 2000 долларов на каждого гражданина страны. Если бы проект SSC был реализован, сегодня мы уже достигли бы гораздо более высоких энергий, чем когда-либо достигнет БАК. А вскоре мы оказались безоружными перед финансовым кризисом 2008 г. и спасательными акциями правительства, которые обошлись налогоплательщикам еще дороже.

Предварительная стоимость БАКа оценивалась в 9 млрд долларов и была вполне сравнима с предполагаемой стоимостью SSC. На каждого европейца приходится около 15 долларов стоимости коллайдера, или, как любит говорить мой коллега по Центру ядерных исследований Луис Альварес-Гауме, европейцы за каждый год строительства БАКа должны были платить не больше, чем за бутылку пива. Очень сложно оценить в деньгах стоимость фундаментальных научных исследований того типа, которые ведутся на БАКе, но ведь именно фундаментальные исследования подстегнули внедрение электричества, полупроводников, Всемирной паутины и практически всех остальных технических новшеств, изменивших нашу жизнь. Кроме того, фундаментальные исследования развивают научное и техническое мышление, которое затем распространяется на все сферы нашей экономики. Может быть, практические результаты исследований на БАКе трудно сформулировать словами, но его научный потенциал очевиден. Мне кажется, нам следует согласиться с тем, что в данном случае европейцы, скорее всего, выиграют, а не проиграют.

Реализация долгосрочных проектов невозможна без веры, упорства и ответственности. К сожалению, в Соединенных Штатах все труднее встретить подобные качества. Прежде американская мечта вела нас к необычайным научным и техническим достижениям. Однако разумное и необходимое долгосрочное планирование становится все более редким явлением. Следует признать, что Европейский союз умеет доводить свои проекты до логического конца. Проект БАКа был задуман четверть века назад и принят к исполнению в 1994 г., однако он настолько сложен и глобален, что лишь теперь начинает приносить плоды.

Более того, CERN сумел привлечь к участию в проекте не только 20 стран — членов Центра, но и 53 государства, не входящие в организацию; все они принимали участие в проектировании, строительстве и испытаниях оборудования; сейчас на БАКе работают ученые из 85 стран. США официально тоже не является членом CERN, но сейчас в основных экспериментах на БАКе американцев участвует больше, чем граждан какой бы то ни было другой страны.

Всего в работе задействовано около 10 000 ученых — примерно половина всех физиков Земли, занимающихся элементарными частицами. Пятая часть от этих десяти тысяч работает в Центре на постоянной основе и живет поблизости. С пуском БАКа столовые Центра перестали справляться с нагрузкой; практически невозможно было пообедать, чтобы не задеть подносом другого физика.

Население Центра многонационально; приезжающего сюда американца поражает, как много различных языков можно услышать в кафе, лабораториях и переходах. Кроме того, американец обязательно заметит непривычную вещь: здесь все курят и пьют вино. Некоторые американцы отмечают также превосходное качество еды в местных кафе и еды вообще. Европейцы с их более изысканным вкусом, как правило, находят это утверждение сомнительным.

Среди многочисленных сотрудников и гостей Центра есть и инженеры, и администраторы, и, естественно, множество физиков, которые непосредственно занимаются экспериментами; также здесь работает более 100 физиков-теоретиков. Центр устроен по иерархическому принципу. Вопросами политики и главными стратегическими решениями занимаются старшие администраторы и Совет. Глава Центра — генеральный директор (DirectorGeneral, DG); для американца название этой должности слегка отдаёт комедией, но на самом деле все объясняется просто: под началом генерального директора работает немало простых директоров. Совет Центра — это руководящий орган, ответственный за основные стратегические решения, в частности за планирование. Особое внимание Совет уделяет Комитету научной по-

литики — главному совещательному органу, который помогает оценивать эксперименты и их научную ценность.

Крупные экспериментальные сообщества с тысячами участников имеют собственную структуру. Работа в них распределяется в соответствии с детекторными компонентами или типом анализа. Конкретная университетская группа может, к примеру, отвечать за какую-то часть аппаратуры или за один из типов возможной теоретической интерпретации результатов. У ученых-теоретиков в CERN больше свободы, чем у экспериментаторов; каждый может работать над любой интересующей его темой. Иногда работа теоретиков имеет отношение к каким-то конкретным экспериментам, но в основном сфера их интересов — идеи, которые вряд ли получится экспериментально проверить в ближайшем будущем.

Тем не менее все без исключения специалисты по физике элементарных частиц с огромным интересом следят за развитием событий на БАКе. Они понимают, что будущие исследования в их области зависят от успешных экспериментов и открытий ближайших 10–20 лет. Они понимают масштабы задачи, но в глубине души согласны, что БАК как проект заслуживает самых восторженных оценок.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ БАКа

Главным архитектором БАКа стал Лин Эванс. Я слышала одно из его выступлений в 2009 г., но встретиться с этим человеком мне довелось лишь на конференции в Калифорнии в начале января 2010 г. Момент был удачным — БАК наконец начал работать, и даже сдержанный валлиец Эванс светился радостью.

Лин прочел тогда чудесный доклад о тернистом пути, который ему пришлось преодолеть в процессе работы над Большим адронным коллайдером. Он рассказал о зарождении идеи коллайдера в 1980-х, когда CERN впервые официально рассмотрел вопрос о возможности его строительства. Затем следовал рассказ о событиях 1984 г., который большинство считает официальным началом истории БАКа. Тогда физики встретились в Лозанне с представителями отрасли машиностроения и представили им

идею — столкнуть между собой два пучка протонов с энергией 10 ТэВ; позже целевая энергия была снижена до 7 ТэВ. Почти через 10 лет, в декабре 1993 г., физики представили в Совет Центра амбициозное предложение — построить БАК за десять лет. В то время план был отвергнут.

Первоначально одним из аргументов против строительства БАКа была серьезная конкуренция со стороны SSC. В октябре 1993 г., с закрытием американского проекта, этот аргумент потерял силу, и БАК стал единственным кандидатом на роль высокоэнергетического ускорителя. Многие физики тогда пришли к выводу, что этот проект может приобрести громадное значение. К тому же предварительные исследования оказались необычайно успешными. Робер Эймар (именно ему предстояло возглавлять Центр в период строительства коллайдера) собрал в ноябре 1993 г. новое совещание, которое пришло к выводу: Большой адронный коллайдер технически реализуем, экономически возможен и безопасен.

Главной трудностью при проектировании БАКа оказались разработка и производство в промышленных масштабах мощных магнитов, способных удерживать ускоренные до высоких энергий протоны. Как мы уже видели в предыдущей главе, размеры существующего тоннеля поставили перед разработчиками сложнейшие технические задачи — ведь диаметр большого кольца был определен заранее, и поэтому требования к напряженности магнитного поля были очень жесткими. Лин радостно описывал нам «швейцарскую точность» первого десятиметрового дипольного магнита-прототипа, который инженеры и физики успешно испытали в 1994 г. Все работало как часы. При первом же пуске напряженность поля удалось поднять до целевого значения 8,73 Тл: начало было многообещающим.

Но, к несчастью, хотя европейское финансирование куда более стабильно, чем американское, непредвиденные трудности все же возникали. Так, бюджет Германии — главного донора Центра — пострадал в результате объединения страны (это произошло в 1990 г.). Германия урезала свои взносы в CERN и вместе с Великобританией выступила против любого серьезного увели-

чения расходов Центра. Кристофер Ллуэллин-Смит — британский физик-теоретик, сменивший нобелевского лауреата Карло Руббиа на посту генерального директора Центра, — как и его предшественник, активно поддерживал проект. Ллуэллин-Смиту удалось отчасти решить финансовую проблему за счет дополнительного финансирования со стороны Швейцарии и Франции — двух стран, на территории которых должен был разместиться коллайдер и которые должны были выиграть больше других в результате его строительства и работы.

На Совет Центра — и продемонстрированные технологии, и бюджетные вливания — произвели сильное впечатление, и проект БАКа был утвержден уже 16 декабря 1994 г. Более того, Ллуэллин-Смит и CERN убедили страны, не входящие в организацию, присоединиться к проекту. В 1995 г. к нему присоединилась Япония, в 1996 г. — Индия, затем Россия и Канада и, наконец, в 1997 г. за ними последовали и США.

Получив дополнительное финансирование, БАК смог обойти оговорку в первоначальном проекте, где предусматривалось два этапа строительства установки, причем на первом этапе предполагалось разместить лишь две трети магнитов. И с научной, и с финансовой точки зрения урезанное магнитное поле было неудачным решением, однако проектировщики пытались таким путем остаться в пределах ежегодных бюджетов. В 1996 г., когда Германия снова снизила свой вклад из-за дополнительных расходов, связанных с объединением, финансовые перспективы проекта стали мрачными, однако в 1997 г. CERN добился разрешения компенсировать эти потери, впервые в своей истории финансируя строительство за счет кредитов.

После истории с бюджетом Лин заговорил о более приятных вещах. Он описал первую *пробную сборку* диполей в декабре 1998 г. — испытание нескольких магнитов, собранных в единую работоспособную комбинацию. Успешное испытание этой сборки подтвердило жизнеспособность проекта и стало важной вехой в истории коллайдера.

В 2000 г. электронно-позитронный коллайдер LEP разобрали, чтобы освободить место для БАКа. И все же, несмотря на то что но-

вый коллайдер был собран в уже существующем тоннеле и унаследовал от своего предшественника некоторую часть персонала, вспомогательных мощностей и инфраструктуры, потребовалось еще немало человеко-часов и ресурсов, прежде чем LEP превратился в БАК.

Строительство БАКа проходило в пять этапов. Сначала строители соорудили выемки и возвели конструкции для экспериментальных установок; затем были налажены коммуникации; на следующем этапе создали криогенную линию для охлаждения ускорителя. Ну и наконец установили все оборудование, включая диполи, все соединители и кабели, а затем система была протестирована в сборке.

Проектировщики CERN с самого начала составили очень точный график, который должен был скоординировать все этапы строительства. Но, как всем известно, «человек предполагает...» Надо ли говорить, что в данном случае все получилось именно так.

То и дело появлялись проблемы с финансированием. Помню, как в 2001 г. физиков охватили жуткое разочарование и тревога; тогда пришлось долго ждать ответа на вопрос, как быстро удастся разрешить возникшие серьезные проблемы с деньгами и продолжить строительство. Руководству Центра удалось справиться с перерасходом средств, но лишь за счет размаха деятельности Центра и его инфраструктуры.

Но даже после разрешения бюджетно-финансовых проблем строительство БАКа шло не слишком гладко. Периодически оно замедлялось из-за целой серии непредвиденных событий.

Никто из тех, кто был занят на сооружении полости для компактного мюонного соленоида CMS (Compact Muon Solenoid), не мог, разумеется, предположить, что экскаваторы наткнутся на остатки галло-римского дворца IV в. Строительство было приостановлено, чтобы археологи могли изучить найденное сокровище; были найдены, в частности, старинные очень ценные монеты. Судя по всему, галло-римляне вводили единую валюту более успешно, чем сегодняшние европейцы: ведь евро до сих пор не вытеснило ни британский фунт, ни швейцарский франк. Особенно раздражает это британских физиков, которые, приезжая в CERN, обнаруживают, что у них нет денег даже на такси.

По сравнению с проблемами CMS сооружение выемки под детектор ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus — Тороидальный аппарат для БАКа) в 2001 г. прошло относительно мирно. Конечно, для этого потребовалось вынуть и вывезти 300 000 тонн скальных пород. Единственная проблема, с которой столкнулись строители, состояла в том, что после выемки породы дно рукотворной пещеры начало потихоньку подниматься — со скоростью около 1 мм в год. Это вроде бы немного, но даже такое движение могло нарушить точную центровку элементов детектора. Поэтому инженерам пришлось устанавливать в котловане чувствительные метрологические датчики. Они настолько эффективны, что регистрируют не только движения детектора ATLAS. Например, они почувствовали, к примеру, цунами 2004 г. и вызвавшее его землетрясение на Суматре, а также более поздние цунами.

Процесс строительства детектора ATLAS глубоко под землей выглядел впечатляюще. Крышка «склепа» для установки была отлита на земле и подвешена на тросах, а стены возводились снизу, пока не достигли свода. В 2003 г. в честь завершения строительства был устроен настоящий праздник, на котором внутри пустого пока сооружения, отдаваясь эхом от стен, играл альпийский рожок; судя по рассказу Лина, это очень развеселило присутствующих. После этого сама экспериментальная установка была спущена по частям в эту подземную пещеру и собрана на месте.

А вот строительство CMS встречало на своем пути все новые проблемы. Во время земляных работ они возникали не раз; оказалось, что стройка ведется не только на месте ценных археологических находок, но и над подземной рекой. В тот год шли сильные дожди, и проектировщики, инженеры и физики с удивлением обнаружили, что 70-метровый шахтный ствол, предназначенный для доставки вниз материалов, самостоятельно погрузился еще на 30 см вниз. Пришлось заморозить грунт вокруг стенок ствола и таким образом стабилизировать его. Кроме того, была укреплена порода вокруг полости при помощи дополнительных опорных стенок и гигантских шурупов длиной до 40 м. Не удивительно, что строительство установки CMS продолжалось дольше запланированного.

Отчасти спасло ситуацию то, что сама установка CMS достаточно компактна, и экспериментаторы вместе с инженерами решили собрать ее заранее. Разумеется, на поверхности строить и ставить на место отдельные узлы установки намного проще и быстрее — ведь здесь достаточно места и можно многие операции проводить параллельно. Кроме того, можно было заниматься сборкой, не отвлекаясь на то и дело возникавшие проблемы с грунтом.

Однако нетрудно представить себе, сколь устрашающе выглядела перспектива спуска этой громадной установки в готовое гнездо — я как раз подумала об этом во время первого визита на CMS в 2007 г. В самом деле, опустить установку на место оказалось очень непросто. Самый крупный ее узел опускали в громадную выемку при помощи специального крана; происходило это ужасающе медленно, со скоростью 10 м в час. Без такого «черепашьего шага» и точнейшей системы мониторинга было не обойтись — ведь между установкой и стенками камеры был всего лишь десятисантиметровый зазор. С ноября 2006 г. по январь 2008 г. в камеру было опущено 15 крупных узлов детектора. Время было рассчитано точно, и последняя часть установки встала на место незадолго до запланированной даты пуска БАКа.

Вслед за проблемами CMS на строительстве самого БАКа в июне 2004 г. разразился новый кризис; были выявлены нарушения в системе распределения жидкого гелия, известной как QRL. Инженеры CERN, разбиравшиеся в проблеме, обнаружили, что французская фирма, строившая систему, заменила проектный материал тем, что Лин назвал «пятидолларовой временкой». Новый материал пошел трещинами, что привело к термическому сжатию внутренних труб. Дефектная деталь оказалась не единственной, и проверять пришлось все соединения в системе.

К тому моменту криогенная линия была уже частично установлена, а многие детали изготовлены и ждали своей очереди на складах. Чтобы избежать новых задержек, инженеры решили сами отремонтировать уже изготовленные компоненты. Работа по изготовлению новых деталей, а также необходимость извлекать и заново устанавливать крупные узлы оборудования обошлись проекту в годовую задержку. По крайней мере это намного мень-

ше, чем те десять лет, на которые могла бы, по мнению Лина и др., растянуться вся эта история, если бы в дело вступили юристы.

Без труб и готовой криогенной системы устанавливать магниты было невозможно. Поэтому 1000 магнитов стояла на парковочной площадке Центра, дожидаясь своей очереди. Даже с учетом того, что на местной парковке частенько гостят представительские BMW и «Мерседесы», ничего дороже, чем эти магниты суммарной стоимостью миллиард долларов, эта площадка никогда не видела. Никто их не украл, но открытая парковка — не лучшее место для хранения высокотехнологичного оборудования; это неизбежно повлекло за собой новые задержки, связанные тем, что магниты перед установкой пришлось восстанавливать до первоначального состояния.

В 2005 г. возник еще один едва ли не фатальный кризис, на этот раз связанный с внутренним триплетом, изготовленным в американской Лаборатории имени Ферми и в Японии. Внутренний триплет обеспечивает окончательную фокусировку протонных пучков перед столкновением. Он состоит из трех квадрупольных магнитов, снабженных криогенной системой и системой распределения энергии, — отсюда и название. Этот самый внутренний триплет не выдержал вакуумных испытаний. Хотя отказ, естественно, означал неприятности и задержки, инженеры все же смогли привести триплет в норму прямо в тоннеле, так что потери времени оказались не такими уж большими.

В целом 2005 г. оказался более успешным, чем его предшественник. В феврале была сдана под монтаж камера для CMS. Тогда же произошло и другое знаковое событие — в тоннель был спущен первый криодипольный магнит. Без магнитной конструкции БАК невозможен, поэтому установке и наладке криодипольных магнитов придавалось громадное значение. Благодаря тесному сотрудничеству Центра с частными промышленными предприятиями магниты были изготовлены в срок и обошлись сравнительно недорого. Конструкция магнита была разработана в Центре ядерных исследований, но производились они на предприятиях Франции, Германии и Италии. Первоначально (в 2000 г.) инженеры, физики и конструкторы CERN разместили заказ на 30 диполей,

которые затем тщательно исследовали с точки зрения качества и стоимости; лишь после этого (в 2002 г.) была заказана основная масса магнитов — более тысячи штук. Стремясь обеспечить качество, единообразие и минимизировать цену, CERN сохранил за собой ответственность за заказ основных компонентов и сырья. При этом Центру пришлось перевезти по Европе 120 000 т различных материалов — десять больших фур каждый день колесили по европейским дорогам на протяжении четырех лет. И это всего лишь небольшая часть предприятия по строительству БАКа.

После доставки готовые магниты были протестированы и аккуратно опущены через вертикальную шахту в тоннель у подножья гор Юра. Оттуда на специальных тележках их доставляли на свои места вдоль тоннеля. Поскольку магниты огромны и лишь несколько сантиметров отделяло их при транспортировке от стенок тоннеля, тележки управлялись автоматически; ориентировались они по нарисованной на дне тоннеля линии, которую распознавали оптические датчики. Чтобы по возможности избежать вибраций, тележка двигалась со скоростью около мили в час. Это означает, что на транспортировку магнита от места спуска на противоположную сторону кольца уходило семь часов.

В 2006 г., после пяти лет строительства, был получен последний из 1232 диполей. В 2007 г. главной новостью стало то, что последний магнит опущен в тоннель и установлен на место; затем было успешно проведено первое пробное охлаждение до целевой температуры -271 градусов по Цельсию секции ускорителя длиной 3,3 км. Тогда же впервые все кольцо магнитов было подключено к источнику энергии, и в обмотках сверхпроводящих магнитов пробной секции тоннеля начали циркулировать токи в несколько тысяч ампер. Это событие по традиции тоже было отпраздновано с шампанским.

Непрерывный охлаждающий контур был замкнут в ноябре 2007 г., и все шло неплохо, пока не грянула новая катастрофа, связанная на этот раз с так называемыми стыковочными модулями РИМ. Мы в США не всегда очень уж внимательно отслеживали ситуацию на БАКе, но на этот раз новость разлетелась мгновенно. Коллега из Центра поделился со мной серьезной обеспокоен-

ностью: специалисты опасались, что отказ одного из элементов конструкции может обернуться глобальной проблемой. Что если аналогичные элементы по всей длине кольца имеют тот же производственный дефект?

Проблема связана с температурной разницей почти в 300 градусов между только что собранным «теплым» коллайдером и тем же коллайдером в охлажденном рабочем состоянии. Естественно, такая разница очень сильно действует на материалы, из которых изготовлена установка. Так, металлические части сжимаются при охлаждении и расширяются при нагревании. Сами диполи во время рабочей фазы уменьшаются в размерах на несколько сантиметров. Для 15-метрового объекта это, казалось бы, немного, но для поддержания сильного и однородного магнитного поля, способного корректно провести протонные пучки по тонкой трубке, обмотки должны быть расположены в пространстве с точностью до десятой доли миллиметра.

Чтобы компенсировать тепловое охлаждение и нагрев, диполи снабжены специальными *пальцами*, которые частично выходят из пазов, обеспечивая электрический контакт при охлаждении установки, а при нагреве вновь прячутся в пазы. Однако из-за некачественных заклепок эти пальцы, вместо того чтобы уйти в пазы, были смяты. Хуже того, из-за этого могли пострадать все соединения, и было совершенно не ясно, какие из них дефектны, а какие нет. Стояла сложнейшая задача — распознать и заменить каждую дефектную заклепку, не затягивая при этом работы на многие годы.

К чести инженеров Центра, они нашли простой способ воспользоваться существующими электрическими датчиками, установленными вдоль траектории пучка через каждые 53 м и обеспечивающего работоспособность электроники при пролете пучка. Инженеры изготовили специальный прибор размером с шарик для пинг-понга с генератором импульсов внутри, который мог перемещаться по той самой трубке, по которой должен был двигаться протонный пучок. Гонимый сжатым воздухом, «шарик» мог пройти целый сектор длиной 3 км, вызывая срабатывание электроники при прохождении каждого датчика. Если же электроника

не регистрировала его на очередном контрольном пункте, это означало, что прибор уткнулся в разрушенный «палец». После этого инженеры приступали к ремонту на конкретных стыках, не вскрывая каждое соединение вдоль трассы.

После разрешения этой проблемы дорога к пуску БАКа, казалось, была расчищена. Все оборудование смонтировали, и коллайдер можно было запускать. В 2008 г. множество людей на планете держало за БАК кулаки; наконец-то пришло время первого пробного пуска.

СЕНТЯБРЬ 2008-го: ПЕРВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Большой адронный коллайдер формирует протонные пучки и после серии ускоряющих «толчков» «впрыскивает» их в финальный кольцевой ускоритель. Там эти пучки направляются по кольцевой траектории вдоль тоннеля, чтобы, сделав круг, возвратиться в точности в ту же точку. Протоны получают возможность многократно пройти по кольцевому маршруту, прежде чем их начнут периодически отклонять и весьма эффективно сталкивать. Необходимо было последовательно протестировать каждый из этих этапов.

Первой вехой на этом пути стала проверка того, действительно ли пучки протонов могут циркулировать по тоннелю. Оказалось, что могут. Поразительно, но, когда после многих лет борьбы и с техническими, и с финансовыми проблемами в сентябре 2008 г. CERN запустил установку, два протонных пучка были сформированы практически без сучка, без задоринки; результат превзошел все ожидания. В тот день впервые два пучка протонов по очереди прошли по громадному тоннелю в противоположных направлениях. На этом шаге ввели в действие механизм инъекции; запустили средства управления контроля; убедились, что магнитное поле может удерживать протоны на трассе, а магниты имеют заданные параметры и работают синхронно. В первый раз эта последовательность событий была реализована вечером 9 сентября. Все работало по плану или даже лучше на следующий день, когда проводились испытания.

Все, кто участвовал в проекте, описывают 10 сентября 2008 г. как день, который они никогда не забудут. Приехав в Центр через месяц, я на каждом шагу слышала рассказы об эйфории, охватившей в тот день всех. Люди с невероятным возбуждением следили за двумя световыми точками на экране компьютера. Первый пучок почти сумел вернуться в точку старта; потребовалась лишь небольшая подстройка, и менее чем через час пучок стал идти в точности по расчетной траектории. Сначала он проходил кольцевую трассу лишь несколько раз, но каждый последующий «впрыск» немного подправляли, и это число без проблем достигло нескольких сотен. Вскоре после этого удалось настроить и второй пучок; на это потребовалось около полутора часов.

Лин был так счастлив, что не подумал о передаче, которая велась в прямом эфире из пультовой коллайдера, где инженеры следили за отработкой проекта. Передача оттуда шла напрямик в Интернет, где за ними мог следить любой желающий. За точками на экранах компьютеров следило так много людей, что сайт Центра рухнул. Люди по всей Европе заворуженно наблюдали за тем, как инженеры настраивали траектории протонных пучков, чтобы частицы двигались точно по кольцевой траектории. В самом Центре в это время царило ликование; физики и инженеры собирались в аудиториях, чтобы следить за происходящим на экранах. В этот момент перспективы коллайдера представлялись по-настоящему радужными. Но всего девятью днями позже эйфорию сменило настоящее отчаяние.

Предстояло провести два новых значительных испытания. В первых, пучки в кольце БАКа следовало разогнать до более высоких энергий, чем в первом испытании, где протоны вообще не разгонялись, а циркулировали по кольцу с той же энергией, с какой туда попали. Вторая часть плана предусматривала столкновение пучков, которое, разумеется, должно было стать самой серьезной вехой на пути к полноценной работе коллайдера.

Однако в последний момент — 19 сентября — испытание было сорвано, несмотря на все усилия и предусмотрительность инженеров. Причем неудача была катастрофической. Простая ошибка при пайке медной оболочки, соединяющей два магнита, и недо-

статочное количество работающих выпускных клапанов в емкости с жидким гелием — и первое столкновение протонов состоялось лишь через год!

Когда ученые начали увеличивать ток в последнем восьмом секторе, «полетела» силовая шина между двумя магнитами. *Силовая шина* — это сверхпроводящий провод, соединяющий пару сверхпроводящих магнитов (рис. 27). Виной всему — некачественное сращение кабеля между двумя магнитами. На месте плохого контакта возникла электрическая дуга, пронзившая контейнер с гелием и внезапно превратившая 6 т жидкого гелия, которые в обычных условиях нагревались бы постепенно, в газ. Сверхпроводимость была потеряна.

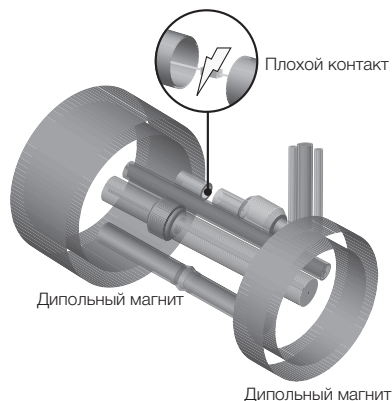


РИС. 27. Силовая шина соединяет магниты между собой. Авария 2008 г. произошла из-за плохой пайки на одном из таких соединений

Громадное количество гелия, одновременно превратившееся в газ, породило сильнейший гидравлический удар — практически взрыв. Меньше чем за 30 секунд энергия этого удара сдвинула с места несколько магнитов и уничтожила вакуум в протонной трубке, повредила изоляцию и испортила 600 м трубки сажей. 10 диполей были уничтожены полностью, а еще 29 повреждены так сильно, что их пришлось заменить. Ясно, что на подобный исход никто не рассчитывал. В зале управления, кстати говоря, даже не подозревали о происходящем, пока кто-то не заметил, что из-за истека-

ющего в тоннеле гелия выключился один из компьютеров. Вскоре присутствующие поняли, что пучок тоже пропал.

Дополнительные подробности этого печального происшествия я узнала через несколько недель, во время очередного посещения Центра. Не забывайте, кстати, что конечная цель коллайдера и происходящих в нем столкновений — это концентрация в одной точке 14 ТэВ (14 трлн электрон-вольт) энергии в системе отсчета, связанной с центром масс. В первом пуске решено было провести столкновение на энергии всего лишь около 2 ТэВ, чтобы убедиться, что все работает как надо. Позже, во время рабочих пусков, инженеры планировали увеличить энергию столкновения до 10 ТэВ (по 5 ТэВ на пучок).

Однако из-за поломки трансформатора 12 сентября произошла небольшая задержка, и планы изменились. Несколько дней, пока в тоннеле шли ремонтные работы, ученые продолжали испытывать секторы по отдельности, доводя показатели до величин, соответствовавших энергии пучка 5,5 ТэВ, и успели опробовать семь секторов из восьми. Они убедились, что все семь секторов способны работать в расчетном режиме при высоких энергиях; на восьмой сектор времени не хватило. Тем не менее было решено двигаться вперед и, поскольку никаких проблем выявлено не было, в первом же пробном пуске провести высокоэнергетические столкновения.

Все работало прекрасно до тех пор, пока инженеры не попытались вывести последний сектор на высокоэнергетический режим. Авария, надолго выведшая коллайдер из строя, произошла, когда поступила команда поднять энергию пучка примерно до 5,5 ТэВ; для этого ток в обмотках магнитов нужно было увеличить с 7000 до 9300 А. Это был, по существу, последний момент, когда что-то неожиданное еще могло случиться, — и оно случилось!

За год все в тоннеле было приведено в порядок; ремонтные работы обошлись примерно в 40 млн долларов. Проект располагал достаточным количеством запасных магнитов, чтобы заменить те 39 штук, которые уже невозможно было отремонтировать. В сумме замены потребовали 53 магнита (14 квадрупольных и 39 ди-

польных), расположенные в аварийном секторе тоннеля. Кроме того, пришлось очистить больше 4 км вакуумной трубки, установить новые ограничители на 100 квадрупольных магнитов и добавить 900 новых предохранительных клапанов для стравливания давления гелия. Было также установлено 6500 новых датчиков, обеспечивающих безопасность магнитной системы.

Самый большой риск, пожалуй, представляло наличие в системе 10 000 соединений между магнитами, каждое из которых потенциально могло вызвать те же проблемы. Опасность была выявлена, но можно ли было сказать наверняка, что проблема не возникнет вновь где-нибудь в другой точке кольца? Необходимо было предусмотреть механизмы, способные выявить эту проблему, прежде чем она приведет к аварии. Инженеры CERN приняли вызов и вновь оказались на высоте. Теперь доработанная система регистрирует даже крохотные падения напряжения, свидетельствующие о присутствии сопротивления в каких-то соединениях и возможном нарушении герметичности криогенной системы, охлаждающей установку до рабочих температур. Однако было решено еще немного отложить пуск коллайдера, чтобы доработать систему выпускных гелиевых клапанов и проверить лишний раз все контакты, а также медные кожухи самих магнитов. Конечно, это означало, что высшие энергии столкновений, на которые рассчитан БАК, будут достигнуты позже. Тем не менее новые системы, призванные отслеживать и стабилизировать состояние коллайдера, дали Лину и другим ученым уверенность в том, что в системе не возникнет критическое давление и катастрофы даже в самых тяжелых условиях удастся избежать.

В каком-то смысле нам всем повезло, что инженеры и физики сумели устранить все эти недостатки, прежде чем коллайдер был выведен на рабочий режим, а экспериментальные установки подверглись облучению. Взрыв обошелся в год задержки, в течение которого ученые не могли гонять по тоннелю реальные пучки и пробовать их сталкивать. Год есть год, но, если говорить о поиске фундаментальной теории вещества, который ведется уже 40 лет, это совсем немного — а ведь человек пытается проникнуть в тайны Вселенной уже не одну тысячу лет.

21 октября 2008 г. администрация CERN провела все же одно запланированное заранее мероприятие. В тот день я вместе с полутора тысячами других физиков и мировых лидеров присутствовала на праздновании официального открытия БАКа недалеко от Женевы, которое было с немалым оптимизмом заранее — за несколько лет — запланировано на эту дату. Естественно, когда событие планировалось, никто не мог предвидеть, что за несколько недель до торжества произойдут катастрофические события. Праздничный день был полон торжественных речей, музыки и — что важно на любом культурном событии в Европе — хорошей еды. Несмотря на тревоги, связанные с сентябрьским инцидентом, все были полны оптимизма и надеялись, что эксперименты на коллайдере прольют свет на некоторые из тайн, окружающих темное вещество и фундаментальные природные взаимодействия.

Многие сотрудники Центра были недовольны тем, что празднование пришлось на такое трудное и тревожное время, но я считала, что это событие — символ успеха международного сотрудничества. Праздник был устроен не в честь великих открытий; он должен был подчеркнуть потенциал БАКа и энтузиазм, с которым множество стран приняли участие в его создании. Некоторые речи звучали поистине вдохновляюще. Так, французский премьер-министр Франсуа Фийон отметил значение фундаментальных исследований и то, что мировой финансовый кризис не должен мешать научному прогрессу. Президент Швейцарии Паскаль Кушпен говорил о благородном труде на благо общества. Профессор Жозе Мариану Гагу, португальский министр науки, техники и высшего образования, говорил о том, что наука выше бюрократии, а стабильность необходима для по-настоящему крупных научных проектов. Многие иностранные партнеры в тот день впервые посетили CERN. Рядом со мной во время церемонии сидел человек, работавший в Женеве в представительстве Евросоюза, но ни разу прежде не бывавший в Центре. После знакомства с Центром он сказал мне, что собирается в самом ближайшем будущем вновь приехать туда с друзьями и коллегами.

НОЯБРЬ 2009-го: НАКОНЕЦ-ТО ПОБЕДА

Вновь дело дошло до запуска БАКа 20 ноября 2009 г., и на этот раз все прошло с поразительным успехом. Мало того, что протонные пучки впервые за год закружились по тоннелю... Через несколько дней они наконец столкнулись, породив потоки частиц, которые направились напрямиком в экспериментальные детекторы. Лин признал, что БАК работает даже лучше, чем он ожидал; это замечание показалось мне несколько странным — удивительно слышать такое от человека, трудами которого эта замечательная установка воплотилась в жизнь.

Маурицио Пьерини, молодой итальянский ученый, объяснил мне, что имел в виду Лин. Тесты, которые при настройке LEP в 1980-е годы заняли 25 суток (тогда по этому же тоннелю циркулировали пучки электронов и позитронов), на этот раз завершились меньше чем за неделю. Протонные пучки получились замечательно точными и стабильными. И все протоны послушно двигались по заданной траектории — отклонений почти не было. Оптика работала, стабильность сохранялась, трасса была восстановлена успешно. Реальные пучки полностью соответствовали тому, что показывали компьютерные модели.

Надо сказать, что экспериментаторы были очень удивлены, когда в 17:00 в воскресенье, всего через пару дней после начала новых испытаний, им сообщили, что на следующий день будут проведены первые столкновения. Считалось, что между возобновлением генерации пучков после аварии и первыми реальными столкновениями, которые можно будет наблюдать и измерить, должно пройти какое-то время. А оказалось, что возможность испытать регистрирующую аппаратуру на реальных протонных пучках — а не на космических лучах, которыми экспериментаторы пользовались, ожидая пуска коллайдера — уже близка. Однако сообщили им об этом только накануне, а это означало, что нужно срочно перенастраивать компьютерные *триггеры*, которые должны сообщать компьютерам, какие именно столкновения интересуют экспериментаторов. Маурицио живо описал охватившую всех тревогу: ведь никто не хотел упустить первую реальную возможность провести эксперимент. На тэва-

троне, к примеру, результаты первого теста оказались испорчены из-за случайного совпадения частот циркуляции пучка и записывающей системы. Никому не хотелось повторения подобной неудачи. Конечно, наряду с тревогой все заинтересованные лица чувствовали сильнейшее возбуждение.

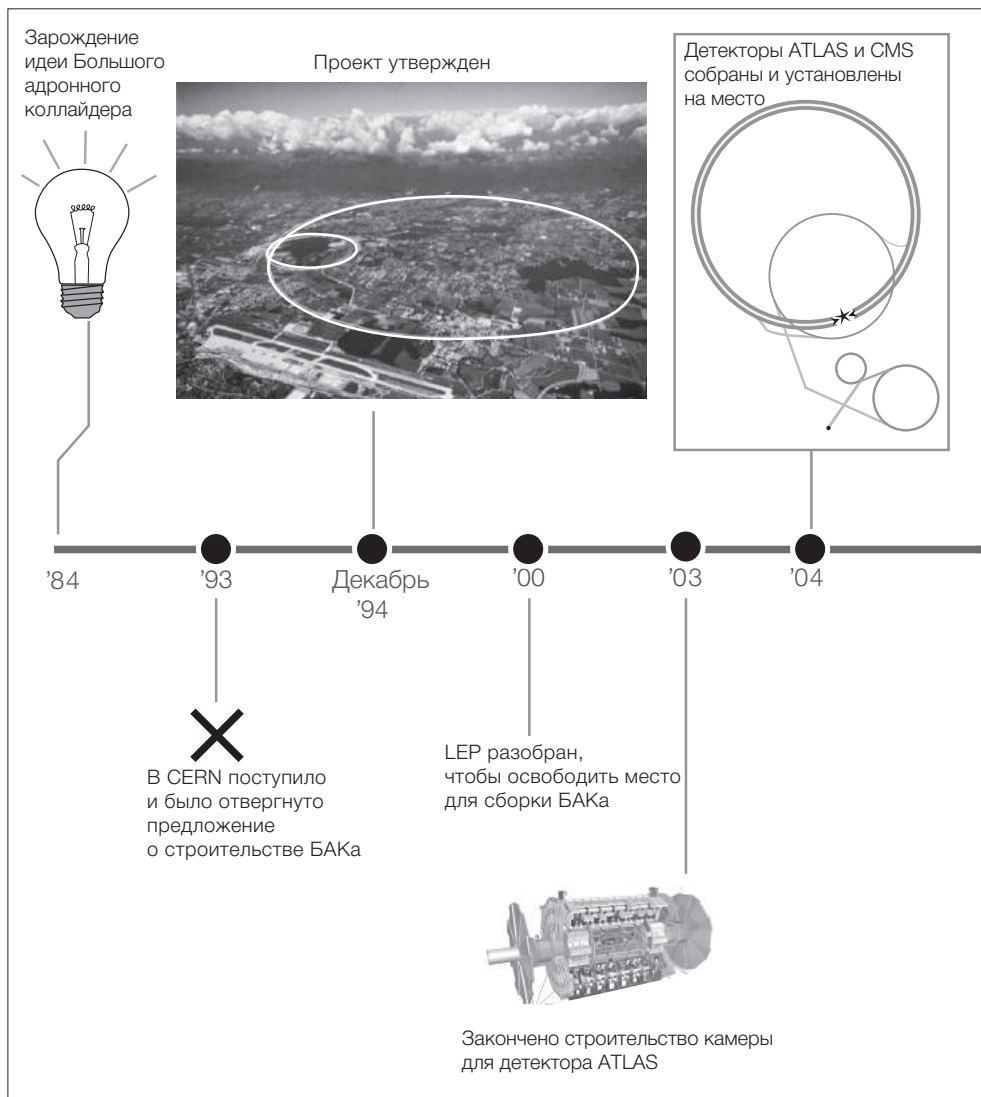
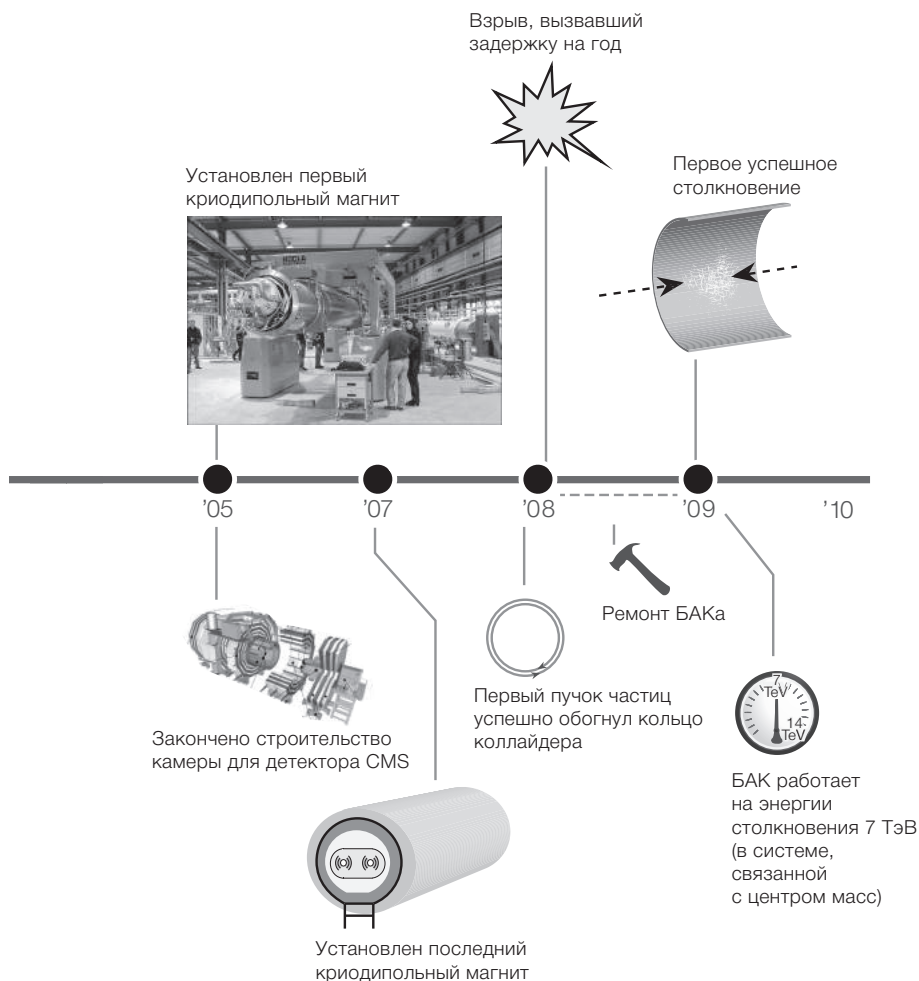


РИС. 28. Краткий очерк истории БАКа

23 ноября 2009 г. в Большом адронном коллайдере наконец-то произошло первое столкновение частиц. Миллионы протонов столкнулись со встречным сгустком таких же протонов при инжекционной энергии в 900 ГэВ. Это означало, что после многих лет ожидания запланированные эксперименты нач-



нут записывать результаты первых протонных столкновений в кольце БАКа.

Вскоре после этого протоны в кольце начали слегка разгонять; сначала были получены пучки с энергией 1,18 ТэВ — самые высокоэнергетические циркулирующие пучки за всю историю исследований. Всего через неделю после первых столкновений, 30 ноября, эти высокоэнергетические протоны встретились. Суммарная энергия столкновения, составившая 2,36 ТэВ, превзошла все ранее достигнутое и побила рекорд Лаборатории имени Ферми, продержавшийся восемь лет.

Результаты столкновения пучков регистрировали три различных детектора, и за следующие несколько недель были зафиксированы десятки тысяч таких столкновений. Эти столкновения, конечно, не обещали новых физических теорий, но оказались невероятно полезны для тестирования экспериментальных детекторов и исследования *фона* Стандартной модели — событий, которые не раскрывали еще ничего нового, но могли бы в принципе помешать реальным открытиям.

Физики-экспериментаторы всего мира с радостью встретили успех БАКа и достигнутые на нем рекордные энергии. Примечательно, кстати, что этот результат был получен в последний момент — еще чуть-чуть, и в середине декабря установку предстояло остановить до марта будущего года, так что вопрос стоял просто: либо декабрь, либо ждать еще несколько месяцев. Джефф Ричман, экспериментатор из Санта-Барбары, работающий на БАКе, рассказал мне об этом на конференции по темной материи. Оказалось, что он заключил пари с одним физиком из Лаборатории имени Ферми о том, сможет ли БАК до конца 2009 г. получить более высокоэнергетические столкновения, чем тэватрон в Фермилабе. По его веселому настроению было ясно, кто выиграл пари.

18 декабря 2009 г. волна интереса временно спала — после того судьбоносного прогона БАК был закрыт на каникулы. Лин Эванс завершил свой рассказ обсуждением планов на 2010 г. и обещанием заметно повысить энергию столкновений. Планировалось до конца года поднять ее до 7 ТэВ — значительный рост по сравнению с тем, чего удавалось достичь ранее. Эванс был оптимистичен

и уверен в себе и в коллайдере — как оказалось, не без оснований; установка действительно без проблем подняла энергию до этой цифры.

После множества затруднений и задержек Большой адронный коллайдер начал наконец работать по графику (см. хронику проекта на рис. 28). Предполагалось, что вплоть до 2012 г. БАК будет работать на энергии 7 ТэВ или, возможно, чуть больше, а потом закроется по крайней мере на год для подготовки к работе на более высоких энергиях*. После этого инженеры попытаются поднять энергию столкновения как можно выше и довести ее по возможности до запланированных 14 ТэВ, а также поднять интенсивность пучка, чтобы увеличить число столкновений.

После повторного пуска в 2009 г. и детекторы, и сама установка работали как часы, так что заключительные слова Лина прозвучали вполне убедительно: «Приключения, связанные со строительством БАКа, завершились. Пришло время приключений, связанных с научными открытиями».

* В 2011 г. были достигнуты энергии 3,5 ТэВ на пучок, а в апреле 2012 г. ее подняли до 4 ТэВ на пучок, то есть до энергии столкновения 8 ТэВ в системе центра масс. В течение 2011 г. на ATLAS и CMS было зарегистрировано по 560 трлн столкновений, а план на 2012 г. составлял по 1500 трлн на каждой из установок. — *Прим. пер.*

ГЛАВА 10

О ЧЕРНЫХ ДЫРАХ, КОТОРЫЕ ПОГЛОТЯТ ВЕСЬ МИР

Физики уже давно с нетерпением ждали пуска БАКа. Научный прогресс невозможен без новых данных, а физика элементарных частиц, по крайней мере в части высокоэнергетических взаимодействий, давно уже живет на голодном пайке. Пока не появятся данные с БАКа, никто не сможет сказать, какие из многочисленных теорий и предположений о том, что лежит в основе Стандартной модели, верны. Но, прежде чем сделать попытку разобраться в наиболее интересных вариантах и возможностях, я хочу посвятить следующие несколько глав важным вопросам о рисках и неопределенностях, без которых невозможно корректно интерпретировать экспериментальные данные БАКа.

Мы начнем обсуждение с черных дыр в Большом адронном коллайдере и с того, почему они удостоились куда большего внимания, чем заслуживали.

ПОЧЕМУ ВОПРОС О ЧЕРНЫХ ДЫРАХ ВООБЩЕ ВОЗНИК?

В настоящее время физики рассматривают множество вариантов того, что сможет в конце концов породить БАК. В 1990-е гг. теоретики и экспериментаторы с особым удовольствием рассматривали новый тип сценариев, по которым при рабочих энергиях БАКа должны изменяться не только свойства частиц, но и сама гравитация. Одно интересное потенциальное следствие из этих

теорий привлекло широкое внимание общественности, особенно далекой от физики. Речь идет о возникновении микроскопических низкоэнергетических черных дыр. Такие многомерные черные дыры, действительно, могут возникнуть, если верными окажутся предположения о дополнительных пространственных измерениях, высказанные, в частности, Раманом Сандрамом и мною. Физики оптимистично предполагают, что рождение таких черных дыр станет подтверждением теорий о модифицированной гравитации.

Однако все восприняли подобные предсказания с энтузиазмом! И в США, и в других странах нашлись люди, которых всерьез обеспокоила перспектива того, что появившиеся таким образом черные дыры могут всосать в себя все на Земле. На публичных лекциях меня часто спрашивали о таком сценарии развития событий. Я объясняла, почему такой опасности не существует. К несчастью, не все имели возможность узнать об этом из первых рук.

Сегодня Уолтер Вагнер — директор ботанического сада на Гавайских островах и юрист по образованию. А когда-то ему приходилось заниматься и ядерной безопасностью. Вместе с испанцем Луисом Санчесом, автором альтернативной теории времени, Вагнер стал одним из самых воинствующих алармистов. Эти двое зашли так далеко, что подали в суд штата Гавайи иск против Европейского центра ядерных исследований, Министерства энергетики США, Национального научного фонда и американского ускорительного центра Фермилаб, пытаясь остановить пуск коллайдера. Если бы их целью было всего лишь затягивание пуска БАКа, то, пожалуй, проще было бы пустить голубя, который сбросил бы сверху на коллайдер кусок булки и тем самым причинил массу неприятностей и задержек (такая история, кстати, действительно имела место, но птица, судя по всему, сделала это по собственной инициативе). Но Вагнеру и Санчесу хотелось добиться полного запрета на пуск БАКа.

Вагнер и Санчес были не единственными, кого беспокоили черные дыры. Другой юрист, адвокат Гарри Леманн, написал книгу, в которой всерьез обсуждалось, кто окажется «крайним» на случай, если коллайдер засосет в себя всю Землю. В ней он собрал, кажется, все существующие опасения на этот счет. Блог, по-

священный этой теме, сосредоточился в основном на страхах, связанных со взрывом 2008 г., и на вопросе, можно ли вновь пускать эту страшную машину. Опасались авторы блога, правда, не технических неполадок и новой катастрофы, такой же или еще более серьезной, как 19 сентября, а тех реальных физических явлений, которые могли возникнуть в рабочем тоннеле БАКа.

Воображаемые угрозы, которые Леманн и многие другие связывали с БАКом, сосредоточились на черных дырах, которые, как они полагали, могут целиком поглотить нашу планету. Паникеры жаловались на то, что в исследовании Группы оценки безопасности проекта БАКа отсутствует надежная оценка рисков в сфере квантовой механики, и вспоминали высказывание Ричарда Фейнмана и других физиков о том, что «никто до конца не понимает квантовую механику». Алармисты задавались вопросом: можно ли рисковать Землей ради любой, сколь угодно великой цели, даже если риск считается крохотным, и кто должен брать на себя груз ответственности за такое решение.

Хотя, конечно, мгновенная гибель Земли — бесспорный повод для тревоги, на самом деле последний вопрос был бы более уместен в дискуссии, к примеру, о глобальном потеплении. Содержание этой и следующей глав, я надеюсь, полностью убедит вас в том, что лучше озаботиться более насущными проблемами (к примеру, обесцениванием ваших пенсионных накоплений), чем страдать по поводу возможного исчезновения Земли в черной дыре. Хотя нарушение графика работ и бюджетные проблемы породили определенный риск для БАКа, теоретические соображения вкупе с исследованиями продемонстрировали всем, что насчет черных дыр можно не волноваться.

Поясню, чтобы не оставалось недомолвок: все сказанное не означает, что вопрос вообще не следовало задавать. Ученые должны предвидеть возможные опасности, которые могут возникнуть в результате их действий. Но в вопросе о черных дырах физики пришли к выводу, что реальных поводов для тревог нет. Прежде чем перейти к более детальному обсуждению рисков, я хочу поговорить о том, почему люди вообще задумались о черных дырах в коллайдере и почему страхи конца света были в конечном счете

беспочвенными. То, о чем пойдет речь в этой главе, несущественно не только для нашей темы в целом, но даже и для следующей главы, в которой я расскажу, что будет исследовать БАК. Но на этом примере можно продемонстрировать, как думают физики, и подготовить почву для последующего более широкого рассмотрения рисков.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

Черные дыры — это объекты с таким сильным гравитационным притяжением, что все, что случайно или намеренно к ним приближается, попадает в ловушку. Что бы ни попало в пределы радиуса черной дыры, известного как *горизонт событий*, захватывается ею и навсегда остается внутри. Даже свет подпадает под действие громадного гравитационного поля черной дыры. Ничто не может выйти из черной дыры наружу. Любой объект, встретившись с черной дырой, становится ее частью, потому что законы гравитации неумолимы и «сопротивление бесполезно».

Черная дыра образуется в том случае, когда в небольшом объеме собирается достаточно вещества, чтобы тяготение стало доминирующей силой. Размеры области, в которую необходимо поместить все вещество для образования черной дыры, зависят от количества вещества, то есть от его массы. Небольшую массу придется собирать в соответствующий небольшой объем, а большую можно распределить по несколько большему пространству. Так или иначе, когда плотность повышается до громадных величин, а критическая масса оказывается внутри соответствующего объема, сила тяготения становится непреодолимой — и формируется черная дыра. В классической теории (то есть в соответствии с расчетами, сделанными без оглядки на квантовую механику) черные дыры растут, поглощая близлежащее вещество. Кроме того, согласно той же классической теории черные дыры никогда не испаряются и не исчезают.

До 1990-х гг. никто не думал о создании черных дыр в лаборатории, ведь минимальная масса, необходимая для этого, громадна по сравнению с массой обычной частицы или с энергией тогдаш-

них коллайдеров. В конце концов, черные дыры воплощают в себе главенство гравитации, тогда как сила тяготения любой известной нам частицы пренебрежимо мала — гораздо меньше, чем связанные с ней другие силы, такие как электромагнетизм. Если сила тяготения такова, какой мы ее считаем, то во Вселенной с тремя пространственными измерениями столкновения частиц не дотягивают до необходимых энергий. Однако черные дыры во Вселенной все же существуют — более того, они, судя по всему, имеются в центрах большинства крупных галактик. Но энергия, необходимая для создания черной дыры, по крайней мере на 15 порядков превосходит все, что мы можем получить в лаборатории.

Так почему же мысль о возникновении черных дыр в Большом адронном коллайдере вообще пришла кому-то в голову? Причина в том, что физики в какой-то момент поняли: пространство и гравитация могут оказаться совершенно не такими, как то, что мы до сих пор наблюдали. Так, сила тяготения может распространяться не только на три известные нам пространственные измерения, но и на пока невидимые *дополнительные* измерения, которые до сих пор никому не удалось обнаружить. Эти измерения не продемонстрировали заметного влияния ни в одном из опытов, сделанных до сих пор учеными. Но не исключено, что на энергиях БАКа гравитация, связанная с дополнительными измерениями, — если она, конечно, существует — проявит себя так, что этот факт можно будет зарегистрировать.

В главе 17 мы поговорим об этом подробнее, пока же скажу только, что существование дополнительных пространственных измерений, упомянутое в главе 7, — это довольно экзотическая идея. Тем не менее у этой теории есть разумное теоретическое обоснование; мало того, она, возможно, сумеет объяснить необычайную слабость известного нам гравитационного взаимодействия. Не исключено, что в многомерном мире гравитация сильна, а в нашем наблюдаемом трехмерном мире чрезвычайно слаба. Или — согласно теории Рамана Сандрама и моей — в дополнительном измерении она может быть переменной, так что где-то в другом месте гравитация сильна, а в нашей конкретной области многомерного пространства слаба. Мы пока не знаем, верны ли подоб-

ные теории. С ними пока далеко не все ясно, но они принадлежат к числу тех, в которые эксперименты на БАКе, возможно, внесут определенность.

В сценариях, связанных с этими теориями, подразумевается, что при исследовании малых расстояний, на которых могут проявиться эффекты дополнительных измерений, может проявиться совершенно новая для нас сущность гравитационного взаимодействия. Теории, предусматривающие существование дополнительных измерений, предполагают, что физические свойства Вселенной на больших энергиях и малых расстояниях, которые мы скоро сможем исследовать, должны измениться. Если причина некоторых наблюдаемых явлений кроется в многомерности Вселенной, то гравитационные эффекты на энергиях БАКа должны оказаться намного сильнее, чем считалось ранее. Если так, то и результаты экспериментов на БАКе будут определяться не только тем тяготением, которое мы знаем, но и гораздо более сильным тяготением Вселенной с дополнительными измерениями.

При такой силе тяготения нельзя исключить, что протоны когда-нибудь столкнутся в крохотной области и концентрация энергии в ней достигнет уровня, необходимого для рождения многомерных черных дыр. Если эти черные дыры просуществуют достаточно долго, они начнут всасывать в себя вещество и энергию. А черная дыра, занимающаяся этим бесконечно, действительно опасна. Именно такой катастрофический сценарий предлагали алармисты.

К счастью, однако, классический расчет черных дыр — тот, что опирается исключительно на теорию гравитации Эйнштейна — не последнее слово в науке. На счету Стивена Хокинга много достижений, но одно из прославивших его открытий заключается в том, что квантовая механика дает веществу, попавшему в ловушку черной дыры, надежду на избавление. Квантовая механика допускает дегенерацию и гибель черных дыр.

Поверхность черной дыры горяча, причем ее температура зависит от массы дыры. И черные дыры излучают, как горячие угольки, посылая энергию во всех направлениях. При этом дыра продолжает поглощать все, что к ней приближается, но согласно

законам квантовой механики частицы испаряются с ее поверхности и уносят энергию прочь, то есть потихоньку отнимают ее у черной дыры. Благодаря этому процессу даже крупная черная дыра может со временем излучить всю свою энергию и исчезнуть.

Энергии БАКа в лучшем случае еле-еле хватит для возникновения черной дыры, так что образоваться там смогут (если вообще смогут!) только очень маленькие черные дыры. Небольшая по размеру и чрезвычайно горячая черная дыра — а в БАКе могут возникнуть именно такие объекты — скорее всего, исчезнет мгновенно. Дегенерация, вызванная излучением Хокинга, эффективно и полностью истощит ее. Поэтому, даже если черные дыры действительно возникнут в БАКе, они просуществуют слишком мало, чтобы нанести какой бы то ни было вред. Большие черные дыры испаряются медленно, но крохотные черные дыры теряют всю свою энергию почти мгновенно. В этом отношении, кстати говоря, они ведут себя достаточно странно. Большинство объектов — угольки, к примеру — остывают по мере излучения. Черные дыры, наоборот, нагреваются, и самые высокие температуры имеют самые маленькие дыры, поэтому и излучают они эффективнее других.

Я принадлежу к племени ученых, поэтому все в моем рассказе должно быть безупречно. Технически в приведенном мною доводе, основанном на излучении Хокинга и дегенерации черных дыр, существует лазейка. Мы до конца понимаем устройство только достаточно больших черных дыр — в этом случае нам известны в точности все уравнения, описывающие их гравитационную систему. Хорошо известные и проверенные законы тяготения обеспечивают черным дырам надежное математическое описание. Однако у нас нет настолько же достоверной информации о том, что представляют собой очень маленькие черные дыры. В этом случае в игру уже вступает квантовая механика — не только при описании испарения черных дыр, но и при описании самой природы этих объектов.

Никто не знает наверняка, как решать уравнения, в которых и квантовая механика, и гравитация играют существенную роль. Пока лучшая попытка физиков сделать это — теория струн, но мы

до конца не понимаем все ее следствия. Это означает, что в этой картине мира могут еще выявиться белые пятна. Крохотные дыры вряд ли будут вести себя точно так же, как большие черные дыры, свойства которых мы выводим при помощи классической теории гравитации. Может быть, маленькие черные дыры исчезают не с той скоростью, с какой мы ожидаем.

Но даже это — не слишком серьезная прореха в нашей картине. Понятно, что опасность могут представлять только те дыры, которые способны расти. Те же, которые не в состоянии поглотить достаточно вещества, проблем создать не смогут. Единственный потенциальный риск — ситуация, в которой крохотные черные дыры, прежде чем испариться, смогут вырасти до опасных размеров. Но, даже не зная в точности, что представляют собой квантовые черные дыры, мы можем оценить время их жизни. Оно настолько меньше того, которое требуется черной дыре, чтобы стать опасной, что даже обсуждать всерьез это нельзя. Поведение маленьких черных дыр не должно сильно отличаться от поведения знакомых нам нестабильных тяжелых частиц. Точно так же, как эти частицы, маленькие черные дыры должны очень быстро распадаться.

Однако некоторых по-прежнему беспокоило, что вывод Хокинга, хоть и не противоречит ни одному из известных законов природы, все же может оказаться неверным, а черные дыры — полностью стабильными. В конце концов, излучение Хокинга никто никогда не видел, поскольку известные черные дыры излучают слишком слабо и их излучение невозможно зарегистрировать имеющимися у нас средствами. Физики весьма скептически — и справедливо — относятся к этим возражениям, потому что в противном случае им пришлось бы отказаться не только от излучения Хокинга, но и от множества других доказанных аспектов физических теорий. Более того, рассуждения, на основании которых сделан вывод об излучении Хокинга, предсказывают и другие явления, которые ученым уже приходилось наблюдать, и это дает нам дополнительную уверенность в их обоснованности.

Тем не менее излучение Хокинга никто пока не видел. Поэтому, чтобы стопроцентно застраховаться от ошибок, физики зада-

ли себе вопрос: если излучения Хокинга не существует и черные дыры, которые, возможно, возникнут в БАКе, окажутся стабильными, то будут ли они представлять опасность?

К счастью, относительно безопасности черных дыр существует весьма сильное доказательство. Причем рассуждения здесь никак не связаны с вопросом о том, испаряются ли черные дыры; кроме того, эти рассуждения не теоретические, а напротив, основаны исключительно на наблюдениях. В июне 2008 г. два физика, Стив Гиддингс и Микеланджело Мангано, а вслед за ними и Группа оценки безопасности БАКа опубликовали на основании эмпирических данных подробные статьи, в которых убедительно исключили любые катастрофические сценарии, связанные с черными дырами*. Гиддингс и Мангано рассчитали частоту, с которой во Вселенной могли бы рождаться черные дыры, и влияние, которое они должны были бы оказать на окружающий нас мир, если бы были стабильными. Авторы заметили, что хотя здесь, на Земле, мы пока не умеем получать энергии, необходимые для возникновения черных дыр, в космосе такие энергии наблюдаются довольно часто. Существуют космические лучи — высокоэнергетические частицы, — которые довольно часто сталкиваются с другими объектами. Мы не имеем возможности подробно изучить результаты этих встреч, как изучаем результаты экспериментальных столкновений, но можно с уверенностью сказать, что многие из них происходят с энергией по крайней мере не меньшей, чем в БАКе.

Таким образом, если теории, связанные с дополнительными измерениями, верны, то черные дыры могут возникать внутри любых астрономических объектов — даже Земли или Солнца. Гиддингс и Мангано рассчитали, что в некоторых системах (частота образования черных дыр зависит от числа дополнительных измерений) черные дыры увеличиваются слишком медленно и не представляют опасности: даже через миллиарды лет развития черные дыры в большинстве своем остаются крохотными. В других моделях черные дыры могут поглотить достаточно вещества

* <http://lsag.web.cern.ch/lsag/LSAG-Report.pdf>.

и стать крупными, но обычно они несут на себе электрический заряд. Если бы они и в самом деле представляли опасность, то, зародившись внутри Земли или Солнца, оказались бы в ловушке, и оба названных объекта давно исчезли бы. А раз Земля и Солнце вроде бы остаются на месте, то получается, что заряженные черные дыры — даже те, что стремительно поглощают вещество — не могут представлять опасности.

Таким образом, единственным потенциально опасным сценарием остается тот, в котором черные дыры не несут заряда, но могут расти достаточно быстро, чтобы представлять угрозу. В этом случае гравитационное притяжение Земли — единственная сила, способная замедлить их экспансию — оказалось бы недостаточно сильным и не смогло бы их остановить. Такие черные дыры могли бы пройти Землю насквозь, и мы уже не можем сослаться на существование Земли, делая выводы об их потенциальной опасности. Однако Гиддингс и Мангано исключили и эту возможность, потому что другие, гораздо более плотные астрономические объекты — а именно нейтронные звезды и белые карлики — обладают достаточным гравитационным притяжением, чтобы захватить и остановить черные дыры.

Космические лучи со сверхвысокой энергией при столкновении с веществом плотных звезд с сильным гравитационным полем давно уже породили бы черные дыры именно того типа, которые потенциально могут возникнуть в коллайдере. Нейтронные звезды и белые карлики намного тяжелее Земли — их плотность настолько велика, что одной силы тяжести хватило бы, чтобы остановить черную дыру и удержать ее внутри. Если бы черные дыры действительно рождались при таких столкновениях и к тому же представляли бы опасность, они давно уничтожили бы эти объекты — а мы достоверно знаем, что они существуют миллиарды лет. К тому же на небе их много — а значит, черные дыры, если и существуют, то опасности определенно не представляют. Даже если они появлялись, то, должно быть, исчезали почти мгновенно — или в худшем случае оставляли после себя крохотные безобидные стабильные следы. У них просто не хватило бы времени нанести какой-либо вред.

В дополнение к сказанному следует заметить, что в процессе поглощения вещества и уничтожения космических объектов черные дыры испускали бы большое количество видимого света, который никто никогда не видел. Существование Вселенной в том виде, какой мы ее знаем, и отсутствие каких бы то ни было сигналов, свидетельствующих о разрушении белых карликов, — это, на мой взгляд, весьма убедительное доказательство того, что черные дыры, родившиеся в БАКе, безопасны. Состояние Вселенной позволяет нам сделать вывод о том, что Земле от родившихся в БАКе черных дыр ничего не угрожает.

Можете вздохнуть с облегчением. А я тем не менее продолжу тему черных дыр — на этот раз с собственной точки зрения — точки зрения человека, который работает в близкой области и занимается, в частности, темой дополнительных пространственных измерений, необходимых для рождения низкоэнергетических черных дыр.

Я заинтересовалась этим вопросом давно, еще до того, как пресса раздула тему черных дыр в Большом адронном коллайдере. У меня во Франции есть друг и коллега, работавший прежде в Европейском центре ядерных исследований. Теперь он занят в проекте под названием Auger* и изучает космические лучи при их прохождении через атмосферу в направлении земной поверхности. Он жаловался мне на то, что БАК отнимает у других исследователей ресурсы, которые позволили бы изучать те же энергетические диапазоны не в коллайдере, а непосредственно в составе космических лучей. Но, поскольку эксперименты с космическими лучами намного менее управляемы и точны, чем эксперименты в искусственной среде, то единственными событиями, которые там можно зафиксировать, были бы те, что оставляют после себя автограф: к примеру, испаряющиеся черные дыры.

Вместе с Патриком Мидом, работавшим тогда в Гарварде, мы решили вычислить число подобных событий, которые им, возможно, удастся зарегистрировать. Тщательные расчеты показали, что их намного меньше, чем в первоначальном прогнозе физи-

* Назван в честь французского физика Пьера Виктора Оже. — *Прим. пер.*

ков. Нас не тревожила перспектива катастрофических событий ни на Земле, ни в космосе, и вы, я надеюсь, согласитесь, что реальной угрозы с этой стороны не существует.

Когда мы убедились, что проект Auger не обнаружит никаких черных дыр, даже если объяснение определенных явлений в физике частиц посредством дополнительных измерений верно, нам захотелось проверить предсказания некоторых физиков о том, что в БАКе черные дыры будут появляться регулярно и в большом количестве. Мы выяснили, что и эти предположения ошибочны. Хотя при приблизительных оценках действительно получалось, что в таких сценариях БАК будет порождать многочисленные черные дыры, наши расчеты показали, что на самом деле все обстоит иначе.

Нас с Патриком не тревожила перспектива образования опасных черных дыр. Мы хотели понять, смогут ли в БАКе образоваться маленькие, безобидные, стремительно испаряющиеся многомерные черные дыры (по которым можно было бы судить о существовании гравитации высших измерений). У нас получилось, что это будет происходить очень редко, если вообще будет. Разумеется, возникновение крохотных черных дыр, если оно возможно, стало бы фантастическим подтверждением теории, которую предложили мы с Раманом. Но я как ученый обязана уважать научные расчеты. Наши результаты не позволяли нам ожидать слишком многого. Мы с Патриком (как и большинство остальных физиков) не надеемся, что в коллайдере будут формироваться даже совсем маленькие черные дыры.

Именно так устроена наука. У кого-то возникает идея, он прорабатывает ее грубо и приближенно, а затем через какое-то время сам он или кто-то другой возвращается к этой идее вновь и проверяет детали. Тот факт, что первоначальную гипотезу после дополнительной проверки пришлось переработать, не свидетельствует о ее несовершенстве — это всего лишь признак того, что наука — дело сложное, а прогресс в ней часто достигается небольшими шажками. На промежуточных этапах иногда делаются самые разные поправки, и лишь потом мы окончательно останавливаемся на лучшем варианте — теоретически и экспе-

риментально. Как ни печально, мы с Патриком не успели закончить вычисления вовремя и предотвратить тем самым шумиху в прессе, связанную с черными дырами, а также упомянутый в начале главы судебный иск.

Мы понимали, однако, что в коллайдере — вне зависимости от того, появятся ли там черные дыры — будут появляться другие интересные свидетельства высокоэнергетического взаимодействия частиц, которые сообщат нам что-то важное о фундаментальной природе взаимодействий и гравитации. И, возможно, мы сумеем при достаточно низких энергиях получить свидетельства в пользу существования высших измерений. До тех пор, пока мы не увидим этих экзотических явлений, нечего и надеяться на появление черных дыр. Но не исключено, что эти другие сигналы сами по себе смогут прояснить для нас некоторые аспекты гравитации.

Эта работа поясняет еще одну важную особенность науки. Хотя при переходе от одного масштаба к другому парадигмы иногда сдвигаются достаточно резко, в экспериментальных данных подобных сдвигов не наблюдается практически никогда. Иногда уже полученные данные предваряют сдвиг парадигмы (к примеру, когда квантовая механика в конце концов объяснила давно известные спектральные линии). Но часто небольшие отклонения данных, полученных в ходе активных экспериментов, от предсказанных величин служит лишь прелюдией к появлению куда более впечатляющих свидетельств. Даже опасные приложения научных знаний появляются постепенно. В каком-то смысле ученых действительно можно обвинить в наступлении эры ядерного оружия, но нельзя сказать, что кто-то из них вдруг, неожиданно, открыл атомную бомбу. Для ее создания недостаточно было понять, что масса эквивалентна энергии. Физикам пришлось много работать, чтобы привести вещество во взрывоопасную форму.

Черные дыры вызывали бы тревогу, если бы могли вырасти до гигантских размеров, а расчеты и наблюдения показывают, что этого не произойдет. Но даже если бы это было возможно, сначала о гравитационном сдвиге ученым сказали бы крохотные черные дыры или по крайней мере то гравитационное воздействие на столкновение частиц, о котором только что говорилось.

В качестве итога повторю еще раз: черные дыры не представляют никакой опасности. Но на всякий случай имейте в виду: я готова взять на себя полную ответственность, если черная дыра, возникшая в Большом адронном коллайдере, поглотит нашу планету. А пока вы можете последовать примеру моих первокурсников и заглянуть на сайт <http://hasthelargehadroncolliderdestroyedtheworldyet.com>.

ГЛАВА 11

РИСКОВАННОЕ ДЕЛО

Нейт Силвер, создатель блога FiveThirtyEight, лучше всего предсказавшего итоги президентских выборов 2008 г., в 2009 г. взял у меня интервью для книги о прогнозировании, над которой работал. В тот момент мы стояли перед лицом экономического кризиса, войны в Афганистане, ростом затрат на здравоохранение, потенциально необратимых изменений климата и других неотвратимых угроз. Я согласилась встретиться с ним отчасти из собственного интереса, потому что меня интересовали взгляды Нейта на то, когда и почему сбываются прогнозы.

Тем не менее меня несколько озадачил тот факт, что Нейт выбрал для интервью меня. Я предсказывала только результаты столкновений элементарных частиц, а гости Лас-Вегаса, не говоря уже о правительстве, вряд ли заключают об этом пари. Подумалось, что Нейт, возможно, будет спрашивать про черные дыры в БАКе. Но, несмотря на отвергнутый к тому моменту судебный иск, мне не верилось, что Нейта интересует этот сценарий. Ведь настоящих-то опасностей — взять хотя бы перечисленные выше — вокруг гораздо больше!

Нейта и, правда, не интересовала эта тема. Он задавал мне гораздо более тонкие вопросы о том, как физики рассуждают и откуда берут предсказания относительно БАКа и других экспериментов. Он всерьез интересуется прогнозированием, а ученые постоянно занимаются этим. Нейт хотел больше узнать о том, как мы выбираем вопросы, которые затем ставим перед собой, и какие

методы используем в прогнозах. Эти же вопросы мы с вами вскоре рассмотрим более подробно.

Но, прежде чем говорить об экспериментах, которые ставятся на БАКе, и рассуждать о том, что мы можем там обнаружить, мы еще немного поговорим о рисках. Странное сегодняшнее отношение к рискам и путаница в вопросе о том, когда и как следует их предсказывать, безусловно, заслуживают нашего внимания. Новости каждый день сообщают о многочисленных трагедиях, причиной которых стали непредвиденные или не принятые во внимание проблемы. Возможно, физика элементарных частиц и представление о масштабных различиях помогут нам внести некоторую ясность в этот запутанный вопрос. Судебный иск по поводу черных дыр в БАКе был, разумеется, глупостью, но и он сам, и другие, по-настоящему насущные проблемы сегодняшнего дня поневоле заставляют задуматься о том, как важно заранее предусмотреть возможные риски.

Предсказания в физике элементарных частиц сильно отличаются от оценки рисков в реальном мире, и мы с вами в одной-единственной главе можем лишь очень поверхностно затронуть вопросы оценки и снижения рисков. Более того, пример с черными дырами не стоит обобщать, поскольку в данном случае риска как такового практически не существует. Тем не менее он может оказаться полезным при рассмотрении вопросов оценки и учета рисков. Мы увидим, что, хотя черные дыры в БАКе никогда никому не угрожали, некорректный прогноз часто бывает очень опасен.

РИСКИ СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

Рассматривая предположения о черных дырах в БАКе, физики экстраполировали существующие научные теории на еще не исследованные энергетические масштабы. Обоснованные научные рассуждения и четкие экспериментальные данные позволили нам сделать вывод, что ничего катастрофического произойти не может, хотя мы и не знали на тот момент, что покажут реальные эксперименты. Ученые пришли к единому мнению о том, что опасность от черных дыр в коллайдере пренебрежимо мала и никак

не может представлять проблемы, даже на промежутках времени, сравнимых со временем жизни Вселенной.

Такой подход в корне отличается от того, как оценивают другие потенциальные риски. Я до сих пор не понимаю, как экономисты и финансисты несколько лет назад могли не заметить надвигающегося финансового кризиса и почему после того, как кризис удалось купировать, похоже, начали готовить почву для следующего. Экономисты и финансисты в своих прогнозах не высказывали единого мнения о том, что все будет в порядке, и все же никто не вмешался, пока экономика не оказалась на грани полного краха.

Осенью 2008 г. я принимала участие в одной междисциплинарной конференции, во время которой мне не в первый и не в последний раз задали вопрос о черных дырах. Вице-президент Goldman Sachs International, сидевший справа от меня, тихонько пошутил, что настоящая черная дыра, с которой нам придется иметь дело, — это экономика. Аналогия оказалась чрезвычайно удачной.

Черные дыры захватывают все, что оказывается поблизости, и преобразуют при помощи сильных внутренних сил. Черную дыру полностью характеризуют ее масса, заряд и величина, известная как угловой момент импульса, поэтому дыра не отслеживает, что именно и как попадает внутрь; захваченная информация, судя по всему, теряется. Черные дыры делятся этой информацией, но очень медленно, через тонкие корреляции в излучении, которое просачивается наружу. Мало того, крупные черные дыры испаряются медленно, тогда как мелкие исчезают почти мгновенно. Это означает, что если мелкие черные дыры не могут протянуть слишком долго, то крупные, по существу, слишком велики, чтобы погибнуть*. Это вам ничего не напоминает? Информация, а также долги и деривативы, попавшие в банки, оказались в ловушке и превратились в не поддающиеся расшифровке сложные активы.

Сегодня вокруг слишком много глобальных явлений, и мы, по существу, проводим крупномасштабные неуправляемые экс-

* Выражением *to big to fail* («слишком велики, чтобы погибнуть») в 2008 г. описывались несколько крупнейших банков и страховых компаний США, которые пришлось спасать от банкротства за счет вливания бюджетных средств. Власти опасались, что крах подобной системообразующей структуры может вызвать каскад дальнейших банкротств и общий коллапс экономики. — *Прим. пер.*

перименты. Однажды в радишоу Coast to Coast меня спросили, буду ли я продолжать эксперимент — каким бы потенциально интересным он ни был, — если существует вероятность подвергнуть опасности весь мир. К неудовольствию консервативной аудитории радиоканала я ответила, что мы уже проводим такой эксперимент с выбросами углерода в атмосферу. Почему это тревожит лишь немногих?

Как и в случае с открытиями в научном мире, резкие изменения редко происходят без всяких предварительных признаков. Мы не знаем наверняка, что климат изменится катастрофически, но мы уже видим признаки перемен — тающие ледники и т. д. Возможно, в 2008 г. экономика рухнула внезапно, но многие финансисты знали достаточно и успели покинуть рынки до катастрофы. Новые финансовые инструменты и высокое содержание углерода потенциально способны подтолкнуть грядущие радикальные перемены. В подобных ситуациях вопрос заключается не в том, существует ли риск. Здесь нам нужно определить, какие следует принять меры предосторожности, чтобы устранить возможные опасности, и решить, какой уровень рисков считать приемлемым.

РАСЧЕТ РИСКОВ

В идеале одним из первых шагов должен быть расчет рисков. Иногда мы, люди, просто неверно оцениваем вероятности. Когда журналист Джон Оливер расспрашивал Уолтера Вагнера, одного из истцов в деле против БАКа, о черных дырах, то Вагнер полностью потерял доверие, которое к нему, может быть, кто-то испытывал; он оценил вероятность того, что БАК уничтожит Землю, в 50%, потому что это событие либо произойдет, либо нет. Джон Оливер недоверчиво отозвался на это: «Не уверен, что вероятность работает так, как вы говорите». К счастью, Оливер прав, и мы способны оценивать вероятности лучше, чем Вагнер.

Но сделать это иногда очень непросто. Подумайте, к примеру, о вероятности губительных изменений климата, или о вероятности возникновения кризиса на Ближнем Востоке, или о судьбе экономики. Существуют и гораздо более сложные ситуации.

Дело не только в том, что уравнения, описывающие риски, сложно решаются. Дело в том, что мы зачастую просто не знаем, что это за уравнения. В вопросе о климатических изменениях мы можем строить модели и изучать исторические записи. В двух других ситуациях мы можем поискать исторические аналогии или попытаться построить упрощенные модели. Но во всех трех случаях любой прогноз будет смазан сильнейшими неопределенностями.

Точный и надежный прогноз — дело сложное. Даже когда мы изо всех сил стараемся учесть в модели все существенные нюансы, входные данные и предположения, лежащие в ее основе, могут существенно повлиять на результат. Оптимистичный прогноз не имеет смысла, если модель построена на предположениях, связанных с серьезными неопределенностями. Чтобы прогноз имел какую-то ценность, необходимо тщательно рассматривать эти неопределенности и никогда о них не забывать.

Прежде чем обратиться к другим примерам, позвольте мне привести в качестве иллюстрации к проблеме забавный случай. В начале своей научной карьеры я обратила внимание на то, что Стандартная модель допускает для определенной величины гораздо более широкий диапазон, чем предсказывалось ранее, за счет квантово-механической составляющей, размер которой зависел от недавно (на тот момент) измеренной и удивительно большой массы t -кварка. Когда я представила свои выводы на конференции, мне предложили построить график зависимости предсказанной мной величины от массы t -кварка. Я отказалась, зная, что эта величина зависит от слишком многих параметров и что оставшиеся неопределенности не позволят построить здесь простую кривую. Однако среди коллег нашелся «специалист», который, недооценив неопределенности, все-таки построил график (мне почему-то кажется, что сегодня многие прогнозы в реальной жизни делаются именно так), и некоторое время на его предсказание достаточно широко ссылались. Со временем, когда эту величину измерили, и она не попала в предсказанный диапазон, такая несогласованность нашла простое и верное объяснение: эксперт был слишком оптимистичен в оценке неопределенностей. Очевидно, лучше избегать подобного подхода как в науке,

так и в любой жизненной ситуации. Мы хотим, чтобы прогнозы имели смысл, а это возможно только при тщательном учете неопределенностей.

Реальные ситуации бывают еще более «упрямы» и требуют, чтобы мы еще осторожнее обращались с неопределенностями и неизвестными. Нужно с оглядкой подходить к прогнозам, в которых невозможно учесть или просто не учтены все эти вещи.

Одна из проблем прогнозирования связана с корректной оценкой системных рисков, которые почти всегда очень трудно перевести в количественную форму. В любой крупной взаимосвязанной системе меньше всего внимания уделяется крупномасштабным элементам, которые «тянут» за собой модели множественных отказов, возникающих из-за многочисленных взаимосвязей между меньшими частями. Информация может потеряться при передаче или просто остаться незамеченной. Такие системные проблемы способны многократно умножить последствия любых других потенциальных рисков.

Будучи членом комиссии по безопасности исследовательских программ NASA, я не раз сталкивалась с подобными структурными проблемами. Как известно, подразделения космического агентства раскиданы по всей стране. И если о своей технике и оборудовании отдельные центры агентства еще заботятся, то качество связи между ними никого особенно не интересует и денег в эту инфраструктуру вкладывается куда меньше. В путешествиях между подразделениями информация легко теряется. В адресованном мне электронном письме аналитик по рискам Джо Фрагола, работавший в NASA и аэрокосмической отрасли и проводивший на этот счет специальное исследование, писал: «Мой опыт говорит о том, что анализ рисков, проведенный без совместного участия специалистов по конкретным вопросам, команды системной интеграции и риск-аналитиков, не имеет смысла. В частности, так называемые риск-анализы под ключ превратились в упражнения по статистике и представляют в настоящее время лишь академический интерес». Слишком часто аналитикам приходится поступаться либо широтой, либо подробностью, хотя в долгосрочной перспективе важно и то и другое.

Одним из самых наглядных примеров подобной ошибки (из целого ряда других) стал инцидент на платформе British Petroleum в Мексиканском заливе в апреле 2010 г. В лекции, прочитанной в Гарварде в феврале 2011 г., Черри Мюррей, декан Гарвардского университета и член Национальной комиссии по утечке нефти на платформе Deepwater Horizon, назвал ошибки руководства BP одной из серьезнейших составляющих аварии. Ричард Сирс, бывший вице-президент компании Shell Oil Co., который в комиссии был старшим советником по науке и техническим вопросам, рассказал, что руководство BP мыслило, как он выразился, «гиперлинейно»; оно пыталось решать проблемы по очереди, одну за другой и даже не пыталось сформировать общую картину происходящего.

Физика элементарных частиц — высокоспециализированная и сложная отрасль, цель которой — выделить простые элементарные составляющие и научиться строить четкие прогнозы на базе наших гипотез. Наша задача — получить доступ к маленьким расстояниям и большим энергиям, а не разбираться в сложных взаимосвязях. Хотя мы зачастую не знаем, какая из предложенных моделей верна, мы можем предсказать — для каждой конкретной модели, — какого рода событий следует ожидать, к примеру, когда протоны в коллайдере столкнутся друг с другом. А когда мелкие масштабы входят в более крупные, то эффективные теории этих крупных масштабов говорят нам, какое место занимают в них мелкие масштабы и какие ошибки мы можем совершить, если проигнорируем такие детали.

Однако в большинстве реальных ситуаций нет того четкого и понятного разделения по масштабам, о котором мы говорили в главе 1. Несмотря на то что иногда мы пользуемся одними и теми же методами, уже несколько нью-йоркских банкиров успели заявить, что «финансы — это не раздел физики». В банковском деле без знаний о взаимодействиях на мелких структурных уровнях, как правило, невозможно предвидеть крупномасштабные результаты тех или иных действий.

Отсутствие четкого понимания границ между масштабами может привести к катастрофическим последствиям. Возьмем

коллапс банка Barings. До своего падения Barings, основанный в 1762 г., был старейшим коммерческим банком Британии. Он финансировал наполеоновские войны, покупку Луизианы и строительство канала Эри. Тем не менее в 1995 г. несколько неудачных ставок, сделанных одним-единственным трейдером в крохотной сингапурской конторе, его разорили.

Чуть ближе к нам по времени махинации Джозефа Кассано из страховой компании AIG едва не привели к гибели компании и создали угрозу крупного финансового коллапса уже в мировом масштабе. Кассано возглавлял относительно небольшое (400 человек) подразделение AIG Financial Products в составе этой компании. Дела AIG обстояли относительно стабильно до тех пор, пока Кассано не начал использовать кредитно-дефолтные свопы (сложный финансовый инструмент, продвигаемый банками и относящийся к категории внебиржевых деривативов) для хеджирования ставок по обеспеченным долговым обязательствам (биржевым деривативам).

Задним числом мы знаем, что его схема хеджирования представляла собой пирамиду. Тем не менее группа Кассано легко довела объем внебиржевых деривативов до 500 млрд долларов, из которых более 60 млрд долларов было завязано на низкокачественные ипотечные кредиты. Если бы, как в физике, мелкие подразделения объединялись в крупные системы, то информация об их действиях (или их результаты) в надлежащем порядке появилась бы на более высоком уровне и руководитель среднего звена смог бы без труда вмешаться в ситуацию. Но разделение масштабов в компании, к несчастью, широко нарушалось, причем без всякой на то необходимости; в результате махинации Кассано остались практически незамеченными. Его деятельность не регулировалась. Эти внебиржевые деривативы были рассредоточены по всему миру, и никто не разглядел потенциальных последствий такой практики. Когда разразился кризис низкокачественной ипотеки, AIG оказалась к нему не готова и рухнула под тяжестью убытков. Заплатить по ее долгам пришлось американским налогоплательщикам.

Регулирующие органы следили (до некоторой степени) за стандартными параметрами безопасности отдельных компа-

ний, но никто не рассматривал и не оценивал систему в целом и встроенные в нее взаимосвязанные риски. Сложные системы с перекрывающимися долгами и обязательствами нуждаются в лучшем понимании внутренних связей и всеохватывающем способе оценки, сравнения и принятия решений по рискам и компромиссам в интересах будущих прибылей. Эта проблема относится практически к каждой крупной системе.

Отсюда мы приходим к еще одному фактору, затрудняющему расчет рисков и управление ими: человеческая психика, с одной стороны, и рыночная и политическая системы, с другой, по-разному понимают долгосрочные и краткосрочные риски — иногда разумно, но чаще с позиции сиюминутной выгоды. Большинство экономистов понимали, что рыночные пузыри не могут бесконечно расти. Риск состоял не в том, что пузырь может лопнуть (неужели кто-то всерьез верил, что цены на недвижимость будут вечно удваиваться за небольшой промежуток времени?), а в том, что он лопнет в ближайшем будущем. Пользоваться ростом пузыря или даже раздувать его (пусть даже вы знаете, что поддерживать это раздувание до бесконечности невозможно) не всегда глупо и близоруко, но вы должны быть готовы в любой момент забрать свою прибыль (или бонусы) и прикрыть дело.

Если говорить об изменении климата, то мы не знаем, какими показателями можно описать таяние гренландской ледяной шапки. Если же мы захотим определить, начнет ли она таять в определенный период времени, то вероятности окажутся еще более неопределенными. Но незнание конкретных чисел — не повод прятать голову в лед (или в талую воду).

Мы с трудом находим общий язык в вопросах о рисках, связанных с изменением климата, и о том, как и когда нужно принимать меры; причина в том, что изменения в окружающей среде нарастают относительно медленно. И мы не знаем, как определить цену любого нашего действия или бездействия. Если бы изменения климата были резкими, а их последствия — драматическими, мы бы с гораздо большей готовностью соглашались на немедленные меры. (Разумеется, как бы быстро мы ни действовали, к тому моменту было бы уже поздно.) Это означает,

что некатастрофические изменения климата тоже заслуживают внимания.

Но, даже если вероятность определенного исхода хорошо известна, человек по природе своей склонен по-разному оценивать маловероятные события с катастрофическими результатами и весьма вероятные, но не столь драматичные события. Мы гораздо чаще слышим об авиакатастрофах и терактах, чем о дорожно-транспортных происшествиях, хотя в них ежегодно гибнет гораздо больше людей. Люди обсуждали черные дыры, ничего не понимая ни в физике, ни в вероятностях, потому что последствия катастрофического сценария казались очень страшными. С другой стороны, множество относительно мелких рисков совершенно не привлекают внимания, потому что их последствия не слишком заметны. Даже подводное бурение до аварии в Мексиканском заливе многие считали совершенно безопасным.

Еще одна связанная с этим проблема состоит в том, что самые большие прибыли и потери возникают на «хвостах» вероятностного распределения — среди наименее вероятных событий, которые мы к тому же знаем хуже всего. В идеале хорошо было бы проверить наши расчеты при помощи среднесрочной оценки или усреднения предыдущих схожих ситуаций. Но если прежде ничего подобного не происходило (или если мы игнорируем такую возможность), то у нас просто нет данных для статистической оценки. Когда риск или возможная выгода на «хвостах» распределения достаточно велики, то именно они фигурируют в прогнозах — если, конечно, вам заранее известно, что они собой представляют. Ясно только, что если событий слишком мало и усреднять нечего, то традиционные статистические методы неприменимы.

Причиной финансового кризиса стали события, которые не попали в поле зрения экспертов. Немало людей сумело заработать деньги, основываясь на предсказуемых аспектах экономики, но к самым нежелательным сценариям привели события, которые считались весьма маловероятными. Моделируя надежность финансовых инструментов, специалисты, как правило, использовали данные лишь за несколько последних лет и не учитывали возможность, что в экономике может наступить спад или что он

будет таким резким. Оценки того, следует ли регулировать финансовые инструменты, основывались на данных за короткий промежуток времени, причем такой, на протяжении которого рынки только росли. Позже специалисты вынуждены были признать принципиальную возможность падения рынков, но оценка возможных масштабов этого падения оказалась сильно занижена и невозможно было верно предсказать подлинную цену, которую экономике придется заплатить за недостаточное регулирование. Практически никто не обращал внимания на «маловероятные» события, подталкивавшие мир к кризису. Поэтому риски, которые в ином случае оказались бы очевидными, даже не рассматривались. На самом же деле даже маловероятные события необходимо учитывать, если они могут оказать на ситуацию существенное влияние.

Оценку рисков сильно затрудняет тот факт, что исходные посылки, на которых она основана, тоже могут оказаться ошибочными, и вероятность этого, в свою очередь, очень сложно оценить. А без этого любые оценки становятся следствием предубеждений их авторов и, естественно, внушают законное недоверие. Кроме того, помимо личных предпочтений, скрытых в исходных посылах, многие решения в области практической политики должны приниматься с учетом неизвестного количества неизвестных — факторов, которые невозможно или не удалось предвидеть. Иногда мы просто не в состоянии предугадать в точности именно то маловероятное событие, которое позже породит проблемы. Все это может превратить любые попытки прогнозирования в пустые упражнения для ума.

СМЯГЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ РИСКОВ

К счастью для нас, мы абсолютно уверены, что вероятность возникновения в коллайдере опасных черных дыр чрезвычайно мала. Мы не знаем численного значения вероятности катастрофического исхода, но нам это и не нужно — она слишком мала. Любое событие, которое за все время жизни Вселенной наверняка не произойдет даже однажды, можно смело игнорировать.

Однако в более общем случае можно сказать, что численная оценка приемлемого уровня риска невероятно сложна. Ясно, что мы хотим вообще исключить серьезные риски, то есть любые события, которые могут угрожать жизни, планете и вообще всему, что нам дорого. Но для тех рисков, которые мы можем принять, нам нужен способ оценки: мы должны знать, кто выиграет от этого события и кто проиграет. Короче говоря, необходима система, которая поможет нам оценить и предвидеть риски.

По поводу изменений климата и других потенциальных опасностей, которыми он занимается, специалист по оценке рисков Джо Фрагола сказал мне следующее: «Настоящая проблема не в том, может ли все это произойти, и не в том, какие повлечет за собой последствия. Основная проблема в том, каковы вероятность этих событий и связанная с ней неопределенность. И какую часть глобальных ресурсов следует выделить на борьбу с подобными рисками, исходя не только из вероятности события, но и из вероятности того, что мы в силах что-нибудь с этим сделать».

Чиновники часто полагаются при оценке рисков и принятии решений на так называемый анализ по соотношению «затраты — выгоды». На первый взгляд эта идея представляется достаточно простой. Рассчитайте, сколько вам придется заплатить за те или иные выгоды и прикиньте, стоит ли игра свеч. Кажется, все предельно логично. Но на практике реальный анализ затрат и выгод провести иногда очень сложно. Проблема не только в том, чтобы измерить затраты и выгоды, что само по себе может оказаться непросто; проблема в том, что зачастую надо сначала определить, что мы подразумеваем под затратами и выгодами. Многие гипотетические ситуации содержат слишком много неизвестных, чтобы можно было точно вычислить любой из этих параметров или рассчитать риски. Ведь необходимо учесть — или хотя бы распознать — все неопределенности!

Безусловно, человечеству пригодилась бы разумная система, способная предугадывать затраты и риски на ближайшее будущее. Но все не так просто. Не любой, даже вполне реальный, обмен можно оценить исходя исключительно из стоимости. Что если вещь, которой вы можете лишиться, вообще невозможно заме-

нить? Если бы всепожирающая черная дыра могла возникнуть в БАКе со сколько-нибудь серьезной вероятностью в течение жизни одного поколения — или хотя бы в ближайший миллион лет, — мы, разумеется, отказались бы от этого проекта.

В долгосрочной перспективе человечество, бесспорно, получает от фундаментальных исследований немалые выгоды, но экономическую стоимость отказа от проекта редко можно достоверно рассчитать, потому что оценить эти выгоды количественно практически невозможно. Наша цель в экспериментах с БАКом — получить знания, лучше понять природу фундаментальных взаимодействий, а возможно, и природу пространства. Среди предполагаемых выгод — образованное, технически подготовленное и мотивированное человечество, вдохновляемое глубокими мыслями о Вселенной и ее устройстве. На практическом уровне мы разовьем информационный успех Европейского центра ядерных исследований и будем развивать грид-технологии, которые позволят обрабатывать информацию глобально; кроме того, достижения в области сверхпроводников и магнитных технологий будут полезны при разработке различных медицинских аппаратов, таких как МРТ. Возможно, со временем открытия в области фундаментальной науки найдут себе новые практические применения, но предвидеть их почти невозможно.

Вообще, анализ «затраты — выгоды» всегда трудно применять к фундаментальной науке. Один юрист в шутку заметил, что наряду с громадными рисками, о которых предпочитают помалкивать, БАК имеет крохотный шанс на получение грандиозных результатов, о которых все только и говорят, если сумеет решить все проблемы мира. Разумеется, ни один из названных сценариев не укладывается в схему стандартных расчетов затрат и выгод, но юрист — невероятно! — старался корректно их сформулировать*.

Можно сказать одно: наука выигрывает от того, что ее цель — «вечные» истины. Если вам удастся разгадать, как устроен мир, ответ будет верным вне зависимости от того, сколько времени

* Posner R. Catastrophe: Risk and Response. — Oxford University Press, 2004.

вам потребовалось на его поиски. Конечно, никто не хочет, чтобы наука развивалась медленно. Но задержка длиною в год наглядно продемонстрировала, как опасно спешить в таком деле, как пуск коллайдера. Как правило, ученые стараются действовать наверняка.

Практически в любой сколько-нибудь сложной ситуации — идет ли речь об изменении климата или о банковском деле — анализ «затраты — выгоды» сталкивается с множеством проблем. В принципе, такой анализ имеет право на существование, да и возражений фундаментального толка против него нет, но от способа его приложения зависит очень многое. Я за то, чтобы этот метод применялся более научно. Мы должны четко представлять себе неопределенности, заложенные в тех числах, которые получаются в результате расчетов. Как в любом научном анализе, мы должны брать в расчет возможные ошибки, предположения и предубеждения и не забывать о них рассказывать.

Так, в вопросе об изменении климата имеется один очень существенный фактор: относятся ли затраты и выгоды, о которых идет речь, к отдельному человеку, стране или земному шару в целом. Кроме того, потенциальные затраты или выгоды могут переходить из одной категории в другую, но мы далеко не всегда это учитываем. Одна из причин того, почему американские политики решили не подписывать Киотский протокол, состоит в том, что они пришли к выводу: если его принять, то затраты для американцев — особенно для американского бизнеса — окажутся гораздо существеннее возможных выгод. Однако они не взяли при этом в расчет долгосрочные затраты, связанные с глобальной нестабильностью, и выгоды, которые может принести регулируемая окружающая среда (ведь в такой среде могли бы расцвести новые бизнесы). Многие экономические расчеты затрат на борьбу с изменением климата никак не учитывают дополнительные потенциальные выгоды для экономики, связанные с инновациями или стабильностью и меньшей зависимостью от других государств. В вопросе о том, как изменится мир, слишком много неизвестных.

Встает также вопрос о том, как следует оценивать и сдерживать те риски, которые пересекают государственные границы.

Представьте, что черные дыры действительно представляли бы угрозу для планеты. Мог бы кто-нибудь на Гавайях успешно судиться с организацией, проводящей эксперименты в Женеве? При существующих законах это невозможно, но не исключено, что успешный судебный иск такого рода мог повлиять на финансирование эксперимента США.

Распространение ядерных технологий — еще один вопрос, где на кону оказывается глобальная стабильность. Но мы лишь в ограниченной степени можем контролировать опасности, которые зарождаются по ту сторону наших государственных границ. И изменение климата, и распространение ядерных технологий относятся к тем вопросам, которые каждое государство решает самостоятельно, однако порождаемые ими опасности угрожают не только создавшим их организациям или странам. Политическая проблема — что делать, когда риски выходят за пределы границ или законных юрисдикций — не имеет простого решения. Очевидно, однако, что вопрос этот чрезвычайно важен.

Успех CERN как организации по-настоящему международной опирается на объединенные усилия многих стран в достижении общих целей. Каждое отдельное государство, конечно, может попытаться минимизировать свой финансовый вклад, но в остальном здесь не затронуты ничьи индивидуальные интересы. Все страны-участники работают вместе, потому что наука, которую все они ценят, едина. Страны-хозяева — Франция и Швейцария — получают, возможно, чуть большие экономические выгоды за счет рабочих мест и инфраструктуры, но в целом это не игра с нулевой суммой*. Ни одно государство здесь не выигрывает за счет других.

Еще одна достойная внимания черта БАКа заключается в том, что Центр и страны-участники несут полную ответственность за любые технические или политические проблемы, связанные с коллайдером. Так, последствия гелиевого взрыва 2008 г. пришлось устранять за счет бюджета Центра. Никто не выигрывает от неполадок или аварий, и уж тем более те, кто работает на коллайдере. В ситуациях, где затраты и выгоды не сбалансированы,

* Математическая абстракция, подразумевающая обязательное наличие как выигрывающей, так и проигрывающей стороны. — *Прим. пер.*

а те, кто получает все выгоды, не отвечают полностью за риски, анализ «затраты — выгоды» не слишком полезен.

В любом случае мы хотим избежать моральных ловушек, когда интересы и риски людей не уравниваются и у них может появиться желание взять на себя слишком большой риск. Нам нужны правильные мотивирующие схемы.

Возьмем, к примеру, хедж-фонды. Полноправные партнеры получают свой процент каждый год, когда фонд остается с прибылью, но они не платят сравнимых по размеру штрафов, если фонд несет потери или попросту разоряется. Индивидуальные участники сохраняют полученную прибыль, а за неудачи расплачиваются устроители фонда — налогоплательщики. В этих условиях инвесторам выгоднее всего «раскачивать лодку», стимулируя максимальные колебания и нестабильность. Эффективная система и эффективный анализ «затраты — выгоды» должны принимать во внимание такое распределение рисков, вознаграждений и ответственности. Необходимо учитывать различные категории — или масштабы — задействованных в процессе людей.

В банковском деле тоже есть очевидные моральные ловушки, где риски и выгоды не всегда уравниваются. Политика типа «слишком велики, чтобы погибнуть» в сочетании со слабыми рычагами воздействия порождает ситуацию, в которой за потери отвечают одни (налогоплательщики), а максимальную выгоду получают другие (банкиры или страховщики). Можно спорить, насколько необходимы были в 2008 г. бюджетные вливания, но мне кажется, что куда разумнее было бы заранее подстраховаться от подобных ситуаций, уравновесив риск и ответственность.

Все данные об экспериментах на БАКе и о связанных с ними рисках легко доступны. Отчет о безопасности выложен в сеть, и любой может его прочесть. Очевидно, на мой взгляд, что любая организация, которая хотела бы, чтобы в случае чего государство ее выручило, или которая занимается не слишком надежными спекуляциями, должна предоставлять регулирующим органам достаточно данных о себе, чтобы можно было оценить и потенциальные риски, и выгоды. Достоверные данные должны быть доступны, тогда специалисты по ипотеке, регулирующие органы

или еще кто-то смогут в будущем прогнозировать финансовые, да и другие потенциальные катастрофы.

Конечно, само по себе это не решение, но разобраться в «масштабах», то есть в категориях «кому выгодно» и «кто рискует», а также в границах времени было бы полезно и здесь, хотя бы для того чтобы облегчить анализ и сделать его четче и понятнее. Вопрос масштаба переходит здесь в вопрос о том, с кем связаны расчеты: идет ли речь об отдельном человеке, об организации, о правительстве или о мире в целом; интересно также, какой промежуток времени нас интересует — месяц, год, десять лет? Политика, устраивающая банк Goldman Sachs, может быть не слишком полезна для экономики в целом или для человека, ипотечный кредит которого внезапно приказал долго жить. Это означает, что даже самые точные расчеты гарантируют верный результат лишь в том случае, если применяются к правильно сформулированному и тщательно продуманному вопросу.

Определяя политику, оценивая затраты и выгоды, мы, как правило, склонны отбрасывать возможные выгоды глобальной стабильности и помощи ближнему, причем выгоды не только моральные, но и финансовые. Отчасти это объясняется тем, что эти выгоды трудно оценить количественно, а отчасти тем, что делать оценки и применять четкие подходы в нашем стремительно меняющемся мире непросто. И все же ясно, что самые надежные правила — те, что учитывают все возможные выгоды, а не только выгоды отдельных людей, организаций или государств; не исключено даже, что мир с такими правилами действительно станет лучше.

Кроме того, при расчете затрат и выгод и при подготовке политических решений значение имеют и временные рамки, и исходные данные, на которые опираются те, кто принимает решения. Все это мы видели в ходе недавнего финансового кризиса. Временной масштаб имеет значение и в других ситуациях, поскольку чересчур поспешные действия могут повысить риски, а своевременные и стремительные операции — увеличить выгоды (или прибыли). Известно, что быстрые продажи позволяют более эффективно устанавливать котировки, но такие молниеносные операции совсем не обязательно приносят пользу экономике в целом.

Один специалист по инвестициям долго объяснял мне, как важно иметь возможность в любой момент продать акции; тем не менее мне так и не удалось понять, зачем продавать их через несколько секунд после покупки, кроме, разумеется, того факта, что он лично и его банк могут сделать на этом деньги. Подобные сделки в краткосрочной перспективе приносят банкирам и их организациям серьезную прибыль, но в целом они ослабляют финансовый рынок. Да, банкир, о котором шла речь, за один год принес своему банку 2 млрд долларов, так что его работодатели могут не согласиться с моим предположением, но с ним наверняка согласятся те, кому приходится в конечном итоге оплачивать потери, последовавшие за этими сверхприбылями.

РОЛЬ СПЕЦИАЛИСТОВ

Многие люди извлекают из происходящего неверный урок и делают вывод о том, что отсутствие надежных прогнозов означает отсутствие риска. На самом деле все как раз наоборот. Пока мы не исключили наверняка некоторые предположения и методы, диапазон возможных исходов остается полным: возможно все, что не запрещено законами природы. Несмотря на неопределенности — а может быть, именно благодаря им, — во многих моделях, предсказывающих опасный исход, вероятность очень неприятных событий с климатом, экономикой или глубоководным бурением вовсе не является пренебрежимо малой. Можно, наверное, утверждать, что шансы на такой исход малы в пределах определенного временного интервала. Однако в долгосрочной перспективе, пока мы не получим более достоверной информации, к трагическим событиям ведет слишком много сценариев, чтобы можно было их просто игнорировать.

Те, кого интересует только конечный результат, возмущаются строгими правилами, а те, кто заинтересован в безопасности и предсказуемости, ратуют за них. Слишком легко поддаться искушению и встать на ту или другую сторону, тем более что понять, где проходит граница, — задача чрезвычайно трудная, если не невозможная. Структурными проблемами необходимо заниматься,

даже если никто не посылает нам озарений, необходимых для составления подробных прогнозов.

Это приводит нас к последнему важному вопросу. А судьи кто? Кто принимает решения? Какова в этом роль экспертов и кто должен оценивать рискованность этих решений?

Учитывая уровень финансирования, а также тщательную проработку проекта БАКа, мы вполне можем ожидать, что все риски были тщательно проанализированы. Более того, энергии БАКа не выводят нас на новые режимы, туда, где должны отказать фундаментальные основы физики элементарных частиц. Физики уверены, что БАК безопасен, и мы с нетерпением ждем первых результатов столкновений частиц.

Я не говорю, что на ученых не ложится серьезная ответственность. Приходится постоянно повторять, что ученые чувствуют свою ответственность и очень внимательно относятся к рискам. Хотелось бы нам чувствовать такую же уверенность, с какой мы относимся к БАКу, по отношению ко всем научным инициативам. Если вы создаете вещество, или микроорганизмы, или что угодно, чего раньше не существовало на свете, вы должны быть уверены, что ваши действия не закончатся катастрофой. Главное — подходить к этому разумно, без нагнетания необоснованных страхов, которые всегда сдерживают прогресс. Это верно не только в науке, но и в любом рискованном предприятии. Единственный ответ на воображаемые неизвестные — рассмотреть как можно больше разумных точек зрения и иметь возможность вмешаться при необходимости. Как подтвердит вам любой житель побережья Мексиканского залива, в случае чего нужно иметь возможность перекрыть трубы.

В начале предыдущей главы я перечислила коротко некоторые возражения скептиков по поводу методов, при помощи которых физики рассчитывают черные дыры, в том числе по поводу опоры на квантовую механику. Стивен Хокинг при создании своей теории испарения черных дыр действительно опирался на квантовую механику. Но, несмотря на историческую фразу Фейнмана о том, что «никто не понимает квантовую механику», физики уже неплохо разбираются в ее следствиях, даже если считать, что у нас

нет глубокого обоснования ее истинности. Мы верим в квантовую механику, потому что она объясняет данные и решает проблемы, недоступные для классической физики.

Когда физики спорят о квантовой механике, они не оспаривают сделанные на ее базе прогнозы. Многочисленные случаи успешного применения этой теории вынудили пораженных студентов и исследователей принять ее. Сегодняшние дебаты о квантовой механике затрагивают, пожалуй, только философскую ее основу. Может быть, существует какая-то другая теория с более привычными классическими предпосылками, которая предсказывает и причудливые гипотезы квантовой механики? Но даже если такую теорию удастся найти, на сами предсказания это никак не повлияет. Философские открытия, возможно, изменят концептуальные рамки, в которых мы описываем предсказания, но не предсказания как таковые.

Оговорюсь, что лично я считаю крупные изменения на этом фронте маловероятными. Скорее всего, квантовая механика окажется фундаментальной теорией. Она богаче классической механики. Все классические предсказания представляют собой предельный вариант квантовой механики, но не наоборот. Так что трудно поверить, что мы когда-нибудь сможем интерпретировать квантовую механику при помощи классической ньютоновой логики. Попытка объяснить квантовую механику на основе классической напоминала бы попытку с моей стороны написать эту книгу на итальянском. Все то, что я могу сказать по-итальянски, я могу сказать и по-английски, но мой итальянский словарь весьма ограничен, так что обратное совершенно неверно.

Тем не менее с разногласиями по философским вопросам или без таковых все физики сходятся на том, как нужно применять квантовую механику. Предсказания квантовой механики достоверны и многократно проверены. Но даже без них у нас есть достаточно независимых экспериментальных данных (в виде Земли, Солнца, нейтронных звезд и белых карликов), свидетельствующих о безопасности БАКа.

БАК-алармисты возражают также против использования теории струн. В самом деле, если использование квантовой механики

не встречает серьезных возражений, то в отношении теории струн это не так. Но ведь выводы о черных дырах никогда и не нуждались в теории струн! Кое-кто действительно пытается разобраться при помощи теории струн во внутренней структуре черной дыры — в геометрии кажущейся сингулярности в ее центре, где согласно общей теории относительности плотность энергии становится бесконечной. На базе теории струн были проведены расчеты испарения черной дыры в нефизических ситуациях, которые подтвердили выводы Хокинга. Но расчеты испарения черных дыр основаны все же лишь на квантовой механике, а не на полной теории квантовой гравитации. Хокинг мог бы провести свои расчеты и прийти к тем же выводам и без теории струн.

Иногда эти возражения объясняют иначе. Говорят, что люди проявляют недоверие не к науке как таковой, а к ученым, которые «слепо верят» в свои теории. В конце концов, теория струн лежит за пределами диапазона энергий, доступных для непосредственного наблюдения. Тем не менее многие физики уверены в ее справедливости и продолжают работать над ней. Однако даже в научном сообществе не существует единого мнения по этому поводу, что прекрасно иллюстрирует и отсутствие «слепой веры», и готовность ученых всегда опираться на факты. Никто не стал бы опираться на теорию струн в вопросах безопасности. Одни ученые поддерживают теорию струн, другие нет, но каждый знает, что она пока не доказана и не проработана до конца. До тех пор пока достоверность и надежность теории струн не признаны всеми, опираться на нее в рискованных ситуациях было бы, мягко говоря, опрометчиво. Что касается нашей безопасности, то дело даже не в том, что экспериментальная проверка теории струн пока невозможна; главное, что для предсказания большинства явлений окружающего мира, с которыми мы можем встретиться в своей жизни, она совершенно не нужна.

Повторю еще раз: я полностью уверена в том, что в оценке связанных с БАКом рисков можно положиться на специалистов. Тем не менее я признаю потенциальную ограниченность такого подхода и не знаю, как с этим быть. В конце концов, «специалисты» в один голос твердили, что деривативы — это способ ми-

нимизации рисков, а не путь к кризису. «Специалисты» по экономике утверждали, что любое государственное регулирование снижает конкурентоспособность американских предприятий; никто не сказал, что его отсутствие — это путь к потенциальному краху экономики страны. «Специалисты» и сегодня говорят нам, что только сами банкиры достаточно разбираются в своих операциях, чтобы лечить банковский сектор. Откуда нам знать, достаточно ли широко мыслят эти «специалисты»?

Очевидно, эксперты могут оказаться близорукими и непредусмотрительными. Вероятно, в их среде тоже существуют конфликты интересов. Может быть, они могли бы поучиться чему-то у науки?

Я говорю, что в случае с черными дырами в БАКе мы рассмотрели весь спектр потенциальных рисков, какие только можно представить, и не думаю, что мое мнение в этом вопросе основано на предубеждениях. Мы продумали теоретические аргументы, но не забыли и об экспериментальных свидетельствах. Мы рассмотрели ситуации в космосе, где в таких же физических условиях происходят те же самые события.

Было бы приятно верить, что экономисты работают с существующими данными так же тщательно. Хотя экономические условия никогда не повторяются в абсолютной точности, в основе своей все экономические пузыри похожи.

Аргумент о том, что предвидеть опасности снятия всякого государственного регулирования было попросту невозможно, который сегодня повторяют многие, также не выдерживает критики. Бруксли Борн, бывший председатель комиссии, наблюдающей за рынками фьючерсов и опционов, неоднократно указывала на опасности, связанные с дерегуляцией. Более того, она вполне разумно предлагала тщательно изучить соответствующие риски, но слова ей не давали. Никто не хотел всерьез анализировать, нужно ли в этих делах соблюдать осторожность (а время ясно показало, что нужно); специалисты громко кричали, что снижение темпов было бы вредно для бизнеса (и действительно повредило бы краткосрочным интересам Уолл-стрит).

Возможно, экономисты в разговорах о политике и государственном регулировании имеют в виду не только финансовые,

но и политические интересы и потому могут быть необъективны. В идеале ученые обращают больше внимания на логические доводы, в том числе и по поводу рисков, чем на политику. Физики, работающие на БАКе, провели серьезные научные исследования, чтобы убедиться в безопасности установки.

Возможно, детали конкретных финансовых инструментов действительно доступны только финансовым экспертам, но некоторые базовые структурные вопросы понятны каждому. Большинству людей ясно, что экономика, излишне завязанная на кредитах, нестабильна, хотя мало кто сможет предсказать, что именно может послужить спусковым крючком и вызвать коллапс. Почти любому человеку очевидно, что давать банкам сотни миллиардов долларов, не налагая при этом на них никаких или почти никаких ограничений, вероятно, не лучший способ расходовать деньги налогоплательщиков. Даже водопроводный кран устроен так, что его в любой момент можно гарантированно выключить, по крайней мере если что-то пошло не так, то существует тряпка и ясное представление о том, как справиться с последствиями. Трудно понять, почему того же самого нельзя требовать от глубоководных буровых платформ.

Там, где нам приходится рассчитывать на экспертов, на сцене появляются психологические факторы; об этом написал в 2010 г. ведущий экономической колонки *The New York Times* Дэвид Леонхардт, приписав ошибки мистера Гринспена и мистера Бернанке* факторам «больше психологическим, нежели экономическим». Он объяснил: «Они попали в ловушку здравого смысла» и «пали жертвами тех же слабостей, что подвели инженеров космического челнока “Челленджер”, тех, кто планировал войны во Вьетнаме и Ираке, и всех пилотов гражданских авиалиний, совершивших трагические ошибки. Они не высказывали должных сомнений в верности своих представлений о мире. Это очень человеческая ошибка»**.

* Председатели Совета управляющих Федеральной резервной системы США в 1987–2006 гг. и с 2006 г. соответственно. — Прим. пер.

** Leonhardt D. The Fed Missed This Bubble: Will It See a New One? // New York Times, January, 5, 2010.

Единственный способ разобраться с по-настоящему сложными вещами — прислушиваться к любым, даже дилетантским мнениям. Банкиры вполне могли предвидеть, что экономике угрожает коллапс, но личные интересы волновали их больше, и они предпочли как можно дольше не замечать тревожных сигналов. В науке нет демократии в том смысле, что мы не собираемся все вместе и не определяем верный ответ голосованием. Но любая обоснованная научная точка зрения рано или поздно будет услышана. Конечно, утверждения и открытия известных, признанных ученых первыми обращают на себя внимание, тем не менее любого, кто сумеет доказать свою точку зрения, рано или поздно заметят.

Если никому не известный ученый сможет добраться до известного научного светила и изложить ему свою позицию, его, возможно, услышат сразу. Именно так Эйнштейну удалось представить научному сообществу теорию, потрясшую основы науки. Немецкий физик Макс Планк понял смысл и значение изысканий Эйнштейна и опубликовал его работу в самом солидном физическом журнале того времени, которым, к счастью, заведовал.

Сегодня идеи стремительно расходятся по всему миру через Интернет. Любой физик может написать статью, и уже завтра она будет разослана его коллегам. До тех пор пока хоть кому-нибудь не все равно, хорошая и верная идея всегда найдет путь в научные круги.

Инженеры и физики БАКа не пожалели времени и денег на безопасность. Они старались экономить на всем, но не за счет опасностей или неточностей. Интересы всех были тщательно сбалансированы. Результат, не прошедший испытания временем, не принесет пользы никому.

Валюта научного мира — репутация, а «золотых парашютов» потерявшим ее ученым не выдают.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Мы все, надеюсь, уже согласились с тем, что не стоит тревожиться о черных дырах, хотя поводов для беспокойства остается достаточно. В случае с БАКом мы думаем — и должны думать — обо всем

хорошем, что можно сделать с его помощью. Созданные в нем частицы помогут нам получить ответы на глубокие фундаментальные вопросы о структуре вещества.

Возвращаясь ненадолго к своему разговору с Нейтом Силвером, замечу: я поняла, насколько наша ситуация уникальна. В физике элементарных частиц мы можем ограничиться достаточно простыми системами и исследовать на их примере, как методически на базе старых результатов возникают новые. Иногда наши прогнозы рождаются на основании известных моделей, истинность которых доказана. В других случаях мы строим прогнозы на базе моделей, которые у нас есть основания считать обоснованными, а затем при помощи экспериментов стараемся исключить лишние возможности. Уже на этом этапе — не зная, действительно ли наши модели окажутся верными — мы можем предвидеть, какими должны быть их экспериментальные доказательства, если соответствующие эксперименты будут проведены.

Физика элементарных частиц активно использует нашу способность делить мир в соответствии с масштабами событий и объектов. Мы знаем, что взаимодействия на малых масштабах могут сильно отличаться от того, что происходит на больших, и при этом понимаем, что любые мелкомасштабные взаимодействия вносят свой вполне определенный вклад в то, что происходит «выше», и должны полностью согласовываться с уже известными фактами.

Почти во всех других ситуациях прогнозирование делается совершенно иначе. В сложных системах нам часто приходится иметь дело одновременно с несколькими разными масштабами. Это верно не только для социальных систем, таких как банк, где один безответственный трейдер может дестабилизировать экономику в целом, но и в других науках. Прогнозы в таких случаях могут быть весьма изменчивыми.

К примеру, в задачи биологии входит прогнозирование развития биологических систем и поведения животных и человека. Но мы пока не сумели до конца разобраться ни в базовых функциональных единицах, ни в высокоуровневой организации, посредством которой из базовых элементов складываются сложные эффекты. Нам не известны также все обратные связи, которые,

скорее всего, делают невозможным строгое разделение по масштабам. Ученые умеют строить модели, но без лучшего понимания основных базовых элементов и того, как именно каждый из них влияет на эмерджентное поведение, разработчики моделей просто тонут в трясине фактов и возможностей.

Дополнительную сложность вносит тот факт, что хотя биологические модели разрабатываются на базе существующих данных, верные исследовательские подходы нам неизвестны. Мы не сумели пока выделить все простые независимые системы, поэтому трудно сказать, которая из моделей верна (если верная модель вообще существует). Коллеги-нейробиологи жалуются на одну проблему. Без качественно новых методов измерения даже самые лучшие модели всего лишь согласуются с существующими данными. А поскольку с данными по определению согласована любая «выжившая» модель, трудно определить, какая из гипотез, на которых все они основаны, верна.

Интересно было поговорить с Нейтом о вещах, которые он пытается прогнозировать. В последнее время появилось немало популярных книг, в которых представлены не слишком убедительные гипотезы. Нейт подходит к делу научно. Известность, к слову, он заработал точными прогнозами результатов бейсбольных игр и выборов. Его анализ основывался на тщательной статистической оценке аналогичных ситуаций в прошлом; он учитывал так много переменных, что действительно мог извлекать из истории реальные практические уроки.

Теперь ему приходится тщательно выбирать области, в которых можно использовать эти методы. Он понимает, что корреляции, с которыми он работает, могут с трудом поддаваться интерпретации. Можно сказать, что возгорание двигателя стало причиной авиакатастрофы, но в самом факте того, что самолет с горящим двигателем упал, нет ничего удивительного. Какой же была истинная причина? Точно такой же вопрос возникает, если рассматривать связь генных мутаций и рака. Корреляция между ними, конечно, существует, но одно не обязательно вызывает другое.

Нейт понимает, что в прогнозировании есть и другие ловушки. Даже при большом количестве данных их случайность или шум

могут усилить или, наоборот, подавить проявление закономерностей. Поэтому Нейт не работает с финансовыми рынками, землетрясениями или климатом. Он мог бы, вероятно, предсказать общие тенденции, но краткосрочные прогнозы неизбежно окажутся очень неопределенными. Сейчас Нейт изучает другие области, где его методы могли бы пролить свет на ситуацию. Как лучше всего распространять музыку или кинофильмы? Какова истинная ценность суперзвезд Национальной баскетбольной лиги? Однако он признает, что лишь небольшое число систем допускает точную количественную оценку.

Тем не менее прогнозисты схожи в одном. Все они занимаются метапрогнозированием — предсказывают, что именно люди захотят предсказать.

ИЗМЕРЕНИЕ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

При оценке научных измерений полезно быть на короткой ноге со статистикой и теорией вероятностей. Мне напомнил о пользе вероятностных рассуждений один случай. Несколько лет назад на вопрос, пойду ли я завтра на некое мероприятие, я честно ответила: «Не знаю». Приятель, разочарованный таким ответом, был, по счастью, любителем математики. Так что вместо того, чтобы долго и нудно настаивать на определенном ответе, он попросил меня назвать вероятности того и другого. К собственному удивлению я обнаружила, что ответить на вопрос в такой формулировке намного проще. Хотя названные мной вероятности были всего лишь грубой оценкой, они более точно отражали мои сомнения и неуверенность, чем любое «да» или «нет». В конце концов, такой ответ показался мне куда более честным.

С тех пор я неоднократно пробовала вероятностный подход на друзьях и коллегах в случаях, когда они вроде бы не могли ответить на мой вопрос. Оказалось, что большинству людей нередко проще ответить на вопрос не однозначно, а через вероятности. Человек может не знать, захочет ли он пойти на бейсбольный матч в четверг через три недели. Но если он уверен в том, что ему нравится бейсбол, и не ожидает в ближайшее время командировок, однако сомневается, потому что день будний, он может сказать, что пойдет с вероятностью 80%, хотя и не может гарантировать. Хотя это всего лишь оценка, но названная вероятность — даже такая, которую он просто придумал на месте —

более точно отражает реальные ожидания человека, чем простой ответ «да» или «нет».

В разговоре о науке и о том, как действуют ученые, сценарист и режиссер Марк Висенте заметил, что его в свое время поразило, что ученые не любят делать слишком определенные, без всяких оговорок, заявления, которые большинство обычных людей делает не задумываясь. Ученые не обязательно очень уж красноречивы, но они всегда стремятся точно сказать, что они знают, а чего не знают или не понимают, по крайней мере в своей научной области. Они редко говорят «да» или «нет», потому что такой ответ не может точно отразить весь спектр возможностей. Вместо этого они говорят о вероятностях либо ограничивают свои заявления определенными условиями. По иронии судьбы, из-за такой разницы в языке люди часто неверно понимают заявления ученых или преуменьшают их значение. Несмотря на то что ученые стремятся объяснить все как можно точнее, неспециалисты зачастую просто не знают, как интерпретировать их заявления: ведь любой неученый, имея столько свидетельств в пользу своего тезиса, без колебаний сказал бы что-нибудь более определенное. Но для ученого отсутствие 100%-ной вероятности не означает отсутствия знания. Это всего лишь следствие неопределенностей, изначально присущих любым измерениям. Вот об этом мы с вами сейчас и поговорим. Вероятностное мышление помогает уяснить смысл того или иного явления и позволяет принимать взвешенные решения. В этой главе мы подумаем о том, что говорят нам измерения, и разберемся, почему именно вероятностные заявления наиболее точно отражают состояние знаний — научных или любых других — в любой конкретный момент времени.

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПО-НАУЧНОМУ

В Гарварде недавно прошел диспут, посвященный попыткам определить важнейшие элементы современного образования. Одной из обсуждавшихся категорий (по существу, частью обязательных научных требований) были «эмпирические рассуждения». Пред-

ложение состояло в том, что университет должен ставить перед собой цель «научить студентов собирать и оценивать эмпирические данные, взвешивать доказательства, разбираться в оценках и вероятностях, делать выводы из имеющихся данных [пока все нормально — Л. Р.], а также распознавать ситуации, в которых вопрос не может быть разрешен на базе имеющихся свидетельств».

Предложенная формулировка — позже она была изменена — была составлена с самыми лучшими намерениями, но содержала в корне неверное представление о том, как работают измерения, то есть экспериментальные данные. Как правило, наука решает вопросы с определенной степенью вероятности. Конечно, мы можем достичь высокой степени уверенности в каком-то вопросе или наблюдении и высказывать здравые суждения. Однако редко человеку удастся решить вопрос полностью — научный или иной — на основании прямых доказательств. Мы можем набрать достаточно данных, чтобы можно было доверять причинно-следственным связям, можем делать необычайно точные предсказания, но, как правило, все они делаются с определенной степенью вероятности. Как говорится в главе 1, неопределенность, даже маленькая, допускает потенциальное существование новых интересных явлений, которые еще надо открыть. Мало что известно со 100%-ной точностью, и ни одна теория или гипотеза не будет гарантированно действовать в условиях, в которых еще не проводились никакие испытания.

В измерения всегда входит некоторый вероятностный компонент. Многие научные измерения опираются на предположение о том, что те или иные явления основаны на существующих физических закономерностях, которые можно открыть при помощи достаточно точных и тщательных измерений. При помощи измерений мы стараемся найти эти физические закономерности. Затем мы можем утверждать, что некий интервал, в пределах которого лежат наши измерения, содержит истинную величину измеряемого параметра с вероятностью 95%. В этом случае мы могли бы сказать, что уверены на 95%. Подобные вероятности сообщают нам достоверность любого конкретного измерения, а также полный спектр возможностей и следствий. Невозможно до конца по-

нять смысл измерения, не зная и не оценивая связанных с ним неопределенностей.

Один из источников неопределенности — то, что в природе не существует абсолютно точных измерительных инструментов. Для измерений абсолютной точности потребовалось бы устройство, откалиброванное с точностью до бесконечного числа десятичных знаков. Экспериментаторы не в состоянии проводить такие измерения — они могут калибровать свои инструменты лишь с той точностью, которую допускают современные технологии. Чем более развиты технологии, тем точнее измерительные устройства. При всем при том измерения никогда не достигнут абсолютной точности, до каких бы вершин не поднялась техника. Некоторая *систематическая погрешность*, или *неопределенность*^{*}, присущая самому измерительному устройству, останется всегда.

Вездесущая неопределенность не означает, что ученые воспринимают все варианты или заявления одинаково (хотя средства массовой информации частенько совершают эту ошибку). Вероятность 50 на 50 в реальной жизни встречается очень редко. Однако все это значит, что ученые (или любой человек, стремящийся к идеальной точности) в своих заявлениях сообщают, *что* именно было измерено и что это означает в вероятностном смысле, даже если вероятности очень высоки.

Когда ученые и журналисты очень аккуратно выражают свои мысли, они используют в разных значениях два, казалось бы, близких слова: *прецизионность* и *точность*. Некое устройство считается прецизионным, если при повторных измерениях одной и той же величины полученные значения не будут слишком сильно отличаться друг от друга. Таким образом, прецизионность — мера уровня изменчивости и схожести результатов. Если результаты повторных измерений отличаются не сильно, то измерения прецизионны. Измеренные таким образом величины дают меньший

^{*} В этой книге я использую термин «систематическая неопределенность» (systematic uncertainty), а не более частый — «систематическая погрешность» (systematic error). Последняя часто ассоциируется с ошибкой, в то время как «неопределенность» указывает на неизбежные ограничения, налагаемые аппаратурой. — *Прим. авт.*

разброс значений, поэтому среднее значение при повторных измерениях будет сходиться быстрее.

Точность, с другой стороны, говорит о том, как далеко полученное вами среднее значение отстоит от правильного результата. Иными словами, она говорит о том, вносит ли измерительная установка *смещение* и насколько измерения достоверны. С технической точки зрения ошибка, присущая измерительному устройству, не ухудшает его прецизионности — ведь ошибка каждый раз будет одна и та же, — хотя, безусловно, вредит точности собственно измерения. *Систематическая погрешность* характеризует неустранимое отклонение от истинного значения, присущее самим измерительным устройствам.

Тем не менее во многих ситуациях даже при наличии идеального измерительного инструмента вам придется проводить многократные измерения, чтобы получить корректный результат. Дело в том, что существует еще один источник неопределенности* — *статистический*; это означает, что измерения необходимо проводить многократно, чтобы результатам можно было доверять. Даже точное измерительное устройство не всякий раз будет давать верное значение, а вот среднее значение при многократных измерениях сойдется к верному ответу. Систематическая погрешность управляет точностью измерений, тогда как статистическая погрешность влияет на их прецизионность. В идеале измерения должны быть и точными, и прецизионными; тогда ожидаемая абсолютная погрешность будет мала, а полученным величинам можно будет доверять. Иначе говоря, вы должны желать, чтобы они лежали в как можно более узком диапазоне (прецизионность) и сходились в конце концов к верному результату (точность).

Приведем знакомый и весьма важный пример, на котором можно практически рассмотреть все приведенные понятия, — испытания эффективности лекарственных средств. Врачи часто не хотят раскрывать (а может быть, и не знают) соответствующую статистику. Случалось ли вам испытывать острое разочарование от слов: «Иногда это лекарство помогает, а иногда нет»? Подобное

* Часто используется термин «статистическая погрешность», когда говорят о неопределенности измерений, связанной с конечностью их числа. — *Прим. авт.*

заявление скрывает от вас массу полезной информации. Так, в нем ничего не говорится о том, как часто это лекарство срабатывает и насколько статистически та часть населения, на которой его испытывали, схожа с вами. После такого заявления очень трудно принять решение. Гораздо лучше было бы, если бы вам сказали, как часто это лекарство помогает людям, близким к вам по возрасту и физическому состоянию.

Разные люди по-разному реагируют на одни и те же лекарства, и это очень усложняет вопрос о том, как подействует то или иное лекарство на конкретного человека. Давайте для начала рассмотрим более простой случай и представим, что мы проводим испытания на одном человеке. В качестве примера возьмем аспирин и проверим, помогает ли он от головной боли.

Кажется чего проще: взять аспирин и посмотреть, сработает ли он. Но на самом деле все немного сложнее. Даже если вам стало лучше, откуда вы можете знать, что вам помог именно аспирин? Чтобы убедиться в этом, то есть понять, уменьшилась ли боль быстрее, чем без лекарства, вам нужно было бы сравнить самочувствие с ним и без него. Однако, поскольку вы либо приняли аспирин, либо нет, одного измерения будет недостаточно, чтобы получить ответ на вопрос.

Но способ получить его существует. Для этого нужно провести эксперимент много раз. Всякий раз, когда у вас заболит голова, вам следует бросить монетку и принять случайное решение о том, принимать на этот раз аспирин или нет. Результат, естественно, нужно зафиксировать. После достаточного количества испытаний вы сможете усреднить свои данные по различным типам головной боли и сопутствующим обстоятельствам (возможно, боль проходит быстрее, если вы накануне хорошо выспались); статистика поможет вам получить верный результат. Вероятно, в ваших измерениях не будет систематической погрешности, поскольку решение о приеме лекарства вы принимали на основании броска монетки, а выборка состоит из вас одного, поэтому результаты при достаточном количестве испытаний будут корректными.

Было бы здорово, если бы любое лекарство можно было испытать посредством такой простой процедуры. Однако большинство

лекарств используется при лечении более серьезных заболеваний, чем головная боль, иногда даже смертельно опасных. А у многих лекарств есть долгосрочные последствия, поэтому провести много коротких испытаний на одном человеке невозможно, даже если очень хочется.

Так что обычно, когда биологи или врачи хотят проверить, насколько хорошо действует лекарство, они не испытывают его на одном-единственном человеке, хотя с точки зрения науки такой вариант был бы оптимальным. Им приходится мириться с тем фактом, что люди по-разному реагируют на один и тот же препарат. Любое лекарство дает целый спектр реакций, даже если пробуют его на группе людей с одним заболеванием одной и той же степени тяжести. Поэтому лучшее, что могут в большинстве случаев сделать ученые, — это разработать программу испытаний для группы людей, как можно сильнее похожих на того человека, которому они в будущем намерены давать или не давать данное лекарство. На самом деле врачи, как правило, не планируют эксперименты сами, так что сходство с реальным пациентом гарантировать трудно.

Иногда вместо этого врачи используют уже существующие результаты, где никто не проводил тщательных испытаний, а просто собраны данные наблюдений за существующими группами людей, такими как жильцы одного дома. Затем им придется столкнуться с проблемой правильной интерпретации результатов. С такими исследованиями иногда трудно бывает гарантировать, что проведенные измерения отражают причинно-следственные связи, а не случайные совпадения или корреляции. Так, заметив у многих пациентов с раком легких желтые пальцы, можно сделать ошибочный вывод о том, что именно желтизна пальцев — причина рака легких.

Поэтому ученые предпочитают исследования, в которых методы лечения или дозы назначаются случайным образом. К примеру, исследование, в котором люди будут принимать лекарство по результатам броска монетки, будет меньше зависеть от выборки: ведь то, будет ли данный пациент принимать препарат, полностью зависит от случая. Точно так же при помощи рандомизированно-

го исследования можно установить связь между курением, раком легких и желтизной пальцев. Если бы можно было случайным образом предписать, кто из членов группы будет курить, а кто нет, вы бы поняли, что курение — это по крайней мере один из факторов и желтизны пальцев у пациентов, и рака легких; при этом не важно, является ли одно причиной другого. Но, разумеется, такой эксперимент был бы неэтичным.

Везде, где это возможно, ученые стремятся упростить систему и выделить таким образом те специфические явления, которые хотят изучить. И для точности, и для прецизионности результата очень важен подбор как группы испытуемых, так и контрольной группы. Такой сложный параметр, как действие лекарства на биологию человека, определяется одновременно множеством факторов. Очень важно также, насколько достоверные результаты исследования нам нужны.

С КАКОЙ ЦЕЛЬЮ ПРОВОДЯТСЯ ИЗМЕРЕНИЯ?

Измерения не могут быть идеальными. В научных исследованиях — как и при принятии любого решения — нам приходится определять для себя приемлемый уровень неопределенности. Только в этом случае можно двигаться вперед. К примеру, если вы принимаете лекарство и надеетесь, что оно облегчит вам сильную головную боль, то вам, возможно, достаточно знать, что это лекарство помогает обычному человеку в 75% случаев. С другой стороны, если изменение стиля питания ненамного снизит ваши и без того невысокие шансы заболеть чем-нибудь сердечно-сосудистым (к примеру, с 5 до 4,9%), этого может оказаться недостаточно, чтобы убедить вас отказаться от любимых пирожных.

В политике точка принятия решения еще менее определена. Как правило, общество смутно представляет, насколько хорошо нужно изучить вопрос, прежде чем менять законы или накладывать ограничения. Необходимые расчеты здесь осложнены множеством факторов. Как говорилось в предыдущей главе, из-за неоднозначности целей и методов провести сколько-нибудь достоверный анализ «затраты — прибыли» очень сложно, а иногда вообще невозможно.

Колумнист *The New York Times* Николас Кристоф, ратуя за осторожность в обращении с потенциально опасными химическими веществами типа бисфенол-А (БРА) в пище или пищевой упаковке, писал: «Исследования БРА уже несколько десятков лет бьют тревогу, а данные до сих пор сложны и неоднозначны. Такова жизнь: в реальном мире законодательные меры, как правило, приходится принимать на основании неоднозначных и спорных данных».

Ничто из сказанного не означает, что нам не следует, определяя политический курс, стремиться к количественной оценке затрат и выгод. Однако ясно, что нам нужно четко понимать, что означает каждая оценка, как сильно она может меняться в зависимости от начальных предположений или целей, а также что при расчетах было и что не было принято во внимание. Анализ «затраты — выгоды» может быть полезен, но может и дать ложное ощущение конкретности, надежности и безопасности, которое зачастую приводит к опрометчивым решениям.

К счастью для нас, физики, как правило, ставят перед собой вопросы попроще, чем те, что приходится решать публичным политикам. Имея дело с чистым знанием, которое в ближайшее время не предполагается использовать на практике, думаешь совершенно о другом. Измерения в мире элементарных частиц тоже намного проще, по крайней мере теоретически. Все электроны по природе своей одинаковы. Проводя измерения, приходится думать о статистической и системной погрешности, зато о неоднородности популяции можно спокойно забыть. Поведение одного электрона дает нам достоверную информацию о поведении всех электронов. Тем не менее представления о статистической и системной погрешности применимы и здесь.

Однако даже в «простых» физических системах необходимо заранее решить, какая точность нам необходима, ведь идеальных измерений не бывает. На практике вопрос сводится к тому, сколько раз экспериментатор должен повторить измерение и насколько прецизионный измерительный прибор при этом использовать. Решение за ним. Приемлемый уровень неопределенности определяется задаваемыми вопросами. Разные цели предполагают разные уровни прецизионности и точности.

К примеру, атомные часы измеряют время с точностью до одной десятиллионной, но такое точное представление о времени мало кому нужно. Исключение — эксперименты по проверке теории гравитации Эйнштейна: в них лишней прецизионности и точности быть не может. До сих пор все тесты показывают, что эта теория работает, но измерения непрерывно совершенствуются. При более высокой точности могут проявиться невиданные до сих пор отклонения, представляющие новые физические эффекты, которые невозможно было заметить в ходе прежних, менее точных экспериментов. Если это произойдет, то замеченные отклонения позволят нам заглянуть в царство новых физических явлений. Если нет, придется сделать вывод о том, что теория Эйнштейна даже точнее, чем было установлено ранее. Мы будем знать, что ее можно уверенно применять в более широком диапазоне энергий и расстояний, к тому же с большей точностью.

Если же нам нужно «всего лишь» доставить человека на Луну, то мы, естественно, не обойдемся без знания физических законов, достаточного, чтобы не промахнуться, но привлекать общую теорию относительности не обязательно, и уж тем более не требуется принимать во внимание еще более мелкие потенциальные эффекты, представляющие возможные отклонения от нее.

ТОЧНОСТЬ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В физике элементарных частиц мы пытаемся найти базовые правила, управляющие самыми мелкими и фундаментальными компонентами вещества, которые мы в состоянии обнаружить. Отдельный эксперимент здесь — это не измерения во множестве происходящих одновременно столкновений или периодически повторяющихся взаимодействий. Наши прогнозы относятся к единичным столкновениям известных частиц при определенной энергии. Частицы приходят в точку столкновения, взаимодействуют, а затем пролетают через детекторы, по пути, как правило, отдавая энергию. Физики, говоря о столкновении частиц, используют конкретные характеристики этих частиц — массу, энергию и заряд.

В этом отношении, несмотря на техническую сложность наших экспериментов, физике элементарных частиц повезло. Системы, которые мы изучаем, должны быть как можно более простыми, чтобы можно было выделить в них фундаментальные компоненты и законы. Идея в том, чтобы сделать экспериментальные системы настолько чистыми, насколько позволяют имеющиеся ресурсы. Проблема для физиков заключается скорее в том, чтобы достичь требуемых физических параметров, а не в том, чтобы распутать и упростить сложные системы. Эксперименты сложны, потому что науке приходится все дальше отодвигать границы непознанного. Поэтому они часто проводятся на пределе энергий и расстояний, достижимых при данном уровне развития технологий.

По правде говоря, эксперименты в физике элементарных частиц вовсе не так просты, как кажется, даже если речь идет об изучении точных фундаментальных величин. Представляя полученные результаты, ученые непременно сталкиваются с одной из двух проблем. Если они увидели что-то необычное, то должны доказать, что это не может быть результатом какого-то тривиального события в рамках Стандартной модели. Если они не увидели ничего нового, то, прежде чем заявлять, что этого нового не существует в рамках тех ограничений, которые установлены для исследователей в данный момент, они должны быть полностью уверены в том, что эксперименты проводились при адекватном уровне точности. Физики должны разбираться в чувствительности измерительной аппаратуры достаточно хорошо, чтобы понимать, что можно исключить, а что необходимо учитывать.

Чтобы быть уверенными в результате, экспериментаторы должны четко отличать те явления, что могут свидетельствовать о новой физике, от *фоновых* событий, возникающих в результате взаимодействия известных физических частиц Стандартной модели. Именно поэтому, чтобы сделать открытие, нам нужно увидеть множество столкновений. Из множества столкновений можно выбрать достаточно событий, представляющих новую физику, чтобы надежно отличить их от «скучных» процессов Стандартной модели, на которые они могут оказаться похожи.

Таким образом, любой наш эксперимент требует набора достаточной статистики. Самим измерениям тоже присущи неопределенности, которые делают многократное повторение необходимым. Квантовая механика говорит нам, что базовые события также обладают внутренней неопределенностью. Согласно законам квантовой механики, как бы хитроумно мы ни планировали эксперименты, в результате мы сможем получить лишь вероятность взаимодействия. Как бы мы ни проводили измерения, эта неопределенность никуда не денется. Это означает, что единственный способ точно измерить силу взаимодействия — повторить измерение много раз. Иногда эта неопределенность меньше, чем погрешность измерения, и вообще слишком мала, чтобы иметь значение. Но иногда ее необходимо принимать во внимание.

Квантово-механическая неопределенность говорит нам, к примеру, что масса распадающейся частицы неоднозначна по определению. Исходя из принципа неопределенности ни одно измерение энергии не может быть точным, если оно сделано за конечное время. Понятно, что время измерения должно быть короче, чем время жизни распадающейся частицы, и это определяет ожидаемые пределы вариации измеряемых масс. Так что если экспериментаторы обнаружили бы свидетельства существования новой частицы — те частицы, на которые она распалась, — то измерение ее массы потребовалось бы провести много раз. Ни одно из этих измерений не было бы точным, но среднее по всем измерениям значение сходилось бы к верной величине.

Во многих случаях квантово-механическая неопределенность массы меньше, чем систематическая погрешность (неизбежная ошибка) измерительной аппаратуры. Если это так, экспериментаторы могут просто не обращать внимания на квантово-механическую неопределенность массы. Но и в этом случае необходимо провести большое количество измерений, чтобы обеспечить их сходимость; причина — в вероятностном характере рассматриваемых взаимодействий. Как и в случае с испытаниями лекарственных средств, для получения верного ответа необходим большой объем статистических данных.

Важно понять, что вероятности, связанные с квантовой механикой, не совсем случайны. Вообще, эти вероятности вычисляются по вполне определенным законам. Мы убедимся в этом в главе 14, когда речь пойдет о массе W -бозона. Нам известна общая форма кривой, описывающей вероятность того, что в результате столкновения родится именно эта частица с заданной массой и заданным временем жизни. Результаты измерения энергии группируются вокруг верной величины, а их распределение согласуется с временем жизни частицы и принципом неопределенности. Хотя ни по одному из измерений в отдельности нельзя определить массу, по совокупности множества измерений это сделать можно. Существует вполне определенная процедура, позволяющая вывести массу частицы из среднего результата многократно повторенных измерений. Если измерений достаточно, экспериментаторы могут определить верную массу с определенным уровнем прецизионности (сходимости) и точности (правильности).

ИЗМЕРЕНИЯ И БАК

Вероятностная природа квантовой механики не подразумевает, что мы, по сути, ничего не знаем. Более того, зачастую все обстоит как раз наоборот. Нам известно достаточно много. К примеру, *магнитный момент электрона* — это его неотъемлемая характеристика, которую мы можем вычислить с высочайшей точностью при помощи *квантовой теории поля*, в которой сочетаются квантовая механика и специальная теория относительности и которая служит инструментом для изучения физических свойств элементарных частиц. Мой коллега по Гарварду Джеральд Гэбриелз измерил магнитный момент электрона с точностью до 13 значащих цифр, и он согласуется с прогнозом примерно в такой же степени. Уровень погрешности здесь составляет менее одной триллионной, что делает магнитный момент электрона физической константой, для которой теоретический прогноз и результат измерений согласуются лучше всего.

Никто, кроме физиков, не способен с такой точностью прогнозировать явления окружающего мира. Большинство людей

при виде такой точности сказали бы, что и теория, и предсказанные ею явления известны абсолютно точно. Ученые же считают, что измерения и наблюдения, какими бы точными они ни были, всегда оставляют место для неожиданных открытий и новых идей.

Однако они всегда могут определить конкретный предел для масштаба этих новых явлений. Новые гипотезы могут изменять предсказания, но лишь на уровне неопределенности сегодняшних измерений или на еще более тонком уровне. Иногда предсказанные новые эффекты так слабы, что мы не надеемся добраться до них даже за время жизни Вселенной; в подобных случаях даже ученые способны делать определенные заявления типа: «Этого не произойдет никогда».

Очевидно, измерения Гэбриелза свидетельствуют о том, что квантовая теория поля верна с очень высокой степенью точности. Но даже в этом случае мы не можем гарантировать, что не существует ничего, кроме квантовой теории поля, физики элементарных частиц или Стандартной модели. Как объяснялось в главе 1, под видимой сегодня картиной могут скрываться новые факты, действие которых проявляется только на следующих энергетических уровнях или при еще более точных измерениях. Поскольку нам не удалось пока экспериментально исследовать соответствующие диапазоны расстояний и энергий, ответа на этот вопрос у нас нет.

Эксперименты на БАКе проходят при более высоких энергиях, чем все, что нам удавалось получить до сих пор, и потому открывают для нас новые возможности — возможности открытия новых частиц или взаимодействий непосредственно, путем наблюдений, а не через косвенные эффекты, которые можно зарегистрировать лишь при самых точных измерениях. По всей видимости, измерения на БАКе не достигнут энергий достаточно высоких, чтобы на них проявились отклонения от квантовой теории поля. Но не исключено, что они помогут обнаружить другие явления, которые могли бы предсказать отклонения от прогнозов Стандартной модели; не исключено, что это коснется даже точно измеренного магнитного момента электрона.

Для любой физической модели, более фундаментальной, чем Стандартная модель, даже самое мелкое предсказанное откло-

нение — где внутренний механизм невиданной до сих пор теории даст видимый эффект — стало бы ценнейшим указанием на фундаментальную природу реальности. Отсутствие до сих пор подобных несоответствий говорит об уровне точности существующей теории и о том, насколько высокие энергии надо задействовать, чтобы обнаружить что-нибудь новое, даже не зная в точности природы потенциально новых явлений.

Но настоящий урок эффективной теории заключается в том, что мы по-настоящему приходим к пониманию и объекта исследования, и связанных с этим ограничений только тогда, когда доходим до предела ее применимости. Эффективные теории, учитывающие существующие ограничения, не только классифицируют наши идеи на данном масштабе, но и говорят, при помощи каких последовательных методов можно определить, насколько серьезными могут оказаться новые эффекты при каждом конкретном значении энергии.

Измерения электромагнитного и слабого взаимодействий согласуются с предсказаниями Стандартной модели на уровне 0,1%. Частота столкновений частиц, их массы, скорости распада и другие характеристики совпадают с предсказанными величинами именно на этом уровне точности и сходимости. Таким образом, Стандартная модель оставляет место для новых открытий; новые физические теории, возможно, предскажут отклонения от нее, но эти отклонения должны быть достаточно слабыми, поскольку они оставались незамеченными до сих пор. Эффект от любого нового явления или фундаментальной теории должен оказаться слишком слабым, чтобы до сих пор его никто не заметил, — либо потому, что сами взаимодействия очень слабы, либо потому, что эффекты эти связаны со слишком тяжелыми частицами, которые не удастся получить при достигнутых до сих пор энергиях. Существующие измерения демонстрируют, насколько высокие энергии нужны для непосредственного обнаружения новых частиц или новых взаимодействий, не способных вызвать более серьезных отклонений, чем позволяют текущие неопределенности. Они говорят нам также о том, насколько редкими должны быть подобные события. Существенно повышая точность изме-

рений или проводя опыты в других физических условиях, экспериментаторы ищут отклонения от модели, при помощи которой до сих пор описываются все экспериментальные результаты физики элементарных частиц.

Нынешние эксперименты основаны на представлении, что новые идеи строятся на базе успешной эффективной теории, применимой на более низком уровне энергий. Их цель — открыть новое вещество или новые взаимодействия, не забывая, что физика собирает знания от масштаба к масштабу. Изучая явления при максимальных достижимых на БАКе энергиях, мы надеемся отыскать теорию, лежащую в основе всего, что мы до сих пор наблюдали. Даже если мы не сможем воочию увидеть никаких новых явлений, данные БАКа дадут нам ценные и жесткие ограничения на явления и теории, которые могут существовать за пределами Стандартной модели. И если наши теоретические рассуждения верны, новые явления со временем появятся, но на более высоких энергиях, нежели те, что генерирует сейчас БАК. Подобные открытия вынудят нас расширить Стандартную модель или включить ее в более полную концепцию. Мы полагаем, что более полная модель будет работать с большей точностью на более широком диапазоне расстояний и энергий.

Мы не знаем, которая из теорий окажется верной. Мы не знаем также, когда будут сделаны новые открытия. Ответы на эти вопросы зависят от того, как на самом деле устроен мир, — а мы этого не знаем, ведь иначе нам не пришлось бы ничего исследовать. Но для любой конкретной гипотезы об устройстве мироздания мы представляем, как вычислить проверяемые следствия и определить, когда примерно их можно будет проверить. В двух следующих главах мы рассмотрим, как проводятся эксперименты на БАКе, а затем в части IV поговорим о том, как физики создают модели и предсказывают, что можно будет увидеть в ходе эксперимента.

ГЛАВА 13

ЭКСПЕРИМЕНТЫ CMS И ATLAS

В августе 2007 г. испанский физик и руководитель теоретической группы CERN Луис Альварес-Гаме настойчиво посоветовал мне присоединиться к экскурсии по эксперименту ATLAS, которую физики-экспериментаторы Питер Дженни и Фабиола Джанотти собирались провести для нобелевского лауреата Цзундао Ли и еще нескольких ученых. Невозможно было устоять перед заразительным энтузиазмом Питера и Фабиолы, которые в то время были официальными представителями этого проекта и щедро делились своими знаниями и опытом; их речь была буквально переполнена подробностями эксперимента.



РИС. 29. Взгляд вниз, в «гнездо» для детектора ATLAS, со специальной платформы наверху. Видны трубы, по которым вниз доставлялись детали и строительные материалы

Собравшиеся ученые надели защитные каски и вошли в туннель БАКа. Первой остановкой оказалась специальная площадка, с которой мы смогли заглянуть вниз в громадную выемку, как показано на фотографии (рис. 29). Гигантская полость с вертикальными трубами, по которым оттуда, где мы стояли, на дно полости — на стометровую глубину — предполагалось доставлять части детектора, поразила и заморозила меня. Мы с нетерпением ждали возможности взглянуть на все это поближе.

После первой остановки мы спустились вниз, на дно шахты, где размещался не собранный еще до конца детектор ATLAS. В его незаконченности была особая прелесть — можно было увидеть внутренности детектора, которые позже, разумеется, предполагалось закрыть и спрятать от глаз — по крайней мере до тех пор, пока БАК не будет выключен на длительное время для обслуживания и ремонта. Так что мы получили уникальную возможность заглянуть непосредственно в недра хитроумной и очень внушительной конструкции — разноцветного лабиринта, превосходящего по своим размерам неф собора Парижской Богоматери.

Но размер сам по себе — не главная достопримечательность детектора. На тех из нас, кто вырос в Нью-Йорке или любом другом крупном городе, громадные строительные проекты не производят особого впечатления. Экспериментальная установка ATLAS производит такое сильное впечатление потому, что этот громадный детектор составлен из множества маленьких чувствительных элементов, причем некоторые из них предназначены для измерения расстояний с точностью до микрона. Вообще, в экспериментах на БАКе заключена своеобразная ирония: чтобы точно измерить мельчайшие расстояния, приходится строить громадные установки. Сегодня, демонстрируя на публичных лекциях фотографию этого детектора, я считаю своим долгом обязательно подчеркнуть, что ATLAS — устройство не только большое, но и точное. Это и поражает.

Год спустя, в 2008 г., я вновь приехала в CERN и увидела, насколько продвинулось строительство ATLAS. Торцы установки, открытые в прошлом году, теперь были закрыты. Кроме того, я вместе с физиком Чинцией Да Виа и моим коллегой Гиладом

Пересом (вы можете увидеть его на рис. 30) побывала на не менее впечатляющей экскурсии по CMS — второму универсальному детектору БАКа.



РИС. 30. Мой коллега Гилад Перес перед частью «слоеного» детектора мюонов CMS — ярмом магнита

Гилад до этого не бывал ни на одном из измерительных комплексов БАКа, так что я смогла его глазами увидеть все заново и вновь пережить свое первое впечатление. Воспользовавшись тем, что охрана на детекторе оказалась не слишком строгой, мы облазили всю установку и даже заглянули в трубку, предназначенную для протонного пучка (рис. 31). Гилад заметил, что именно в этом месте, возможно, скоро будут созданы многомерные частицы, которые помогут доказать предложенную мною теорию. Неизвестно, конечно, мою модель они докажут или какую-нибудь другую, и все же приятно вспомнить, что эта трубка — то самое

место, где мы вскоре сможем заглянуть в тайны новых элементов мироздания.

В главе 8 я представила вам машину, которая ускоряет протоны и сталкивает их друг с другом. В этой главе мы сосредоточимся на двух универсальных детекторах проекта БАКа — CMS и ATLAS; именно они будут определять, что получилось в результате столкновения. Остальные измерительные комплексы БАКа — ALICE, LHCb, TOTEM, ALFA и LHCf — предназначены для более конкретных целей, включая попытку лучше понять сильное взаимодействие и провести точные измерения «красивых» кварков (b-кварков). Эти эксперименты, скорее всего, будут изучать элементы Стандартной модели во всех подробностях, но вряд ли откроют законы новой высокоэнергетической (за пределами Стандартной модели) физики, а ведь именно в этом заключается главная цель БАКа. А вот CMS и ATLAS — основные детекторы БАКа; именно на них будут проведены измерения, которые, как мы надеемся, помогут нам обнаружить новые элементы вещества.



РИС. 31. Чинция Да Виа (слева) проходит мимо места, где мы смогли заглянуть в протонную трубку (справа)

В этой главе вы найдете немало технических деталей. Даже теоретикам вроде меня не обязательно знать все эти факты. Те из вас, кого интересует только новая физика, которую нам, возможно, удастся открыть, или концепция БАКа в целом, вполне

могут ее пропустить. И все же нельзя не признать, что экспериментальные установки БАКа производят сильное впечатление. Опустить эти подробности было бы неправильно.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

В определенном смысле детекторы — и ATLAS, и CMS — представляют собой логическое развитие того пути, которое Галилей и другие ученые начали несколько столетий назад. Тогда с изобретения микроскопа началось развитие техники, которая позволяла физикам опосредованно изучать все более мелкие расстояния. Ученые постепенно открывали новые уровни структуры вещества, наблюдать которые можно только при помощи самых крохотных зондов.

Эксперименты на БАКе разработаны для того, чтобы исследовать субструктуры и взаимодействия на расстояниях, в сотни тысяч триллионов раз меньших, чем сантиметр. Это примерно в десять раз меньше по размеру, чем все, что прежде приходилось исследовать ученым. Хотя предыдущие высокоэнергетические эксперименты на коллайдерах, к примеру на тэватроне в Лаборатории имени Ферми в Батавии (штат Иллинойс), строились примерно на тех же принципах, что и новые детекторы БАКа, рекордные энергии и высокая частота столкновений поставили перед инженерами немало новых задач и, вообще говоря, предопределили небывалый размер и сложность устройств.

Подобно космическим телескопам, эти детекторы после строительства становятся практически недоступными. Они находятся глубоко под землей и подвергаются действию сильного излучения. Никто не в состоянии проникнуть в детектор, пока БАК работает. Но, даже когда коллайдер выключен, добраться до конкретного детекторного элемента чрезвычайно сложно, да и времени на это требуется очень много. Именно поэтому детекторы строятся так, чтобы они могли работать по крайней мере десять лет без всякого обслуживания. Впрочем, каждые два года БАК предполагается останавливать на длительный период, в течение которого физики и инженеры получают доступ ко многим компонентам детектора.

В одном очень важном отношении экспериментальные установки для регистрации элементарных частиц сильно отличаются от телескопов и микроскопов: они «смотрят» одновременно во все стороны. Столкновения происходят, частицы вылетают. Детекторы фиксируют любое событие, которое потенциально может оказаться интересным. ATLAS и CMS — универсальные детекторы. Они не регистрируют один только тип частиц или событий, не фиксируют признаки конкретных процессов. Эти установки сконструированы так, чтобы впитывать в себя максимальное количество данных от широчайшего спектра взаимодействий и энергий. Уже потом экспериментаторы, располагающие громадными вычислительными возможностями, попытаются однозначно выделить из общей массы событий информацию о конкретных частицах и продуктах их распада.

В эксперименте CMS — в строительстве установки, работе с ней и обработке полученных данных — принимают участие более 3000 человек из 183 научных институтов, представляющих 38 стран. Возглавляет проект итальянский физик Гвидо Тонелли.

В нарушение традиции Центра, согласно которой главой чего-либо может быть только мужчина, яркая итальянская донна Фабиола Джанотти стала «лицом» второго универсального детектора — ATLAS. Она в полной мере заслужила эту честь. Это очень мягкий, дружелюбный и вежливый человек и прекрасный ученый и организатор. Настоящую же зависть у меня вызывает тот факт, что она, помимо всего прочего, прекрасно готовит; вероятно, это естественно для итальянки, от внимания которой не может уйти даже самая мелкая подробность.

ATLAS тоже собрал вокруг себя гигантский коллектив. На декабрь 2009 г. в этом эксперименте принимали участие свыше 3000 ученых из 174 институтов 38 стран. Первоначально сообщество было сформировано в 1992 г., когда два предложенных эксперимента — EAGLE (Experiment for Accurate Gamma, Lepton, and Energy Measurements — эксперимент по точному измерению гамма-квантов, лептонов и энергии) и ASCOT (Apparatus with Super Conducting Toroids — аппарат с суперпроводящими тороидами) — объединились в один, соединив в конструкции черты того и дру-

ного с некоторыми элементами предложенных детекторов суперколлайдера SSC. Окончательное предложение было опубликовано в 1994 г., а еще два года спустя ATLAS получил финансирование.

Два основных эксперимента БАКа схожи по основной конструкции, но различаются особенностями конфигурации и реализации, что достаточно подробно показано на рис. 32. Они дополняют друг друга, имея немного разные возможности. Новые открытия ставят перед физикой элементарных частиц крайне сложные проблемы, поэтому два различных детектора, настроенные на регистрацию одних и тех же объектов, дадут гораздо более достоверные результаты, если смогут подтвердить находки друг друга. Если оба эксперимента приведут ученых к одному и тому же выводу, это придаст всем участникам проекта уверенности.

Помимо прочего, присутствие двух схожих экспериментальных установок вносит в исследования элемент соперничества; коллеги-экспериментаторы постоянно напоминают мне об этом. Конкуренция заставляет тех и других работать как можно быстрее и при этом тщательнее. Кроме того, члены двух коллективов учатся друг у друга. Хорошая идея обязательно найдет себе дорогу в обоих экспериментах, хотя, вероятно, реализована будет по-разному. В основе решения о строительстве двух экспериментальных установок с общими целями лежит, вероятно, стремление обеспечить условия для конкуренции и сотрудничества, а также своеобразное желание «подстраховаться», запустив два независимых проекта со сходными целями, опирающиеся на немного разные устройства.

Меня часто спрашивают, когда БАК будет проводить мои эксперименты и искать подтверждения моделей, предложенных моими коллегами и мной. Ответ — прямо сейчас, но одновременно там ищут и подтверждения всех остальных предположений. Помощь теоретиков заключается в том, что они предлагают новые объекты и новые стратегии поиска. Цель наших исследований — определить, какие физические элементы или взаимодействия присутствуют на более высоких энергиях, чтобы физики могли отыскать, измерить и интерпретировать результаты и получить таким образом новые представления о фундаментальной реаль-

ности, какой бы она ни оказалась. Только после получения всех данных экспериментаторы, разбитые на команды, начинают разбираться, подтверждает ли полученная информация мои модели (или любые другие потенциально интересные модели) или отвергает их.

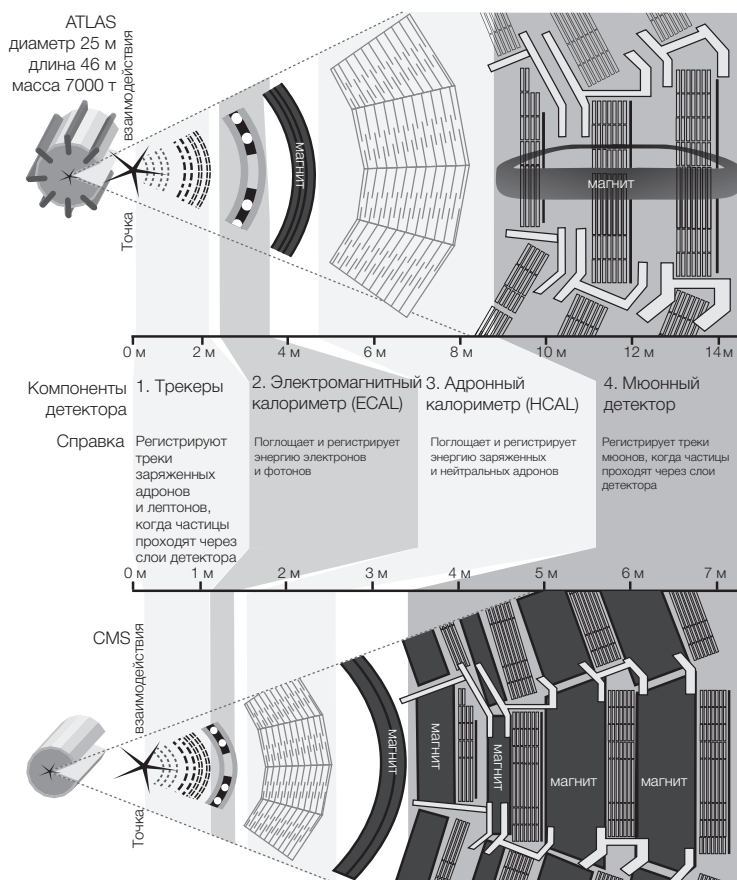


РИС. 32. Детекторы ATLAS и CMS в разрезе. Обратите внимание на то, что общие размеры даны в разных масштабах

Затем теоретики и экспериментаторы проверяют записанные данные и смотрят, не подтверждают ли они какую-нибудь конкретную гипотезу. Хотя многие частицы живут лишь ничтожные доли

секунды и мы не можем увидеть их непосредственно, физики-экспериментаторы при помощи цифровых данных восстанавливают «картинку» и стараются установить, какие частицы составляют основу вещества и как они взаимодействуют. Учитывая сложность детекторов и самих данных, можно сделать вывод, что информации потребуется много. Остальная часть этой главы поможет вам представить, какой будет эта информация.

ДЕТЕКТОРЫ ATLAS И CMS

Мы проследили путь протонов в БАКе от атомов водорода, из которых они извлекаются, через ускорение до высоких энергий в 27-километровом кольце. Два полностью параллельных луча никогда не пересекутся; то же можно сказать и о двух пучках протонов, движущихся в противоположных направлениях внутри специальных тонких трубок. Поэтому в нескольких точках кольца дипольные магниты отклоняют протонные пучки от их неизменного кольцевого маршрута, а квадрупольные магниты фокусируют их таким образом, что протоны двух пучков встречаются и взаимодействуют в пределах области меньше 30 микрон в поперечнике. Точки в центре каждого детектора, где происходят протон-протонные столкновения, известны как точки взаимодействия.

Экспериментальные установки (на рис. 33 изображено устройство детектора CMS) располагаются концентрически вокруг каждой из этих точек, чтобы улавливать и регистрировать многочисленные частицы, которые рождаются при частых столкновениях протонов. Детекторы имеют цилиндрическую форму — ведь, несмотря на то что пучки протонов движутся с равной скоростью в противоположных направлениях, в столкновениях, как правило, проявляется и продольное движение в обоих направлениях. Вообще, поскольку размер отдельного протона много меньше поперечных размеров пучка, большая часть протонов вообще не участвует в столкновениях, а продолжает лететь дальше по трубке, лишь слегка отклонившись от своего пути. Интерес для ученых представляют лишь те редкие события, в которых отдельные протоны сталкиваются лоб в лоб.

Это означает, что хотя большинство частиц продолжает двигаться вдоль направления пучка, потенциально интересные события порождают настоящий дождь частиц, разлетающихся преимущественно в поперечном направлении. Цилиндрические детекторы сконструированы таким образом, чтобы улавливать максимальное число продуктов взаимодействия, учитывая и разлет частиц вдоль направления движения пучка. Детектор CMS располагается возле одной из точек столкновения протонов под землей — возле Сэсси во Франции, недалеко от границы со Швейцарией, а точка взаимодействия детектора ATLAS лежит под швейцарским городом Мэйрин — совсем рядом с основным комплексом CERN (на рис. 34 вы можете видеть условное изображение частиц, разлетающихся после столкновения и проходящих сквозь разрез детектора ATLAS).

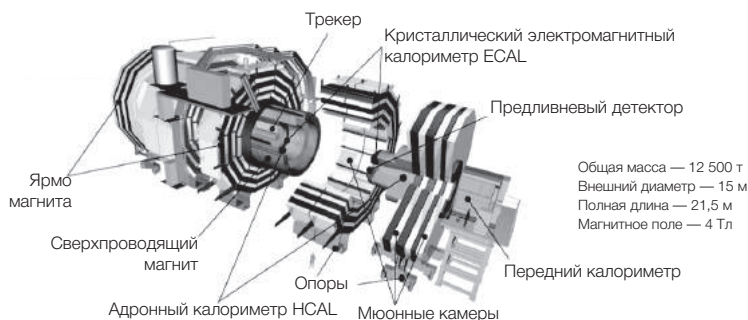


РИС. 33. Компьютерное изображение устройства CMS с показом отдельных компонентов. (Графика печатается с разрешения CERN и проекта CMS.)

Частицы Стандартной модели характеризуются массой, спином и характером взаимодействий, в которых они участвуют. Что бы ни возникало в итоге в результате столкновений, и та и другая экспериментальная установка распознают все при помощи известных сил и взаимодействий Стандартной модели. Иной возможности у нас нет. Частицы без соответствующих зарядов покинули бы область взаимодействия, не оставив за собой следа.

Но, когда детектор регистрирует взаимодействия из арсенала Стандартной модели, он может разобраться в них и «понять», что произошло. Именно это и должны делать обе эксперимен-

тальные установки. И CMS, и ATLAS измеряют энергию и импульс фотонов, электронов, мюонов, тау-лептонов и, наконец, частиц, участвующих в сильном взаимодействии, которые вовлекаются в потоки плотно сгруппированных частиц, летящих в одном направлении. Детекторы, установленные вокруг точки взаимодействия, должны измерять энергию или заряд и таким образом идентифицировать частицы. Чтобы не утонуть в море информации, они снабжены сложнейшими компьютеризированными устройствами, программным обеспечением и электроникой. Экспериментаторы распознают заряженные частицы, потому что те взаимодействуют с другими, известными нам заряженными частицами. Они регистрируют также все объекты, которые участвуют в сильном взаимодействии.

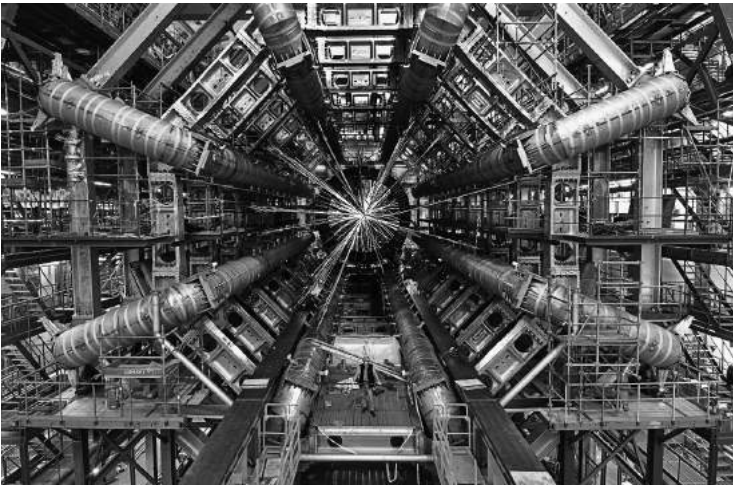


РИС. 34. Условное изображение события в детекторе ATLAS. Показан разлетающийся в поперечных направлениях дождь частиц, пронизывающих по пути слои детектора. (Обратите внимание: человек внизу помогает представить масштаб установки, но на самом деле, когда в детекторе находятся люди, столкновений не бывает.) Хорошо видны характерные тороидальные магниты. (Фото печатается с разрешения Европейского центра ядерных исследований и руководства проекта ATLAS.)

Все компоненты детектора, по существу, отслеживают перенос заряда — те электроны, что возникают при взаимодействии

частиц с материалом детектора. Иногда в веществе возникает ливень частиц — множество электронов и фотонов, а иногда вещество просто ионизируется и регистрируется заряд. Но в любом случае чувствительные элементы регистрируют сигнал и посылают его в компьютеры для обработки и анализа.

Магниты также представляют собой принципиально важную часть обоих детекторов. Они необходимы для измерения как знака зарядов, так и импульсов заряженных частиц. Электрически заряженные частицы в магнитном поле отклоняются от прямой, причем радиус изгиба траектории зависит от скорости движения частицы. Чем больше импульс частицы, тем прямее она движется, а частицы с противоположными зарядами отклоняются в противоположные стороны. Частицы в БАКе обладают огромной энергией (и импульсом), поэтому экспериментальным установкам нужны очень сильные магниты, иначе не удастся заметить и измерить еле заметную кривизну треков энергичных заряженных частиц.

Установка под названием «Компактный мюонный соленоид» (Compact Muon Solenoid, CMS) — меньшая из двух главных универсальных детекторов БАКа, зато более тяжелая; ее ошеломляющая масса достигает 12 500 т. «Компактные» размеры таковы: 21 м в длину и 15 м в диаметре. Это чуть меньше, чем размеры ATLAS, и все же достаточно, чтобы полностью занять теннисный корт.

Отличительная особенность CMS — сильное магнитное поле напряженностью 4 Тл, на которое намекает слово «соленоид» в названии. Соленоид во внутренней части детектора представляет собой цилиндрическую катушку диаметром 6 м из сверхпроводящего кабеля. Ядро магнита, проходящее через наружную часть детектора, также производит сильное впечатление — и, кстати говоря, составляет значительную часть его громадной массы. Железа в нем больше, чем в парижской Эйфелевой башне.

Обратите внимание также на слово «мюонный» в названии установки (по крайней мере, меня оно в свое время заинтересовало). Быстрое распознавание электронов и мюонов — их более тяжелых эквивалентов, проникающих в самые внешние слои детектора — может быть очень важно для обнаружения новых частиц, поскольку именно такие энергичные частицы иногда рождаются

при распаде тяжелых объектов. Поскольку эти объекты не участвуют в сильном взаимодействии, они, скорее всего, представляют собой нечто новое — ведь протоны автоматически их не порождают. Таким образом, эти без труда распознаваемые частицы (мюоны) могут указывать на присутствие какой-нибудь интересной распавшейся частицы, рожденной во время столкновения. Магнитное поле в CMS с самого начала проектировалось в расчете на энергичные мюоны, с тем чтобы установка могла их «ловить». Это означает, что детектор непременно зарегистрирует данные о любом событии с их участием, даже если вынужден будет оставить за бортом большое количество иной информации.

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), как и CMS, содержит в своем названии ссылку на магниты, поскольку для его работы также необходимо сильное магнитное поле. Слово «тороидальный» в названии относится именно к магнитам. Поле, которое они создают, не такое мощное, как в CMS, зато занимает громадный объем. Именно из-за громадных магнитных тороидов ATLAS стал более крупным из двух универсальных детекторов и вообще самой крупной экспериментальной установкой в истории человечества. Его длина 46 м, диаметр — 25 м; он удобно устроился в пещере длиной 55 и высотой 40 м. Весит детектор 7000 т и уступает CMS по массе почти вдвое.

Чтобы иметь возможность измерять все характеристики частиц, ATLAS окружает зону столкновений множеством все более крупных цилиндрических детекторных элементов. В конструкции и CMS, и ATLAS предусмотрено несколько устройств, предназначенных для измерения траекторий и зарядов пролетающих частиц. Вылетая из точки столкновения, частицы встречают на своем пути *внутренние трекары*, назначение которых — точно измерить положение частицы неподалеку от точки вылета. Затем идут *калориметры*, измеряющие энергию, которую, останавливаясь, отдают не слишком энергичные частицы. Наконец приходит очередь *мюонных детекторов*, расположенных во внешнем контуре установки; они измеряют энергию мюонов, обладающих высокой проникающей способностью. Каждый из перечисленных детекторных элементов состоит из множества слоев, что увеличивает

точность каждого измерения. Сейчас мы с вами совершим экскурсию по экспериментальным установкам вслед за частицами и посмотрим, как россыпь частиц, вылетающих из точки столкновения, превращается в массив легко распознаваемой информации.

ТРЕКЕРЫ

В самой глубине детектора, ближе всего к зоне взаимодействия, располагаются так называемые трекары. Их задача — точно зафиксировать положение вылетающих из зоны заряженных частиц, чтобы затем можно было восстановить траекторию каждой частицы и измерить импульс. И в CMS, и в ATLAS трекары включают в себя несколько концентрических компонент.

Ближайшие к пучку и зоне взаимодействия слои состоят из самых мелких сегментов и обеспечивают большую часть данных. В этом слое, который начинается в нескольких сантиметрах от протонной трубки, располагаются кремниевые *пиксели* с крохотными датчиками. Их задача — чрезвычайно точное фиксирование положений частиц возле самой точки взаимодействия, где плотность потока частиц максимальна. Кремний используется в современной электронике потому, что на каждом крохотном его кусочке можно вытравить множество тонких элементов, и детекторы элементарных частиц используют его по той же причине. Пиксельные элементы CMS и ATLAS способны отслеживать пролет заряженных частиц с чрезвычайно высоким разрешением. Соединяя пиксели друг с другом и с точкой взаимодействия, из которой разлетаются частицы, экспериментаторы очень точно восстанавливают траектории, по которым проходят частицы во внутренней области детектора в непосредственной близости от пучка.

Первые три слоя детектора CMS — от самого внутреннего до радиуса 11 см — состоят из пикселей размером 100×150 мкм; всего таких пикселей 66 млн. Внутренний пиксельный детектор ATLAS не менее точен. Самая мелкая единица внутренней части детектора, с которой можно считать информацию, имеет размер 50×400 мкм; полное число таких пикселей в ATLAS — около 82 млн, то есть немного больше, чем в CMS.

Пиксельным детекторам с их десятками миллионов ячеек необходима сложная электронная система, обеспечивающая надежное и своевременное считывание информации. Быстродействие и масштабы системы считывания, а также сильнейшее излучение, которому будут подвергаться элементы внутренних детекторов, — вот главные технические проблемы, которые пришлось решать при создании обеих установок (рис. 35).

Внутренние трекары состоят из трех слоев; соответственно, для каждой достаточно долго живущей заряженной частицы, проходящей сквозь них, фиксируется по три точки. Начатые здесь треки будут продолжены в следующих слоях и в конце концов дадут устойчивый след, который можно будет однозначно соотнести с какой-то определенной частицей.

Мы с Мэттью Бакли уделили серьезное внимание геометрии внутренних трекаров. Мы поняли, что по случайному совпадению некоторые возникшие при столкновении новые заряженные частицы, распадающиеся через слабое взаимодействие до своих нейтральных партнеров, оставят после себя след длиной всего несколько сантиметров. Это означает, что в этих особых случаях их путь целиком будет лежать в пределах толщины внутреннего трекара, и помимо считанной здесь информации ничего об этих частицах известно не будет. Мы рассмотрели дополнительные трудности, с которыми столкнутся экспериментаторы в подобных ситуациях — ведь им придется опираться только на данные с пикселей самых глубоких слоев внутреннего детектора.

Большинство заряженных частиц, однако, живут достаточно долго, чтобы добраться до следующего элемента трекара, так что чаще всего детекторы регистрируют гораздо более длинную траекторию. Для этого снаружи от внутренних пиксельных детекторов, дающих высокое разрешение в двух направлениях, располагаются кремниевые стрипы (полоски), размеры которых в одном направлении сильно уступают размерам в другом. Длинные стрипы хорошо согласуются с цилиндрической формой установки и позволяют покрыть гораздо большую площадь (не забывайте, что площадь цилиндра с увеличением радиуса быстро увеличивается).

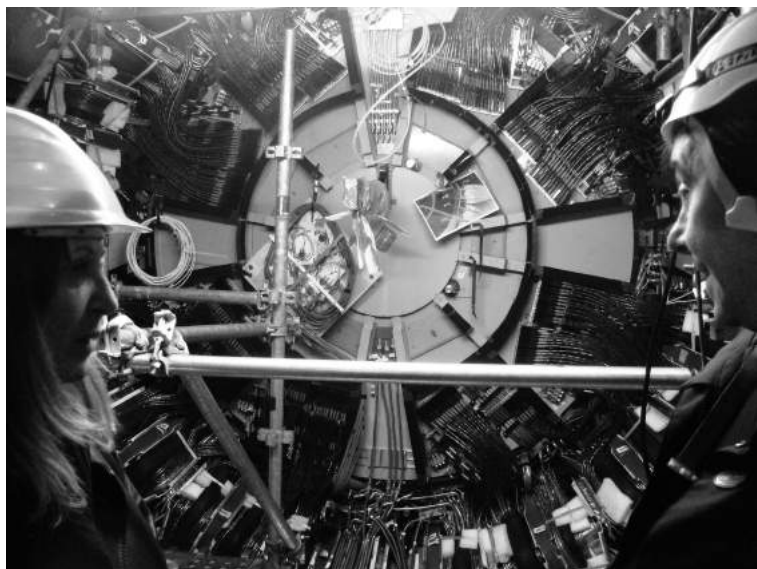


РИС. 35. Чинция Да Виа и инженер Доменико Даттола на лесах перед одной из головок кремниевого трекера CMS, куда подводятся кабели считывающей системы

Кремниевый трекер CMS состоит из 13 слоев в центральной части и 14 — на концах цилиндра. После первых трех мелкопиксельных слоев, которые мы только что описали, идут четыре слоя кремниевых стрипов. Детекторные элементы здесь представляют собой полоски длиной 10 см и шириной 180 мкм. Остальные шесть слоев еще менее точны и дают более грубые координаты. Полоски здесь имеют длину 20 см, а ширину от 80 до 205 мкм. Эти слои достигают радиуса 1,1 м. Полное число кремниевых полосок во внутреннем трекере CMS составляет 9,6 млн. Все они необходимы для надежного восстановления траекторий большинства пролетающих сквозь них заряженных частиц. В целом, если развернуть все кремниевые слои на плоскости, внутренний детектор CMS покроет примерно площадь теннисного корта — значительное достижение по сравнению с предыдущим кремниевым детектором, чувствительные элементы которого занимали площадь всего около 2 м^2 .

Внутренний детектор ATLAS доходит до несколько меньшего радиуса — 1 м — и тянется в продольном направлении на 7 м. Как и в CMS, снаружи от трех внутренних пиксельных слоев располагается полупроводниковый стриповый детектор SCT, состоящий из четырех слоев кремниевых стрипов. В ATLAS использованы полоски длиной 12,6 см и шириной 80 мкм. Полная площадь SCT также огромна и составляет 61 м². Если пиксельные детекторы важны при восстановлении подробностей трека в самом его начале, возле точки взаимодействия, то SCT играет громадную роль в восстановлении трека в целом — ведь он регистрирует трек на гораздо более значительной протяженности и с высокой точностью (хотя и в одном направлении).

В отличие от CMS, внешний трекер установки ATLAS изготовлен не из кремния. Так называемый детектор переходного излучения TRT — самый внешний компонент внутреннего детектора — состоит из газонаполненных трубочек и служит не только трекером, но и детектором переходного излучения. Треки заряженных частиц регистрируются и измеряются, когда частицы ионизируют газ в «соломинках» — дрейфовых трубках длиной 144 см и толщиной 4 мм, снабженных в центральной части датчиками ионизации. Здесь тоже максимальное разрешение обеспечивается в поперечном направлении. «Соломинки» измеряют траектории с точностью до 200 мкм, что, конечно, меньше, чем во внутреннем треkere, зато они покрывают гораздо большую площадь. Кроме того, этот детектор помогает различить частицы, двигающиеся со скоростями, очень близкими к скорости света, и порождающими так называемое переходное излучение. Это помогает различить частицы разной массы — ведь более легкие частицы, как правило, движутся быстрее — и, соответственно, опознать электроны.

Если такое обилие подробностей кажется вам ошеломляющим, помните, что даже большинству физиков такое количество информации ни к чему. Эти данные позволяют почувствовать масштаб и точность этих великолепных инструментов и, разумеется, важны для любого, кто работает с конкретным компонентом детектора. Но даже те, кто хорошо знаком с одним компонентом, редко с таким же вниманием следят за остальными. Я узнала об этом

совершенно случайно, когда пыталась выяснить авторство нескольких фотографий детектора и понять, насколько точны некоторые графики и диаграммы. Так что не расстраивайтесь, если вам не удалось понять все это с первого раза. Все эти подробности известны, конечно, немногочисленным специалистам, координирующим строительство, но даже многие экспериментаторы не держат их постоянно в своей голове.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР ECAL

Пройдя сквозь три типа трекеров, частица попадает в следующую по ходу путешествия секцию детектора — электромагнитный калориметр (ECAL). Этот прибор регистрирует энергию, которую отдают при торможении все частицы — и заряженные, и нейтральные, — и координаты точки, в которой они покидают (если хватает энергии) его зону; в первую очередь речь идет о фотонах и электронах. Детекторный механизм отслеживает возникновение ливня частиц, который порождают случайные электроны и фотоны при взаимодействии с веществом калориметра. Эта часть детектора выдает для каждой из этих частиц и точное значение энергии, и координатную информацию.

Материал, использованный в калориметре ECAL детектора CMS, сам по себе удивителен и заслуживает внимания. Это кристаллический вольфрамат свинца, выбранный за свою плотность и оптическую чистоту, — именно то, что нужно для торможения и регистрации прибывающих электронов и фотонов. Возможно, по моей фотографии на рис. 36 вы сможете себе это представить. Это поразительное вещество, невероятно прозрачное. Вы наверняка никогда не видели ничего настолько плотного и при этом настолько прозрачного. Полезны эти кристаллы еще и потому, что они способны измерять электромагнитную энергию невероятно точно, а точность, как мы узнаем в главе 16, может сыграть принципиально важную роль в поисках неуловимого бозона Хиггса.

В экспериментальной установке ATLAS для остановки электронов и фотонов используется свинец. Взаимодействия, происходящие в этом поглотителе, переводят первоначальную энергию движущейся

заряженной частицы в ливень частиц, суммарная энергия которых, собственно, и регистрируется. Затем эта энергия передается жидкому аргону — инертному газу, который не взаимодействует химически с другими элементами и очень устойчив к действию излучения. По его реакции можно судить об энергии первоначальной частицы.

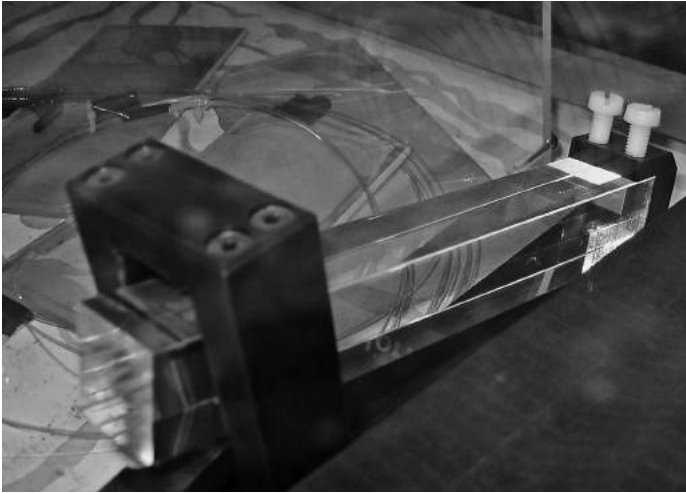


РИС. 36. Такие кристаллы вольфрамата свинца используются в электромагнитном калориметре CMS

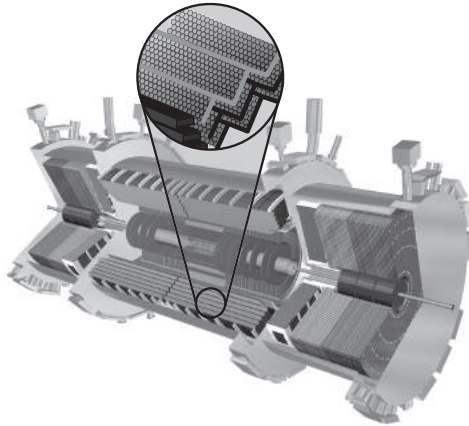


РИС. 37. Структура электромагнитного калориметра в детекторе ATLAS напоминает гармошку

Этот элемент детектора ATLAS произвел на меня сильное впечатление во время экскурсии. Фабиола принимала участие в разработке и конструировании этого калориметра с радиальными слоями свинцовых пластин, уложенных подобно мехам гармошки и разделенных тонкими слоями жидкого аргона и электродами. Она рассказала нам, что такое строение позволяет заметно ускорить процесс считывания результатов, потому что в этом случае электроника располагается намного ближе к элементам детектора (рис. 37).

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР HCAL

Следующим на пути от протонной трубки и зоны взаимодействия вдоль радиуса наружу располагается адронный калориметр HCAL. Этот прибор измеряет энергию и положение адронов — частиц, участвующих в сильном взаимодействии, — хотя и менее точно, чем электромагнитный калориметр измеряет энергию электронов и фотонов.

Снижение точности — вынужденная мера. Дело в том, что HCAL громаден. В детекторе ATLAS, к примеру, этот калориметр имеет диаметр 8 м и длину 12 м. Сегментировать HCAL с той же точностью, что и ECAL, было бы неподъемно дорого, поэтому точность трековых измерений в нем сознательно снижена. Кроме того, измерять энергию частиц, участвующих в сильном взаимодействии, попросту сложнее (вне зависимости от сегментации), потому что флуктуации энергии в адронных ливнях намного больше.

В установке CMS адронный калориметр собран из слоев материала высокой плотности — бронзы или стали, — чередующихся с пластиковыми сцинтилляторными ячейками, которые регистрируют энергию и положение пролетающих сквозь них адронов по интенсивности сцинтилляции. В центральной части детектора ATLAS в качестве материала-поглотителя используется железо, но сам адронный калориметр работает примерно так же.

МЮОННЫЙ ДЕТЕКТОР

Самый внешний слой в любом универсальном детекторе элементарных частиц составляют мюонные камеры. Мюоны, как вы

помните, — это заряженные частицы, похожие на электроны, но в 200 раз тяжелее. Ни электромагнитный, ни адронный калориметры не способны их остановить. Эти частицы, не обращая ни на что внимания, летят напрямик в толстый внешний слой детектора (рис. 38).

Энергичные мюоны очень полезны в поиске новых частиц; в отличие от адронов, они достаточно изолированы, их траектории относительно легко регистрировать и измерять. Экспериментаторы хотят регистрировать все события с участием энергичных мюонов, разлетающихся в поперечном направлении, потому что самые интересные столкновения редко обходятся без их участия. Мюонные детекторы могут также оказаться полезными для регистрации любых других тяжелых и стабильных заряженных частиц, которым удастся добраться до внешних пределов детектора.

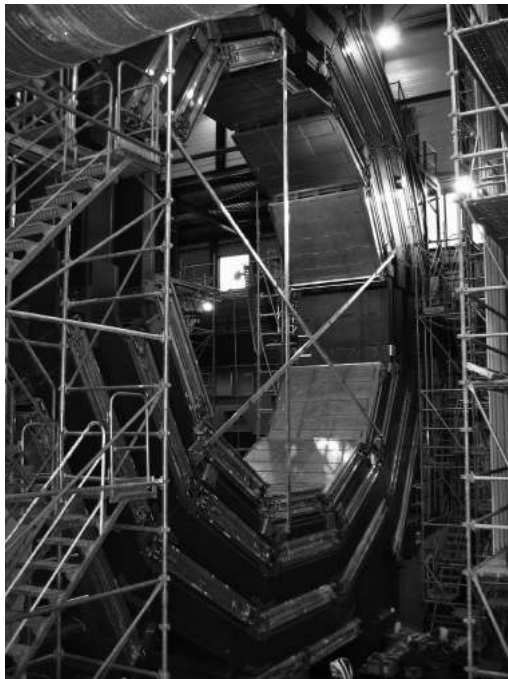


РИС. 38. В CMS мюонный детектор встроен в ярмо магнита. Снимок сделан в период строительства

Мюонные камеры регистрируют следы мюонов, достигших внешнего слоя детекторов. В некоторых отношениях мюонный детектор похож на внутренний — те же трекары и магнитные поля, которые отклоняют мюоны от прямой, чтобы можно было измерить изгиб траектории и импульс частицы. Однако магнитное поле в мюонных камерах отличается от поля во внутренних трекарах, да и сам детектор намного толще, что позволяет измерять даже очень небольшую кривизну траектории и, соответственно, регистрировать частицы с более высоким импульсом (их полет в магнитном поле меньше отклоняется от прямой). В CMS мюонные камеры занимают пространство от трех метров до внешнего радиуса детектора — примерно 7,5 м; в ATLAS они начинаются на четырех метрах и тянутся до внешних пределов детектора — до 11 м. Эти громадные конструкции позволяют измерять положение частиц с точностью до 50 мкм.

ТОРЦЕВЫЕ ЧАСТИ

Последние элементы детектора, о которых мы еще не говорили, — оконечные элементы, детекторы на переднем и заднем концах экспериментальной установки (на рис. 39 можно увидеть их примерную структуру). Теперь мы будем двигаться не по радиусу от луча наружу — последним этапом в этом направлении были мюонные детекторы, — а вдоль оси цилиндра к его концам и ограничивающим их «крышкам». Цилиндрическая часть установки «закупорена» там специальными детекторами, назначение которых — обеспечить регистрацию максимального числа частиц. Оконечные элементы устанавливались на место последними, поэтому в 2009 г. при посещении коллайдера я с такой легкостью рассматривала слоеный пирог внутреннего устройства детекторов.

Дополнительные детекторы на торцевых частях детекторного цилиндра установлены для того, чтобы экспериментаторы могли быть уверены: детектор регистрирует импульсы всех без исключения частиц. Их цель — замкнуть пространство экспериментальной установки, сделать его *герметичным* и не оставить нигде пропусков и неучтенных отверстий. Герметичные измере-

ния гарантируют, что будут обнаружены даже не взаимодействовавшие или очень слабо взаимодействовавшие частицы. Если наблюдается «недостающий» поперечный импульс, это означает, что при столкновении должна была образоваться одна или несколько частиц, не вступающих в непосредственно обнаружимые взаимодействия. Подобные частицы обладают импульсом, и импульс, который они уносят с собой, сообщает экспериментаторам об их существовании.

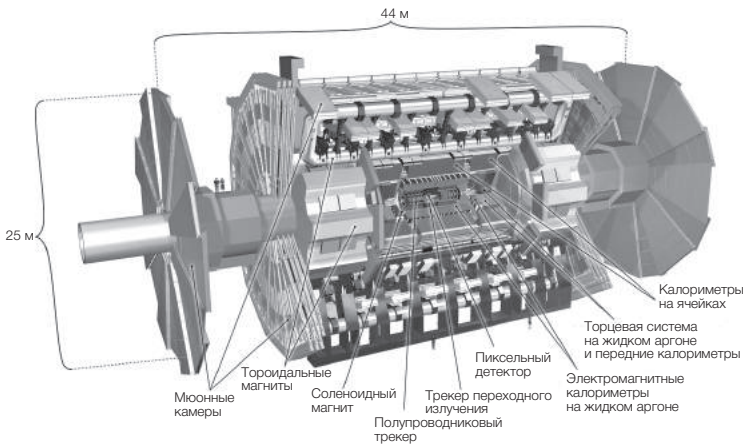


РИС. 39. Компьютерное изображение детектора ATLAS. Показаны многочисленные слои и отдельные оконечные элементы. (Публикуется с разрешения CERN и ATLAS.)

Если нам известно, что детектор регистрирует и измеряет все поперечные импульсы — и при этом после столкновения создается впечатление, что импульс, направленный перпендикулярно пучку, не сохраняется, — это означает, что какие-то частицы остались незамеченными и унесли с собой часть импульса. Мы уже видели, что детекторы очень точно измеряют импульс в перпендикулярной плоскости. Калориметры в передней и задней областях обеспечивают герметичность и гарантируют, что незамеченной может остаться лишь очень малая часть энергии или импульса, перпендикулярных пучку.

Установка CMS имеет в своих торцевых областях стальные поглотители и кварцевые нити, которые еще плотнее и потому лучше разделяют направления движения частиц. Латунь в оконечных элементах — вторичное сырье; прежде она применялась в российских артиллерийских снарядах. В передней части установки ATLAS используются калориметры на жидком аргоне, способные регистрировать не только электроны и фотоны, но и адроны.

МАГНИТЫ

В обоих детекторах осталось еще несколько компонентов, которых имеет смысл описать подробнее, — это магниты. Магнит — не детекторный элемент в том смысле, что непосредственно он не регистрирует никаких характеристик частиц. Однако магниты необходимы для регистрации частиц; они помогают определить импульс и заряд, без которых невозможно распознать частицы и их треки. Магнитное поле отклоняет движущиеся заряженные частицы, поэтому их треки получаются изогнутыми, а не прямыми. Насколько сильно и в каком направлении они отклоняются, зависит от энергии и заряда каждой частицы.

Громадный соленоидный магнит CMS изготовлен на основе замороженной сверхпроводящей ниобиево-титановой катушки длиной 12,5 м и диаметром 6 м. Этот магнит (самый большой в мире магнит такого типа) — главная, определяющая деталь детектора. Витки проволоки в соленоиде намотаны на металлический сердечник и при пропускании тока генерируют магнитное поле. По заключенной в нем энергии этот магнит соответствует примерно полутонне взрывчатки. Само собой разумеется, на случай сбоя и внезапной потери сверхпроводимости приняты особые меры предосторожности. В сентябре 2006 г. было проведено успешное испытание соленоида с напряженностью поля 4 Тл, но на самом деле он будет работать с полем несколько меньшей напряженности — 3,8 Тл; инженеры надеются, что это увеличит срок службы устройства.

Соленоид достаточно велик, чтобы трекары и калориметры можно было разместить внутри него. Мюонные детекторы, с дру-

гой стороны, располагаются снаружи, вдоль внешней поверхности детектора. При этом четыре внутренних слоя мюонного детектора вплетены в громадную железную конструкцию, которая окружает магнитную катушку; эта конструкция сдерживает и направляет магнитное поле, обеспечивая его однородность и стабильность. Конструкция длиной 21 м и диаметром 14 м простирается до полного семиметрового радиуса детектора. По существу, она тоже является частью мюонной системы — ведь по идее только мюоны из всех известных заряженных частиц способны преодолеть 10 000 т железа и пройти сквозь мюонные камеры. (На самом деле энергичные адроны тоже иногда проходят сквозь все это, доставляя экспериментаторам головную боль.) Магнитное поле ярма отклоняет мюоны во внешнем детекторе. Поскольку степень отклонения мюона в магнитном поле зависит от его импульса, ярмо необходимо для измерения импульсов и энергий этих частиц. Структурно стабильный громадный магнит играет и еще одну важную роль. Он является несущей конструкцией установки и защищает ее от гигантских сил, порожденных ее собственным магнитным полем.

Магнит детектора ATLAS сконфигурирован совершенно иначе. В этом детекторе используются магниты двух разных систем: соленоид на 2 Тл, окружающий систему трекеров, и громадные тороидальные магниты во внешней части детектора, слои которых перемежаются со слоями мюонных камер. Если взглянуть на фотографию ATLAS (или на саму установку), то самыми заметными элементами окажутся восемь громадных тороидальных структур (см. рис. 34) и два дополнительных тороида, прикрывающих концы цилиндра. Генерируемое ими магнитное поле тянется на 26 м вдоль оси пучка и на 11 м от начала мюонного спектрометра в радиальном направлении.

При посещении ATLAS мне рассказывали, что в момент установки на место эти магниты были овальными (если смотреть сбоку). Инженеры учли фактор гравитации и верно рассчитали, что через некоторое время после установки тороиды под действием собственного веса станут более круглыми.

Сильное впечатление на меня произвела еще одна история. Оказывается, инженеры ATLAS учли крохотное поднятие пола тон-

неля примерно на 1 мм в год за счет гидростатического давления породы, связанного с образованием в ней полости. Они рассчитали установку таким образом, чтобы это крохотное движение привело ее в оптимальное положение в 2010 г., когда намечался первый пуск коллайдера на полную мощность. Из-за всевозможных задержек получилось не так, однако к настоящему моменту грунт под установкой перестал двигаться, и теперь она до конца эксплуатации останется в правильном положении. Несмотря на сентенцию бейсболиста и философа Йоги Берра о том, что «предсказывать трудно, особенно будущее», инженеры ATLAS сделали все верно.

РАСЧЕТЫ

Ни одно описание БАКа не может быть полным без разговора о его громадных вычислительных мощностях. Помимо замечательных технических решений, в результате которых были созданы трекиеры, калориметры, мюонные системы и магниты и которые мы только что обсудили, можно говорить о том, что для обработки ошеломляющего количества данных, порождаемого многочисленными столкновениями, необходимы тщательно скоординированные и организованные вычисления, которые проводятся одновременно по всему миру.

Тот факт, что БАК работает с в 7 раз более высокими энергиями, чем тэватрон (прежний рекордсмен по энергии столкновений), — это еще не все. События в нем происходят в 50 раз чаще. БАК должен справляться с данными (по существу, с картинками очень высокого разрешения) о событиях, которые происходят с частотой примерно до миллиарда столкновений в секунду, причем «картинка» каждого события содержит около мегабайта информации.

С таким объемом данных не могла бы справиться ни одна вычислительная система. Поэтому специальные триггерные системы «на лету» принимают решения о том, какую информацию следует сохранить, а от какой можно избавиться. Разумеется, ливиную долю составляют совершенно обычные столкновения протонов

с участием сильного взаимодействия. Большая часть этих столкновений никому не интересна, потому что они представляют хорошо известные физические процессы и не дают ничего нового.

Столкновение протонов в каком-то смысле напоминает столкновение двух мешочков с горохом. Эти мешочки мягкие, поэтому большую часть времени они мотаются из стороны в сторону, сжимаются и не делают во время столкновения ничего интересного. Но иногда при «стыковке» мешочков отдельные горошины сталкиваются друг с другом лоб в лоб с огромной силой — иногда настолько большой, что мешочки лопаются. В этом случае отдельные столкнувшиеся горошины с силой разлетаются во все стороны, потому что они твердые и энергия их столкновений более локализована, а остальные горошины продолжают лететь дальше в том же направлении.

Точно так же при столкновении протонов в пучке отдельные их составляющие могут столкнуться друг с другом и породить интересное явление, тогда как остальные объекты продолжают свой полет по трубке в прежнем направлении.

Однако в отличие от столкновения горошин, при котором они просто меняют направление полета, столкновение протонов происходит иначе. Их составные части — кварки, антикварки и глюоны — сталкиваются между собой; при этом первоначальные частицы могут превратиться в энергию или породить другие типы вещества. И если на более низких энергиях в столкновениях принимают участие в первую очередь три валентных кварка, несущие на себе заряд протона, то на более высоких энергиях виртуальные квантово-механические эффекты порождают значительное количество глюонов и антикварков, как мы уже видели в главе 6. Ученым интересны те столкновения, в которых участвует хоть что-нибудь из этих виртуальных составляющих протона.

В энергичном протоне высокой энергией обладает не только он сам, но и все содержащиеся внутри кварки, антикварки и глюоны. Тем не менее их энергия никогда не равняется полной энергии протона, а составляет, как правило, лишь небольшую ее долю. Поэтому чаще всего в столкновениях кварков и глюонов задействуется

слишком малая часть энергии протона, и тяжелые частицы не рождаются. Возможно, из-за невысокой силы взаимодействия или недостаточной для новых частиц массы интересные столкновения с участием невиданных доселе частиц или сил случаются гораздо реже, чем «скучные» столкновения в рамках Стандартной модели.

Как и в случае с мешочками, большинство столкновений не вызывают особого интереса. В них протоны либо всего лишь слегка касаются друг друга, либо сталкиваются, порождая обычные события Стандартной модели, о которых нам уже известно и которые не в состоянии научить нас ничему новому. С другой стороны, прогнозы говорят о том, что примерно одно столкновение из миллиарда в БАКе может оказаться интересным и породить какую-нибудь новую частицу, такую, например, как бозон Хиггса.

Итак, суть дела сводится к тому, что сколько-нибудь интересные события происходят лишь в короткие удачные промежутки времени. Теперь ясно, почему нам нужно так много столкновений и почему нам важна так называемая светимость коллайдера. Лишь небольшая доля происходящих в нем событий оказывается необычной и несет в себе новую информацию.

Выделить потенциально интересные события из общей массы — задача триггеров; триггерами называют аппаратные и программные средства, специально предназначенные для распознавания таких событий. Чтобы хотя бы приблизительно осознать тяжесть этой задачи, представьте, что у вас есть 150-мегапиксельная фотокамера (именно такое количество информации БАК получает с одного столкновения протонных сгустков), способная делать 40 млн снимков в секунду (с такой частотой идут столкновения сгустков). Учтем, что при каждом столкновении сгустков происходит 20–25 событий, и получим результат — около миллиарда физических событий в секунду. Триггер — аналог механизма, который будет оставлять для вас лишь интересные и удачные снимки. Триггеры можно сравнить также с антиспамовыми фильтрами. Их задача — сделать так, чтобы на компьютеры экспериментаторов попадали только интересные данные.

Триггеры должны распознать потенциально интересные столкновения и отбросить те, которые не несут никакой новой инфор-

мации. Сами события — то, что покидает зону взаимодействия и регистрируется детекторами — должны отличаться от обычных процессов Стандартной модели. Чтобы выделить и сохранить интересные события, необходимо знать, как они должны выглядеть. Перед триггерами стоит невероятно сложная задача. Они должны проредить пресловутый миллиард событий в секунду и оставить из него лишь несколько сотен событий, каждое из которых может оказаться интересным.

Эту задачу выполняет комбинация аппаратных и программных фильтров. Каждый триггер из последовательной цепочки отвергает большую часть поступающих на него событий как неинтересные, оставляя лишь небольшую их часть, справиться с которой уже намного легче. Эти данные, в свою очередь, анализируются компьютерными системами в 160 академических институтах по всему миру.

Триггер первого уровня — это встроенное в детекторы аппаратное устройство, на которое ложится львиная доля работы по распознаванию характерных признаков потенциально интересного события; он отбирает, к примеру, все события, в результате которых рождаются энергичные мюоны или в калориметрах выделяется заметная энергия в поперечном направлении. Несколько микросекунд до срабатывания первого триггера вся полученная от столкновения сгустков энергия хранится в буфере. Триггеры более высоких уровней представляют собой специальные программы; алгоритмы отбора действуют на большом компьютерном кластере, расположенном рядом с соответствующим детектором. Триггер первого уровня снижает число событий примерно в 10 000 раз: из миллиарда событий в секунду остается около 100 000. Программные триггеры снижают это количество еще примерно в тысячу раз, оставляя всего лишь несколько сотен потенциально интересных событий.

Каждое событие, проходящее через фильтр триггера, несет в себе громадное количество данных — те самые показания детекторных элементов, о которых мы говорили; на одно событие приходится больше мегабайта информации. При нескольких сотнях потенциально интересных событий в секунду экспериментальная

установка каждую секунду занимает более 100 Мбайт дискового пространства; в год набирается более одного петабайта — 10^{15} байт, или один квадриллион байт (часто ли вам приходится пользоваться такими цифрами?); это эквивалентно нескольким сотням тысяч DVD-дисков с информацией.

Тим Бернерс-Ли, придумывая Всемирную паутину, думал о громадных объемах данных CERN и о том, что экспериментаторы всего мира должны обмениваться информацией в реальном времени. Вычислительная грид-система проекта БАКа — следующий серьезный шаг Центра на пути организации научных вычислений. Эта «решетка», запущенная в конце 2008 г. после разработки большого количества специальных компьютерных программ, призвана помочь экспериментаторам разобраться с огромными объемами получаемых данных и облегчить их обработку. Грид-система использует в своей структуре как частные оптоволоконные кабели, так и высокоскоростные участки общедоступного Интернета. Решеткой (Grid) она называется потому, что данные в ней не привязаны к одному-единственному серверу, а распределены по компьютерам по всему миру — примерно так же, как электропитание большого города не привязано к одной конкретной электростанции.

Информация о событиях, прошедших через триггерные фильтры, сначала закладывается на хранение, а затем распределяется по решетке по всему земному шару. Через решетку компьютерные сети в разных концах света получают свободный доступ к записанной в нескольких копиях информации. Если Всемирная паутина предназначена для распространения информации, то решетка помогает распределить вычислительные мощности и массивы данных между множеством компьютеров, принимающих участие в проекте.

Вычислительные центры грид-системы распределены по уровням, или ярусам. Нулевой уровень — это вычислительный центр CERN, где данные записываются и преобразуются из первоначальной формы в другую, более подходящую для физического анализа. Далее информация расходится по каналам с высокой пропускной способностью в десятки крупных национальных вычислительных

центров, составляющих уровень 1. Аналитические группы при желании могут получить доступ к этим данным. При помощи оптоволоконных кабелей уровень 1 соединяется примерно с пятьюдесятью аналитическими центрами уровня 2. Эти вычислительные центры располагаются в университетах и обладают достаточными вычислительными мощностями, чтобы моделировать физические процессы и проводить специфический анализ.

Наконец, любая университетская группа может участвовать в реализации анализа на уровне 3, где, собственно, и извлекается большая часть реальной физической информации. На этом этапе экспериментаторы в любой точке земного шара могут тщательнейшим образом перерыть все данные и выяснить, не расскажут ли столкновения энергичных протонов что-нибудь новое и интересное. Но, чтобы увидеть, новое это или нет, необходимо выполнить первую задачу эксперимента — понять, что именно произошло. Об этом мы и поговорим в следующей главе.

КАК РАСПОЗНАТЬ ЧАСТИЦЫ

Стандартная модель физики элементарных частиц представляет в компактном виде наш нынешний взгляд на элементарные частицы и их взаимодействия (рис. 40)*. Она включает в себя такие частицы, как верхние и нижние кварки и электроны, составляющие самую основу привычного вещества; помимо этого она содержит также немало других, более тяжелых частиц, которые участвуют в тех же взаимодействиях, но, как правило, не встречаются в природе (эти частицы мы можем тщательно изучить только в высокоэнергетических экспериментах на коллайдере). Большая часть составляющих Стандартной модели, в том числе и частицы, которые в настоящее время изучаются на БАКе, были достаточно надежно укрыты от человеческого взора, пока во второй половине XX в. хитроумные эксперименты и теоретические построения не извлекли их «на свет божий».

Экспериментальные установки ATLAS и CMS в Большом адронном коллайдере предназначены для обнаружения и распознавания частиц Стандартной модели. Настоящая цель, разумеется,

* В этой таблице даны отдельно левые и правые частицы. Они различаются киральностью, которая для безмассовых частиц говорит о вращении (спине) вдоль направления движения. Массивные частицы могут быть обоих типов: например, электрон может быть левым или правым. В данном случае признаки отличия не так важны, как разница во взаимодействиях. Если бы все частицы не имели масс, то слабое взаимодействие, превращающее верхние кварки в нижние, а заряженные лептоны — в нейтральные, действовало бы только на левые частицы. С другой стороны, сильное и электромагнитное взаимодействия влияют на частицы обоих типов, причем только кварки обладают сильным зарядом. — *Прим. авт.*

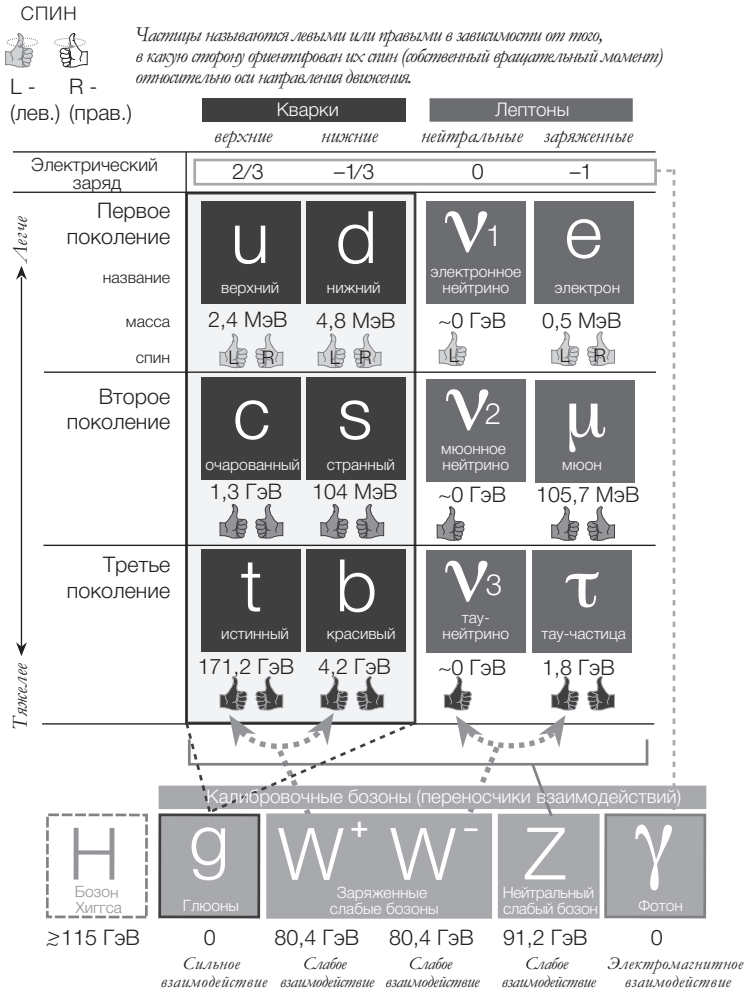


РИС. 40. Элементы Стандартной модели физики элементарных частиц с указанными массами. Показаны также отдельно частицы с правым и левым спином. Слабое взаимодействие, способное изменить тип частицы, действует только на левые частицы

состоит в том, чтобы выйти за пределы уже известного — отыскать новые элементы или взаимодействия, которые помогли бы разобраться в многочисленных загадках. Но для этого физики должны научиться без труда выделять фоновые события Стан-

дартной модели и распознавать обычные, хорошо известные частицы, на которые могут распадаться в тех или иных условиях неведомые экзотические частицы. Экспериментаторы БАКа похожи на детективов, которые анализируют имеющиеся данные, чтобы соединить их в единую картину и понять, что здесь было прежде. Чтобы обнаружить что-то новое, необходимо сначала исключить из картины все известные элементы.

Познакомившись с конструкцией двух основных универсальных детекторов БАКа, мы теперь вновь наведемся на коллайдер и постараемся разобраться в том, как физики распознают отдельные частицы. Некоторое знакомство с современным состоянием физики элементарных частиц и методов обнаружения частиц Стандартной модели будут полезны и при обсуждении научного потенциала БАКа в части IV.

В ПОИСКАХ ЛЕПТОНОВ

Специалисты по физике элементарных частиц делят частицы Стандартной модели на две категории. Частицы первого типа известны как *лептоны*.

В эту категорию попадают частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. В первую очередь это электроны; в Стандартной модели присутствуют также две более тяжелые версии электрона, обладающие таким же зарядом, но гораздо большей массой, — *мюон* и *тау-лептон*. Оказывается, имеется три, обладающих одинаковым зарядом варианта каждой из встречающихся нам в повседневной жизни частиц Стандартной модели; при этом каждое следующее поколение тяжелее предыдущего. Мы не знаем, почему таких вариантов именно три. Говорят, что лауреат Нобелевской премии по физике 1944 г. Исидор Айзек Раби, услышав о существовании мюона, воскликнул в изумлении: «Кто заказывал?»

Самые легкие лептоны обнаружить проще всего. Хотя и электроны, и фотоны отдают энергию в электромагнитном калориметре, различить их легко: электрон имеет электрический заряд, а фотон — нет. Из этих частиц только электрон, прежде чем отдать энергию калориметру ECAL, оставляет трек во внутреннем детекторе.

Распознать мюоны тоже относительно легко. Подобно всем остальным тяжелым частицам Стандартной модели, мюоны распадаются так быстро, что в обычном веществе их обнаружить невозможно, и вне эксперимента мы на Земле их почти не видим. Однако мюоны живут все же достаточно долго, чтобы успеть добраться до внешних слоев детектора. Поэтому они оставляют за собой длинные, ясно различимые треки, и экспериментаторы могут проследить их путь сквозь все слои от внутреннего детектора до внешних мюонных камер. Мюоны — единственные частицы Стандартной модели, способные добраться до внешних детекторов и оставить в них видимый след, поэтому распознать и выделить их несложно.

Тау-частицы, хотя они и заметны, обнаружить уже не так просто. Тау-частица представляет собой заряженный лептон, подобный электрону и мюону, но превосходит то и другое по массе. Как и большинство тяжелых частиц, она нестабильна; это значит, что тау-частица распадается, оставляя после себя группу других частиц. Любая тау-частица стремительно распадается на легкий заряженный лептон и две частицы под названием нейтрино или на одно нейтрино и частицу под названием пион, участвующую в сильном взаимодействии. Экспериментаторы изучают продукты распада — частицы, на которые распалась первоначальная нестабильная частица, — чтобы определить, не было ли на их месте тяжелой нестабильной частицы, и если таковая была, то какими свойствами обладала. Сам тау-лептон не оставляет трека, но по информации о продуктах распада, которые регистрирует экспериментальная установка, можно распознать эту частицу и ее свойства.

Электрон, мюон и еще более тяжелый тау-лептон имеют одинаковые заряды, равные -1 и противоположные заряду положительно заряженного протона. Кроме того, в коллайдерах рождаются античастицы, соответствующие этим заряженным лептонам, — позитрон, антимюон и анти-тау-лептон. Эти античастицы имеют заряд $+1$ и оставляют в детекторах треки, похожие на треки соответствующих частиц, но из-за противоположного заряда в магнитном поле они отклоняются в противоположную сторону.

Кроме только что описанных трех типов заряженных лептонов Стандартная модель содержит нейтрино — очень легкие лептоны, не несущие никакого электрического заряда. Если три заряженных лептона участвуют как в электромагнитном, так и в слабом взаимодействии, то нейтрино заряда не имеют и потому нечувствительны к электрическим силам. До 1990-х гг. экспериментальные результаты указывали, что нейтрино имеют нулевую массу. Одним из интереснейших открытий того десятилетия стало обнаружение у нейтрино чрезвычайно малой, но не исчезающей массы покоя; это показало, что Стандартная модель физики частиц неполна.

Хотя нейтрино — очень легкие частицы и, соответственно, попадают в энергетический диапазон любого коллайдера, их невозможно непосредственно обнаружить на БАКе. Не имея электрического заряда, они очень неохотно вступают во взаимодействие с веществом — настолько неохотно, что человек, тело которого каждую секунду пронизывает более 50 трлн солнечных нейтрино, может узнать об этом, только если ему кто-нибудь расскажет.

Несмотря на невидимость нейтрино, физик Вольфганг Паули предсказал их существование в качестве «отчаянной меры», пытаясь объяснить, куда девается энергия при распаде нейтронов. Долгое время казалось, что в этом процессе нарушается закон сохранения энергии, потому что протон и электрон, которые удавалось обнаружить на месте распада нейтрона, вместе не давали полной энергии, которой прежде обладал нейтрон. Даже известные физики, такие как Нильс Бор, в то время готовы были поступиться принципами и признать, что энергия может теряться безвозвратно. Паули оказался верен известным физическим принципам и предположил, что энергия все же сохраняется, просто экспериментаторы не могут увидеть ту электрически нейтральную частицу, которая уносит с собой недостающую ее часть. Он оказался прав.

Паули назвал свою гипотетическую на тот момент частицу нейтроном, но позже это название оказалось занято — его использовали для обозначения составной части атомного ядра, нейтраль-

ного партнера протона. Так что Энрико Ферми — итальянскому физику, разработавшему теорию слабых взаимодействий (хотя публика лучше знает его как одного из создателей первого ядерного реактора) — пришлось дать этой частице забавное имя нейтрино, что по-итальянски означает «нейтрончик». Конечно, нейтрино — никакой не нейтрон, но, подобно нейтрону, эта частица не несет на себе электрического заряда. С другой стороны, нейтрино действительно много легче нейтрона.

Нейтрино, как и всех других частиц Стандартной модели, существует три типа. Каждому заряженному лептону — электрону, мюону и тау-частице — соответствует свое нейтрино, с которым названная частица взаимодействует посредством слабого взаимодействия*.

Мы уже говорили о том, как можно обнаружить электроны, мюоны и тау-частицы, так что остается только разобраться, как экспериментаторы обнаруживают нейтрино. Поскольку нейтрино не имеют электрического заряда и неохотно вступают во взаимодействие, они вылетают из детектора прочь, не оставляя никакого следа. Как же ученым БАКа определить, что нейтрино там вообще были?

Импульс (при медленном движении он равен произведению массы на скорость, но при скоростях частиц, близких к скорости света, его удобнее описать как сгусток энергии, движущийся в определенном направлении) сохраняется в проекции на любое направление. Как и в случае с энергией, до сих пор ученым не удалось обнаружить никаких свидетельств того, что импульс может безвозвратно теряться. Так что если суммарный импульс частиц, зарегистрированных детектором, меньше, чем вошедший туда импульс, это означает, что какая-то другая частица (или частицы) сумела улизнуть, унося с собой недостающую часть. Именно такая логика позволила Паули сделать вывод о существовании нейтрино (в его случае — при ядерном бета-распаде); именно таким обра-

* Три типа нейтрино через слабое взаимодействие «спарены» с тремя разновидностями заряженных лептонов. Однако, раз возникнув, нейтрино могут осциллировать, переходя из одного типа в другой, и связь их с конкретными лептонами теряется. Нейтрино иногда просто нумеруют согласно их относительной массе, а иногда помещают знаком соответствующего лептона в зависимости от контекста. — *Прим. авт.*

зом мы и по сей день узнаем о присутствии этих слабо взаимодействующих и почти невидимых частиц*.

В адронных коллайдерах экспериментаторы измеряют все импульсы в поперечных к пучку направлениях, суммируют и смотрят, весь ли импульс на месте. Они рассматривают только поперечные направления, потому что в продольных направлениях полный импульс зарегистрировать намного труднее — ведь немалая его часть уносится частицами, продолжающими движение по трубке пучка. Импульс, перпендикулярный направлению движения первоначального протонного пучка, измерить и учесть проще.

Суммарный поперечный импульс сталкивающихся в коллайдере частиц практически равен нулю; нулю, соответственно, должен равняться и суммарный поперечный импульс возникших в результате столкновения частиц. Поэтому, если измерения идут вразрез с ожиданиями, экспериментаторы могут смело заключить, что чего-то не хватает. Остается только разобраться, какая это была из множества потенциально возможных не взаимодействующих частиц. Для обычных процессов Стандартной модели ответ известен заранее: незарегистрированными останутся нейтрино. Исходя из известных характеристик слабого взаимодействия (мы поговорим о нем чуть позже), в котором участвуют нейтрино, физики проводят расчет и прогнозируют частоту их появления. Кроме того, физики уже знают, как должен выглядеть распад W -бозона, — к примеру, одиночный электрон или мюон с поперечным импульсом, соответствующим по энергии примерно половине массы W -бозона, представляет собой чрезвычайно редкое явление и свидетельствует именно об этом. Поэтому, исходя из закона сохранения импульса и теоретически рассчитанной входной величины, нейтрино можно «вычислить». Естественно, у этих частиц меньше идентифицирующих «ярлычков», чем у тех, что мы наблюдаем непосредственно. Об их присутствии можно судить лишь по комбинации теоретических соображений и измеренной величине недостающей энергии.

* В специальных экспериментах по исследованию свойств нейтрино они регистрируются через рождение заряженных лептонов того же поколения при рассеянии на ядрах. — *Прим. науч. консульт.*

Очень важно помнить об этом, рассматривая новые открытия. Примерно такие же рассуждения позволяют судить о присутствии и других новых частиц, не несущих заряда или несущих заряд настолько слабый, что их невозможно обнаружить непосредственно. Только недостаток суммарной энергии вкупе с теоретическим расчетом входных параметров позволяет судить, что происходило на самом деле и какие «действующие лица» сумели ускользнуть незамеченными. Вот почему так важна герметичность детектора для регистрации как можно большей доли поперечного импульса.

В ПОИСКАХ АДРОНОВ

Мы рассмотрели лептоны (электроны, мюоны, тау-частицы и ассоциированные с ними нейтрино). Оставшаяся категория частиц Стандартной модели носит название *адроны* — это частицы, участвующие в сильном взаимодействии. В эту категорию входят все частицы, состоящие из кварков и глюонов, такие как протоны, нейтроны и частицы под названием *пионы*. Адроны имеют внутреннюю структуру — это связанные состояния кварков и глюонов, удерживаемых вместе посредством сильного взаимодействия.

Однако в Стандартной модели вы не найдете всех возможных связанных состояний. В нее вошли наиболее фундаментальные частицы, которые, объединяясь, собственно и образуют адронные состояния: а именно кварки и глюоны. Помимо *верхних* и *нижних* кварков, обитающих внутри протонов и нейтронов, существуют более тяжелые кварки под названиями *очарованный* и *странный*, *истинный* и *красивый*. Как и у лептонов, более тяжелые кварки соответствуют по заряду своим легким партнерам — верхнему и нижнему кварку. Тяжелые кварки, как и тяжелые лептоны, непросто обнаружить в природе. Для их изучения тоже нужны коллайдеры.

Адроны (участвующие в сильном взаимодействии) при столкновениях частиц ведут себя совсем не так, как лептоны (которые в нем не участвуют). Дело в первую очередь в том, что кварки и глюоны взаимодействуют настолько сильно, что никогда не появляются в одиночестве. Они всегда в струе, которая, может, и содержит нужную частицу, но в которой обязательно присутствует

и куча других частиц, тоже участвующих в сильном взаимодействии. Струи, вообще говоря, содержат не отдельные частицы, а россыпь частиц, связанных сильным взаимодействием и как бы «защищающих» исходную частицу (рис. 41). Даже если при первоначальном событии ничего подобного не было, сильное взаимодействие породит из одного-единственного исходного кварка или глюона струю из множества новых кварков и глюонов.

Протонные коллайдеры порождают множество струй, поскольку сами протоны состоят из частиц, связанных сильным взаимодействием. Такие частицы порождают россыпь из множества дополнительных частиц, связанных сильным взаимодействием и путешествующих рядом с ними. Иногда они также создают кварки и глюоны, которые разлетаются в разных направлениях и порождают собственные независимые струи.

В книге «Закрученные пассажи» я привела цитату из «Песни ракет»* из мюзикла «Вестсайдская история». Мне кажется, она хорошо описывает и адронные струи:

*Ты никогда не бываешь один,
Ты никогда не теряешь связи,
Ты дома везде, где рядом друзья:
Ты защищен надежно,
Когда ожидается встреча.*

Кварки, как и большинство членов уличных банд, по одному не ходят, они всегда находятся в дружественной, прочно связанной среде — среди своих.

Струи, как правило, оставляют видимые следы, поскольку некоторые частицы в них заряжены. Достигнув калориметра, струя отдает свою энергию. При помощи тщательных экспериментальных исследований, а также аналитических и компьютерных расчетов экспериментаторы выясняют свойства адронов, положивших начало каждой конкретной струе. И все же из-за сильного взаимодействия и струй кварки и глюоны исследовать намного сложнее. В конце концов, вы не можете измерить кварк или глюон непо-

* По-английски слово jet означает и реактивный двигатель (ракету), и струю. — Прим. пер.

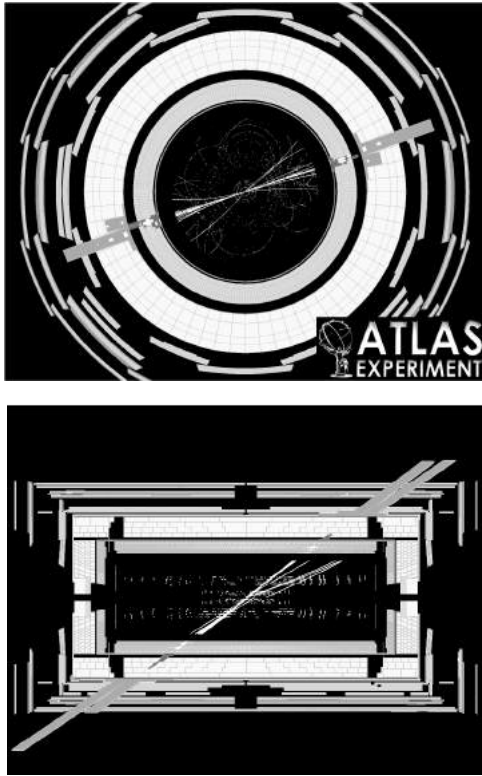


РИС. 41. Струи представляют собой летящие группы частиц, связанных сильным взаимодействием, возникающим вокруг кварков и глюонов. На рисунках показана их регистрация в треках и адронном калориметре. (Печатается с разрешения CERN'a.)

средственно, вы меряете лишь струю, частью которой он является. Именно поэтому большинство кварковых и глюонных струй не различимы между собой. Все они выделяют много энергии и оставляют множество треков (на рис. 42 можно увидеть схематическое изображение того, как детекторы распознают ключевые частицы Стандартной модели).

Даже после измерения свойств адронной струи очень трудно, если не невозможно, сказать, который из различных кварков или глюонов ее инициировал. *Красивый* кварк (b-кварк) — самый тяжелый кварк с тем же зарядом, что у *нижнего* кварка (и тем же,

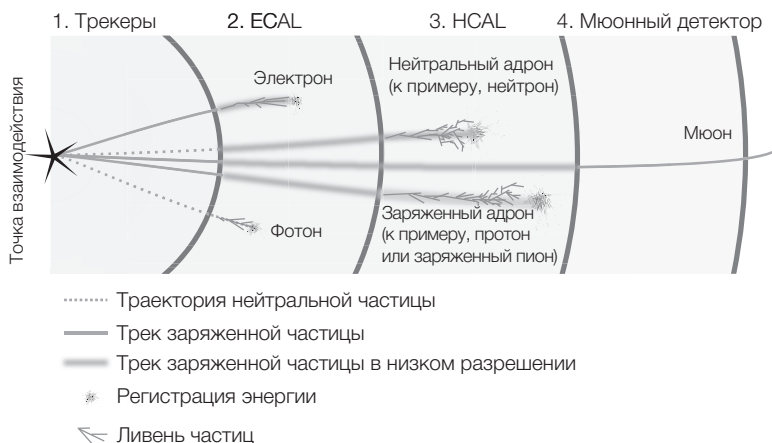


РИС. 42. Обобщенная картина того, как частицы Стандартной модели распознаются в детекторах. Нейтральные частицы не оставляют следа в трекерах. Как заряженные, так и нейтральные адроны могут оставлять некоторое количество энергии в ECAL, но большую часть энергии выделяют в HCAL. Мюоны пролетают насквозь до внешнего детектора

что у среднего по массе *странного*) — исключение из правила. Причина в том, что красивый кварк живет достаточно долго и успевает пролететь некоторое расстояние до распада. При этом расстояние невелико: распад происходит внутри трекера. Действительно: если частицы распадаются практически мгновенно после рождения, поэтому создается впечатление, что продукты их распада начинают свои треки непосредственно в точке взаимодействия, где столкнулись протоны. Красивые кварки, в отличие от других, живут достаточно долго (примерно полторы пикосекунды; этого хватает, чтобы пройти со скоростью света, с которой они летают, примерно полмиллиметра), чтобы начать трек на вполне различимом расстоянии от точки взаимодействия. Внутренние кремниевые детекторы регистрируют этот *смещенный узел* траектории, как показано на рис. 43.

Когда экспериментаторы восстанавливают трек от распада красивого кварка, то в обратном направлении он не приходит в точку взаимодействия — центр события. Вместо этого создается впечатление, что трек начинается в той точке внутреннего трекера, где рас-

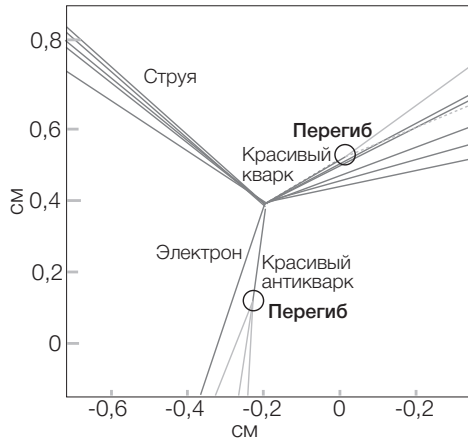


РИС. 43. Адроны, «сделанные» из красивых кварков, живут достаточно долго, чтобы оставить видимый трек в детекторе, прежде чем рассыпаться на другие заряженные частицы. При этом в кремниевом детекторе может образоваться перегиб трека, по которому, собственно, и распознают красивые кварки. На рисунке показан распад истинных кварков

пался красивый кварк; в этой точке наблюдается перегиб — переход от траектории прилетевшего туда красивого кварка и улетевших дальше продуктов распада*. Благодаря тончайшей сегментации кремниевых детекторов экспериментаторы имеют возможность рассматривать область, прилегающую к пучку, очень подробно и в значительном числе случаев успешно распознавать красивые кварки.

Еще один тип кварка, выделяющийся среди прочих в экспериментальном плане, — *истинный* кварк (t-кварк); своей особенностью он обязан большой массе. Истинный кварк — самый тяжелый из тех трех кварков, заряд которых равен заряду *верхнего* кварка (третий кварк этой группы называется *очарованным*). Истинный кварк примерно в 40 раз тяжелее красивого — самого тяжелого кварка с зарядом другого знака — и более чем в 30 000 раз тяжелее верхнего кварка, обладающего таким же зарядом.

* Если исходный b-мезон нейтрален, вместо этого будет виден трек, исходящий из точки распада, но не будет предыдущего трека от места его образования. — Прим. авт.

Истинные кварки достаточно тяжелы, чтобы продукты их распада оставляли различимые треки. При распаде более легких кварков продукты распада, как и первоначальная частица, движутся со скоростями, очень близкими к скорости света, и потому сливаются как будто в единую струю, даже если начало ей положили две или более отдельные частицы. С другой стороны, истинные кварки, если только они не чрезмерно энергичны, наблюдаемо распадаются на красивые кварки и W -бозоны (заряженные слабые калибровочные бозоны); наличие того и другого наглядно свидетельствует о присутствии истинного кварка. Считается, что благодаря своей массе истинный кварк наиболее тесно взаимодействует с частицей Хиггса и другими частицами, вовлеченными в физику слабых взаимодействий, в которой мы надеемся в скором времени разобраться. Свойства истинных кварков и их взаимодействий могут оказаться полезны для понимания фундаментальных физических теорий, на которых основана Стандартная модель.

В ПОИСКАХ ПЕРЕНОСЧИКОВ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Прежде чем закончить разговор о том, как распознаются частицы Стандартной модели, рассмотрим последнюю их группу — слабые калибровочные бозоны: два W и один Z , переносящие слабое ядерное взаимодействие. Слабые калибровочные бозоны отличаются той особенностью, что, в отличие от фотонов и глюонов, имеют ненулевую массу покоя. Надо сказать, что наличие массы у слабых калибровочных бозонов — частиц, передающих слабое взаимодействие — представляет собой достаточно серьезную фундаментальную загадку. Происхождением своим эти массы — как и массы других элементарных частиц, о которых говорилось в этой главе — обязаны механизму Хиггса, к которому мы перейдем в самом ближайшем будущем.

Из-за своей тяжести W - и Z -бозоны долго не живут; они распадаются. Это значит, что слабые калибровочные бозоны, подобно истинным кваркам и другим тяжелым нестабильным частицам, можно распознать только через наблюдение за частицами, рожда-

ющимися в процессе распада. А поскольку любые новые тяжелые частицы тоже, вероятно, окажутся нестабильными, мы попробуем на примере распада слабых калибровочных бозонов показать еще одно интересное свойство распадающихся частиц.

W-бозон взаимодействует с любыми частицами, чувствительными к слабому взаимодействию (то есть со всеми частицами, о которых до сих пор шла речь). Это дает W-бозону множество вариантов распада. Он может распасться на любой заряженный лептон (электрон, мюон или тау-частицу) и соответствующее ему нейтрино. Его распад может также породить пару кварков — верхний и нижний или очарованный и странный, как показано на рис. 44.

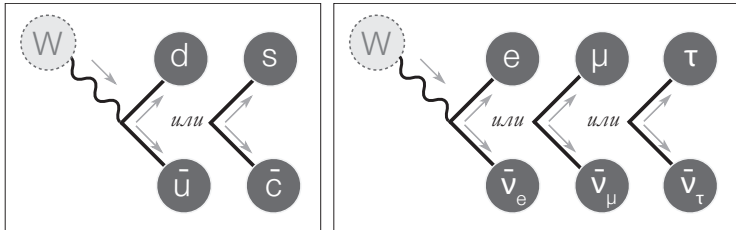


РИС. 44. W-бозон может распасться на любой заряженный лептон и соответствующее ему нейтрино, или на верхний и нижний кварки, или на очарованный и странный кварки. На самом деле в кварковом секторе имеется смешивание, так что W-бозон может иногда распадаться в кварки разных поколений

Возможные варианты распада, помимо всего прочего, зависят от массы исходной частицы. Дело в том, что продукты распада частицы в сумме должны давать массу, меньшую, чем масса исходной частицы. Так, хотя W-бозон вполне способен взаимодействовать с истинным и красивым кварками, распасться на них он не может, так как масса истинного кварка больше массы W-бозона*.

Рассмотрим распад W-бозона на два кварка, поскольку в этом случае экспериментаторы могут измерить оба продукта распада (в случае лептона и нейтрино это не так, потому что нейтрино не-

* Тем не менее взаимодействие между W-бозоном, t-кварком и b-кварком является причиной того, что t-кварк может распасться на b-кварк и W-бозон. — Прим. авт.

посредственно не обнаруживается). По закону сохранения энергии и импульса суммарная энергия и импульс конечных кварков равны энергии и импульсу распавшейся частицы, то есть W -бозона.

В этот момент, однако, вмешиваются специальная теория относительности Эйнштейна и квантовая механика, и ситуация становится более интересной. Специальная теория относительности говорит нам о том, как соотносятся масса, энергия и импульс. Большинству людей знаком сокращенный вариант формулы $E = mc^2$. Эта формула верна для частиц в состоянии покоя; здесь m интерпретируется как m_0 — не исчезающая масса покоя частицы, изначально ей присущая. Если частица движется, у нее имеется импульс, и на сцене появляется более полная формула: $E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4$. По этой формуле* экспериментаторы могут вычислить массу частицы даже в том случае, если сама она давно распалась. Для этого достаточно измерить суммарный импульс и энергию продуктов распада и, применив это уравнение, вычислить массу первоначальной частицы.

Причина, по которой в этой истории фигурирует квантовая механика, несколько тоньше. Если наблюдать со стороны, то масса частицы не всегда равняется в точности ее реальной и истинной массе. Частицы способны распадаться, а квантово-механическое уравнение неопределенности говорит нам, что для точного измерения энергии необходимо бесконечное время; это значит, что энергию частицы, имеющей ограниченный срок жизни, вообще невозможно знать точно. Величина возможной ошибки тем больше, чем быстрее распадается частица и чем меньше время ее жизни. Следовательно, в любом конкретном измерении можно получить значение массы, близкое, но не равное ее истинному среднему значению. Только проведя множество измерений, экспериментаторы могут выяснить одновременно массу — наиболее вероятную ее величину, к которой сходится среднее значение — и время жизни, поскольку именно продолжительность существования частицы до распада определяет разброс измеренных масс (рис. 45). Это верно не только для W -бозона, но и для любой другой распадающейся частицы.

* Через нее можно также определить релятивистскую массу, которая зависит от импульса и энергии, но следствия будут теми же. — *Прим. авт.*

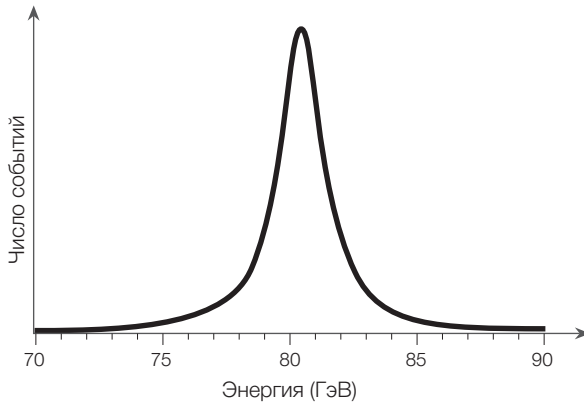


РИС. 45. Измерения массы нестабильной частицы концентрируются вокруг ее истинной массы, но допускают некоторый разброс в зависимости от времени жизни. На рисунке показана соответствующая зависимость для калибровочного W-бозона

Разобравшись в полученных измерительных данных при помощи описанных в этой главе методов, экспериментаторы могут обнаружить какую-нибудь частицу Стандартной модели (см. на рис. 46 сводку частиц Стандартной модели и их свойств)*, а может, и что-нибудь совершенно новое. Ученые надеются получить на БАКе новые экзотические частицы, которые помогут глубже проникнуть в фундаментальную природу вещества или даже Вселенной в целом. В следующей части книги мы рассмотрим некоторые интересные возможности.

* Обратите внимание, что на этой схеме разграничены бозоны и фермионы — два класса частиц, различаемые квантовой механикой. Переносчики взаимодействий и гипотетические частицы Хиггса — бозоны, а все остальные частицы Стандартной модели — фермионы. — *Прим. авт.*

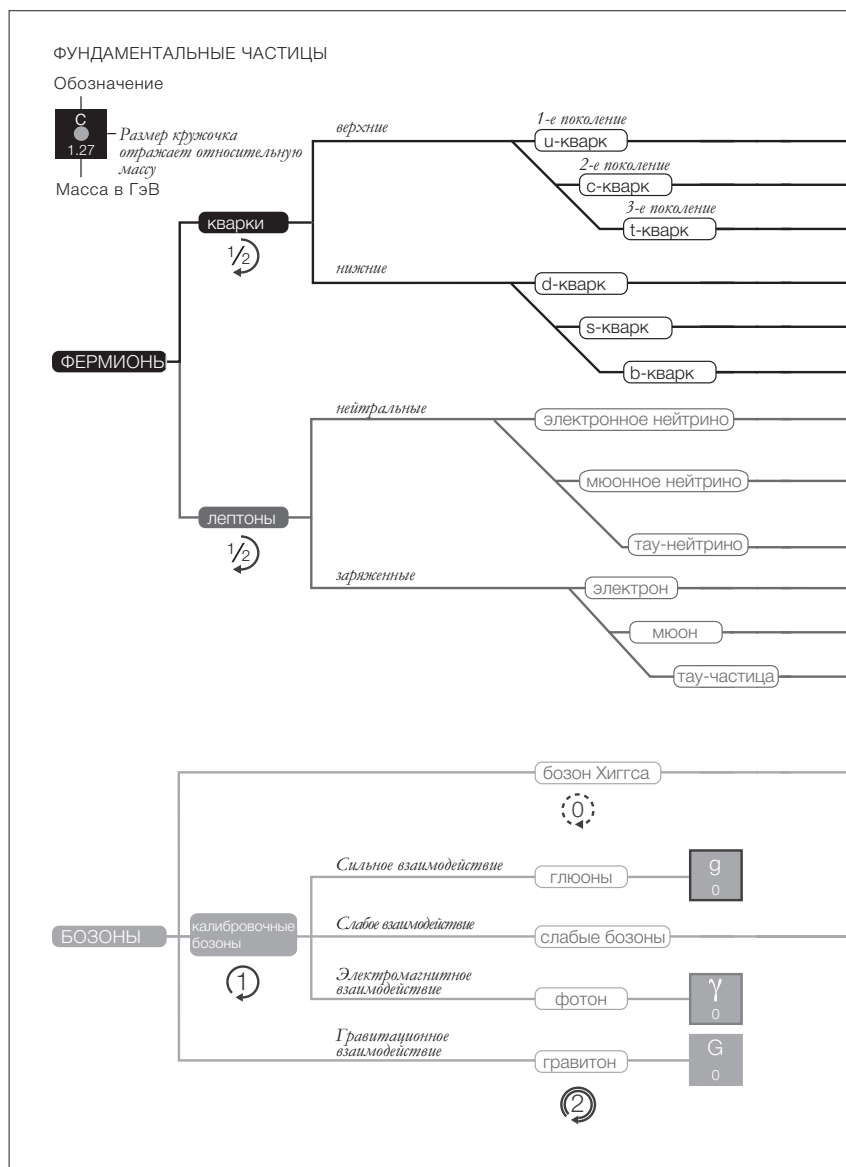
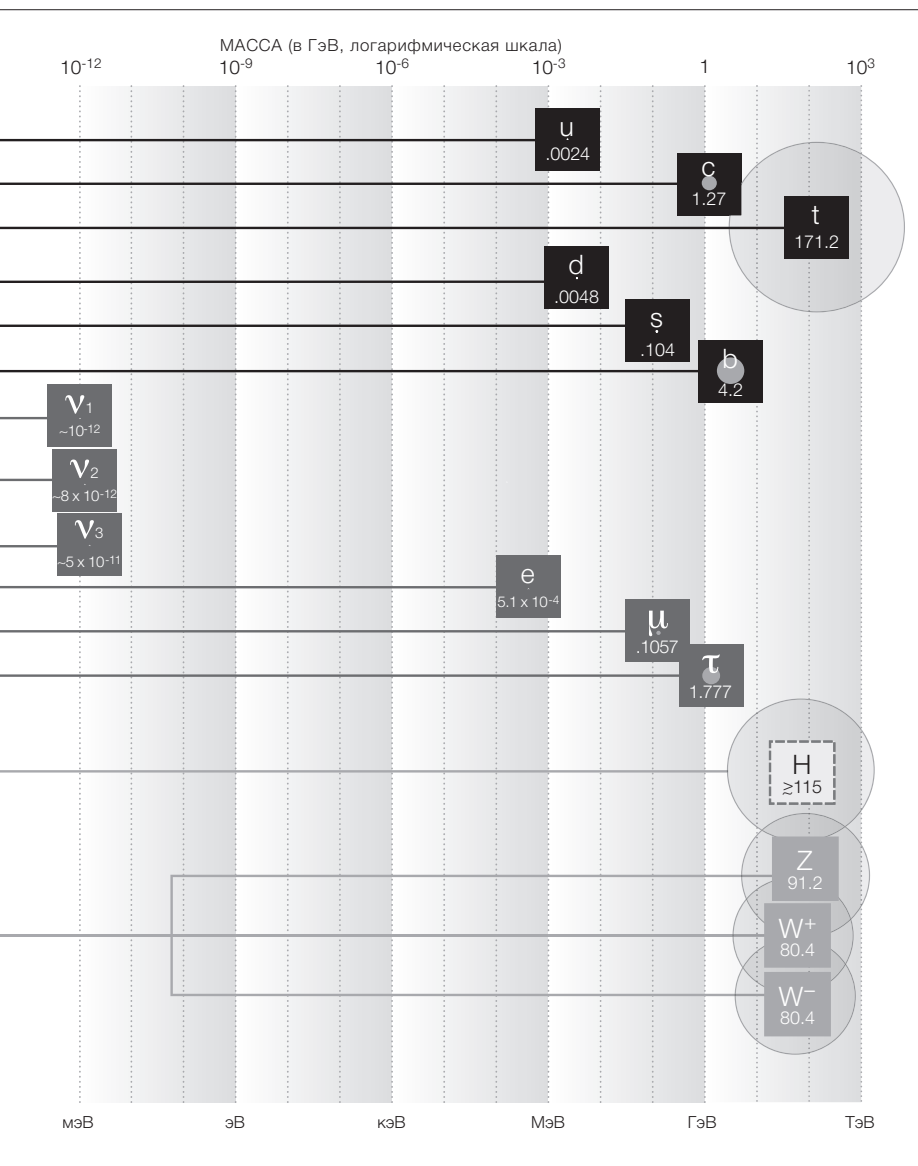


РИС. 46. Частицы Стандартной модели, организованные по типу и массе. В серых кружочках (иногда внутри квадратиков) приведены массы частиц. Число внутри стрелочек, образующих дуги, обозначает величину спина данной частицы. Мы видим здесь загадочное разнообразие элементов Стандартной модели



Часть IV

МОДЕЛИ, ПРЕДСКАЗАНИЯ И ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

ИСТИНА, КРАСОТА И ДРУГИЕ НАУЧНЫЕ ЗАБЛУЖДЕНИЯ

В феврале 2007 г. физик-теоретик и нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн выступил на конференции TED («Технологии, развлечения, дизайн») в Калифорнии, где раз в год собираются лидеры науки, техники, литературы, индустрии развлечений и других инновационных сфер, чтобы поделиться новыми достижениями и взглядами по самым разным вопросам. Выступление Мюррея было встречено продолжительной овацией; посвящено оно было истине и красоте в науке. Основную мысль выступления лучше всего можно передать его собственными словами, повторившими мысль Джона Китса: «Истина — это красота, а красота — это истина».

У Гелл-Манна были серьезные причины верить в это заявление. Сам он совершил наиболее значительные из своих открытий, принесшие ему в конце концов Нобелевскую премию, в процессе поиска фундаментального принципа, позволяющего элегантно «обуздать» хаос данных, накопленных учеными в 1960-е гг. Опыт Мюррея говорил о том, что поиск красоты привел его к истине.

Никто в аудитории не оспорил это громкое заявление. В конце концов, большинству людей нравится думать, что красота и истина неразделимы и что поиск одного чаще всего приводит к другому. Но мне, признаюсь, это утверждение всегда представлялось несколько неоднозначным. Конечно, всем хотелось бы верить, что в основе великих научных теорий лежит красота и что истина

всегда эстетически прекрасна. Но ведь красота, по крайней мере отчасти, — понятие субъективное и не может быть надежным арбитром истины.

Если бы истина и красота были эквивалентны, выражение «неприглядная истина» в языке никогда бы не возникло. Пусть эти слова не связаны напрямую с наукой; очевидно тем не менее, что то, что мы наблюдаем вокруг себя, не всегда красиво. Коллега Дарвина Томас Гексли прекрасно сформулировал это ощущение: «Наука — это исключительно здравый смысл, где множество красивых теорий пало под напором безобразных фактов».

Дополнительно осложняет ситуацию то, что физикам приходится признать: далеко не все наблюдаемые элементы Вселенной красивы. Мы видим вокруг путаницу явлений и целый зоопарк частиц, в которых хотелось бы разобраться. В идеале физики с огромным удовольствием нашли бы какую-нибудь простую теорию, которая объяснила бы все наблюдения при помощи небольшого числа правил и еще меньшего — фундаментальных ингредиентов. Но, даже посвятив себя поискам простой и элегантной объединяющей теории, при помощи которой можно было бы прогнозировать результат любого эксперимента в физике элементарных частиц, ученый понимает: если ему и удастся найти такую теорию, потребуется еще многое сделать, чтобы согласовать ее с окружающим миром.

Вселенная сложна. Как правило, непросто подогнать простую лаконичную формулировку под далеко не простой окружающий мир. Случается, что дополнительные элементы разрушают всю красоту первоначально предложенной формулы, — точно так же, как поправки к законам часто ставят с ног на голову прекрасные намерения авторов законопроектов.

Но как же, зная об ожидающих всюду потенциальных ловушках, ученые все же умудряются расширять пределы человеческих знаний? Как нам удастся интерпретировать неизвестные до сего момента явления? Эта глава посвящена идее красоты и роли эстетических критериев в науке, а также преимуществ и недостаткам красоты как критерия истины. Кроме того, в ней говорится о *модели* познания мира и уделяется внимание эстети-

ческим критериям при попытках предсказать наше дальнейшее развитие.

КРАСОТА

Недавно один художник в разговоре со мной с юмором заметил, что современные ученые едва ли не чаще, чем современные художники, объявляют своей целью красоту. Конечно, художники не отказались от эстетических критериев, но тем не менее часто говорят об открытиях и изобретениях при обсуждении своих работ.

Но, несмотря на значение, которое многие ученые придают элгантности, они нередко по-разному оценивают ее. Точно так же, как вы с соседом можете не сойтись во мнениях относительно какого-нибудь современного художника, такого как Дэмьен Херст, разные ученые по-разному воспринимают одни и те же аспекты своей науки.

Я, как и мои единомышленники, предпочитаю искать фундаментальные принципы, которые раскрывали бы связи между совершенно независимыми на первый взгляд наблюдаемыми явлениями. Большинство моих коллег занимается тем, что разбирает при помощи конкретных разрешимых теорий и связанного с ними сложного математического аппарата так называемые модельные задачи (то есть задачи, не связанные с реальными физическими условиями). Возможно, позже эти задачи (и решения) найдут себе применение в связи с какими-то наблюдаемыми физическими событиями, а может быть, и нет. Другие физики предпочитают сосредоточиться на одних только теориях с четким и элегантным аппаратом; такие теории дают множество экспериментальных прогнозов, которые можно систематизировать и просчитывать.

Интересные принципы, высшая математика и сложные численные модели — все это составные части физической науки. Большинство ученых ценит их все, но каждый из нас выбирает собственные приоритеты исходя из того, что ему больше всего нравится делать — или какой путь с наибольшей вероятностью

приведет к научным результатам. В самом деле, часто мы выбираем свой подход в соответствии с тем, какой метод лучше всего соответствует нашим уникальным склонностям и талантам.

Представления о красоте меняются со временем, и не только в искусстве. Собственная специализация Мюррея Гелл-Манна — квантовая хромодинамика — хороший тому пример.

Выводы Гелл-Манна о законах сильного взаимодействия были сделаны на основании блестящей догадки о том, как организовать множество частиц, которые в 1960-е гг. открывали одну за другой, в разумную структуру, которая объяснила бы их многочисленность и разнообразие. Он предположил существование еще более фундаментальных элементарных частиц, известных сегодня как кварки, обладающих новым видом заряда — цветовым. В этом случае ядерному взаимодействию должны быть подвержены все объекты, обладающие этим зарядом; оно же должно удерживать кварки с образованием нейтральных объектов — точно так же, как электрическая сила связывает электроны с заряженными ядрами в нейтральные атомы. Если это так, то все открываемые частицы можно рассматривать как связанные состояния этих кварков — как составные объекты с нулевым суммарным цветовым зарядом.

Гелл-Манн понял, что если существует три типа кварков, каждый со своим цветовым зарядом, то из них сможет образоваться множество нейтральных («белых») связанных состояний. И это множество состояний должно соответствовать (и действительно соответствует) массе частиц, которые ученые находили тогда едва ли не каждую неделю. Таким образом, Гелл-Манн нашел красивое объяснение тому, что прежде казалось необъяснимым хаосом всевозможных частиц.

Однако, когда Мюррей и независимо от него физик (а позже нейробиолог) Джордж Цвейг опубликовали свою идею, многие даже не восприняли ее как настоящую научную теорию. Физика элементарных частиц исходит из того, что частицы на большом расстоянии не взаимодействуют — как следствие, мы можем расчитать конечные эффекты взаимодействий, которые возникают при сближении. В таком контексте любое взаимодействие можно

полностью представить как влияние локальных сил, которые проявляются лишь тогда, когда взаимодействующие частицы сближаются.

В то же время сила, о которой писал Гелл-Манн, становилась тем *сильнее*, чем дальше частицы находились друг от друга. Это означало, что кварки взаимодействуют всегда, даже если расстояние между ними очень велико. По общепринятым тогда критериям догадка Гелл-Манна не подходила даже на роль теории, которую можно использовать для достоверных вычислений. Поскольку кварки взаимодействуют всегда, любое их состояние — даже так называемое *асимптотическое*, когда кварк находится на значительном удалении от любого объекта — описывается очень сложно. И асимптотические состояния, постулированные в новой теории, были вовсе не тем же самым, что простые частицы, которые хотелось бы видеть в результате теоретического расчета. Разве это не отказ от красоты в пользу уродства?

Первоначально никто не знал, как организовать вычисления всех этих сложных состояний, связанных сильным взаимодействием. Однако современные физики относятся к сильному взаимодействию совершенно иначе. Мы теперь понимаем его намного лучше, чем в те времена, когда была впервые высказана эта идея. За разработку концепции «асимптотической свободы в теории сильных взаимодействий» Дэвид Гросс, Дэвид Политцер и Фрэнк Вильчек были удостоены Нобелевской премии. Согласно их расчетам, сила взаимодействия велика лишь при низких энергиях. При высоких энергиях ядерное взаимодействие лишь ненамного сильнее других типов взаимодействия, и расчеты дают ровно то, что ожидалось. Более того, некоторые физики сегодня считают теории, подобные теории сильного взаимодействия, *единственными* по-настоящему проработанными, — ведь сильное взаимодействие с ростом энергии быстро ослабевает, а не возрастает до бесконечности, как могло бы в противном случае.

Теория ядерного взаимодействия Гелл-Манна — интересный пример взаимосвязанности эстетических и научных критериев. Первоначально он стремился в основном к простоте. Но потребовалось немало научных расчетов и теоретических выкладок,

прежде чем остальные ученые согласились с тем, что предложенная им теория красива.

Разумеется, этот пример не единственный. Во многих наших самых надежных теориях есть аспекты настолько на первый взгляд безобразные и неубедительные, что даже уважаемые и признанные ученые поначалу отвергали их. На квантовой теории поля, сочетающей в себе квантовую механику и специальную теорию относительности, основана вся физика элементарных частиц. Тем не менее итальянский физик и нобелевский лауреат Энрико Ферми (и не он один) поначалу отверг ее. Для Ферми проблема заключалась в том, что, хотя квантовая теория поля формализует и систематизирует все вычисления и позволяет делать верные прогнозы, при этом она пользуется такими вычислительными методами, которые даже многие сегодняшние физики считают слишком сложными. Некоторые аспекты этой теории действительно красивы. С другими ученым просто приходится мириться.

Эта история повторялась в науке не один и не два раза. Красивой теорию часто объявляют задним числом. Так, ядерное взаимодействие нарушает так называемую четность, то есть пространственную симметрию. Это означает, что частицы с левой киральностью взаимодействуют не так, как те, у которых киральность правая. Нарушение такой фундаментальной симметрии, как пространственная, представляется изначально тревожным. Тем не менее именно этой асимметрии мы обязаны существованием той линейки масс, которую видим вокруг себя, — а массы, в свою очередь, необходимы для жизни. Сначала асимметрия казалась отвратительной, но сегодня мы знаем, что она необходима. «Безобразное» само по себе нарушение пространственной симметрии ведет к «красивым» объяснениям более сложных явлений, без которых вещество в окружающем нас мире было бы невозможно.

Красота не абсолютна. Теория, симпатичная ее создателю, кому-то другому может показаться громоздкой или путаной. Иногда я остро ощущаю красоту только что придуманной гипотезы — в основном потому, что знаю все прочие идеи, которые выдвигали другие ученые до меня и которые не оправдали надежд. Но даже

то, что лучше предыдущих попыток, не обязательно красиво. Мне не раз случалось создавать модели, которые соответствовали этому критерию, но встречали скептицизм и непонимание со стороны коллег, менее знакомых с темой. Теперь мне кажется, что, возможно, лучший критерий хорошей идеи — то, что она способна понравиться даже человеку, который никогда специально не занимался этой проблемой.

Иногда, правда, верно и обратное: хорошие идеи отвергаются только потому, что кажутся авторам некрасивыми. Макс Планк не поверил в фотоны, хотя именно он начал логическую цепочку, которая завершилась в конце концов их изобретением. Эйнштейн считал, что расширяющаяся Вселенная, непосредственно вытекавшая из уравнений общей теории относительности, невозможна, отчасти потому, что она противоречила его эстетическим и философским представлениям. Ни одна из этих концепций, вероятно, в свое время не казалась особенно красивой. Но законам физики и Вселенной, в которой они действуют, нет до этого дела.

КАК ПОНРАВИТЬСЯ ВСЕМ

Учитывая непостоянную природу красоты, имеет смысл подумать о том, могут ли существовать в природе черты, способные сделать идею или образ объективно красивыми и привлекательными для всех без исключения. Возможно, основной вопрос здесь заключается в том, существуют ли вообще у человечества единые универсальные критерии красоты в любом контексте, будь то искусство или наука.

Никто пока не знает ответа на этот вопрос. В конце концов, красота неразрывно связана с художественным вкусом, а вкус — понятие субъективное. Тем не менее трудно поверить, что люди не имеют хоть каких-то общих эстетических критериев. Я часто замечала поразительное единодушие людей в оценке произведений искусства на выставке — или даже в том, на какие выставки люди стремятся попасть. Разумеется, это ничего не доказывает, поскольку все они живут в одно время. Вообще, представления о красоте трудно выделить из конкретного культурного контекста

или временного периода, в котором они сформировались; трудно отделить личную точку зрения от усвоенных представлений или суждений. В редких случаях люди могут сойтись в едином мнении о том, что что-то выглядит красиво или, напротив, безобразно. Но даже в этих немногочисленных случаях мнения не всегда сходятся относительно деталей.

Но, несмотря ни на что, некоторые эстетические критерии все же представляются универсальными. В любой школе по искусству обучение начинают с представлений о золотом сечении. Пример практического воплощения этого принципа — «Давид» Микеланджело в Академической галерее Флоренции. «Давид» очень грациозен и устойчив. Он никогда не упадет и не развалится на куски. Люди ищут равновесие и гармонию везде. Искусство, религия и наука — не исключение, они обещают человеку достижение всех этих качеств. Однако искусство производит сильное впечатление даже тогда, когда отвергает привычные представления о гармонии; пример тому — ранние скульптуры Ричарда Серра (рис. 47).



РИС. 47. Ранние скульптуры Ричарда Серра наглядно демонстрируют, что иногда искусство, нарушая равновесие, только выигрывает. (Опубликовано с разрешения: Ричард Серра/ArtistRightsSociety, Нью-Йорк.)

Симметрия также часто рассматривается как необходимая составляющая прекрасного, о чем свидетельствуют многочисленные памятники искусства и архитектуры. Система обладает симметрией, если ее можно изменить — повернуть, поменять части местами — так, что трансформированная система будет неотличима от первоначальной. Вероятно, гармоничностью симметричной системы объясняется тот факт, что она присутствует практически во всех религиозных символах. На рис. 48 вы видите христианский крест, иудейскую звезду, исламский полумесяц и буддистское колесо дхармы.



РИС. 48. Религиозные символы часто обладают симметрией

Особенно широко использует симметрию исламское искусство, где запрещены всякие антропоморфные образы; ему приходится полагаться в основном на геометрические формы. Великолепный пример — мавзолей Тадж-Махал в Индии. Мне не доводилось встречать людей, которые побывали бы в Тадж-Махале и остались равнодушны к его формам и симметрии. Дворец Альгамбра в южной Испании — яркое выражение мавританского искусства — также несет в себе интересные схемы симметрии; возможно, это одно из красивейших зданий, сохранившихся до наших дней.

Современное искусство, к примеру работы Элсуорта Келли или Бриджет Райли, иногда демонстрирует симметрию геометрических форм. В архитектуре Шартрского собора и росписи потолка Сикстинской капеллы тоже искусно использована симметрия (рис. 49).

Однако произведение искусства, как правило, производит наиболее сильное впечатление тогда, когда его симметрия не полна.



РИС. 49. Архитектура Шартрского собора и свод Сикстинской капеллы воплощают в себе принцип симметрии

Японское искусство известно не только изяществом форм, но и очень тонким и взвешенным нарушением симметрии. В японских картинах и расписанных шелковых экранах всегда присутствует четкая ориентация, ведущая глаз зрителя по вполне определенному маршруту (вы можете убедиться в этом, взглянув на рис. 50).

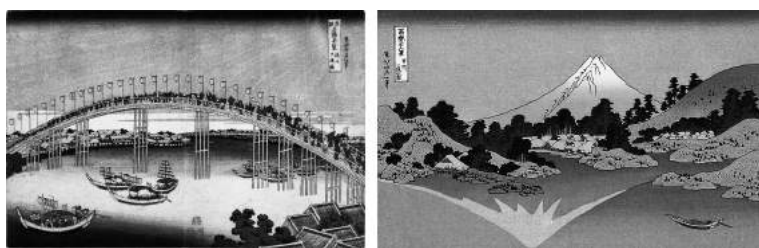


РИС. 50. Японское искусство интересно отчасти своей асимметричностью

Простота — еще один критерий, иногда также связанный с симметрией и способный помочь в оценке красоты. Иногда простота основывается на симметрии, но внутренняя упорядо-

ченность может присутствовать и там, где нет очевидной симметрии. Картины Джейсона Поллока при кажущейся хаотичности обладают внутренней простотой, основанной на плотности красок. Цветовые пятна на них кажутся случайно расположенными, но на самых знаменитых его картинах все цвета присутствуют в строгой гармонии.

Простота в произведении искусства может быть обманчивой. Я однажды попыталась скопировать несколько фрагментов Матисса — детали простейших его работ, написанных в те времена, когда художник был уже стар и слаб. Тем не менее, попытавшись воспроизвести их, я поняла, что эти работы не так уж просты — по крайней мере для моей неумелой руки. Простые элементы могут воплощать в себе более четкую структуру, чем представляется на первый, поверхностный, взгляд.

Во всяком случае, красота заключена не только в простых базовых формах. Некоторые признанные шедевры искусства, такие как работы Тициана или Рафаэля, представляют собой сложные полотна с множеством внутренних элементов. В конце концов, идеальная простота может оказаться отупляющей. Нам нужно что-то простое — но не настолько, чтобы быть скучным. Мир, судя по всему, устроен примерно так же.

КРАСОТА В НАУКЕ

Сформулировать эстетические критерии очень трудно. В науке, как и в искусстве, есть объединяющие темы, но нет абсолюта. Тем не менее эстетические критерии в науке полезны. Они помогают выявлять направление исследований, хотя и не дают гарантии успеха.

Эстетические критерии, применяемые в науке, похожи на те, что мы обрисовали для искусства. Симметрия, безусловно, играет в них важную роль. Интересно, что, как и в искусстве, симметрия в науке обычно относительна. Лучшие научные описания, как правило, отдают дань изяществу симметричных теорий, но предусматривают и нарушения симметрии, необходимые для корректного прогнозирования событий в окружающем нас мире. Нарушение

симметрии обогащает концепции, к которым относится, и придает им дополнительные объяснительные возможности. И, как часто бывает в искусстве, теории, связанные с нарушением симметрии, могут быть куда красивее, чем те, что полностью сбалансированы.

Прекрасный пример тому — механизм Хиггса, отвечающий за массы элементарных частиц. Он красноречиво объясняет, как может быть нарушена симметрия, связанная со слабым взаимодействием. Мы еще не обнаружили бозон Хиггса — частицу, которая неопровержимо доказала бы верность этой концепции*. Но эта теория так красива, что большинство физиков уверены в том, что она верно описывает природу.

Простота — еще один важный субъективный критерий, который используют физики-теоретики. В глубине души все мы верим, что в основе сложных наблюдаемых явлений лежат простые правила и элементы. Поиск простых базовых элементов, из которых состоит все вокруг, начался отнюдь не вчера. Еще в Древней Греции Платон представлял себе идеальные объекты — геометрические формы — и идеальных существ, к которым земные объекты и существа могут лишь приблизиться. Религии тоже нередко постулируют существование более совершенных и цельных субстанций, не встроенных в реальность, но каким-то образом с ней связанных. Даже история изгнания наших предков из Райского сада предполагает, что когда-то мир был идеальным. Вопросы, к которым обращается современная физика, и ее методы очень отличаются от тех, что были у наших предков; тем не менее многие физики и сегодня заняты поисками простого объяснения Вселенной — не в философском или религиозном смысле, а в плане фундаментальных элементов, составляющих основу нашего мира.

Поиск базовой научной истины часто подразумевает поиск простых элементов, из которых можно объяснить сложные явления, наблюдаемые в мире. Такие исследования нередко включают в себя поиск моделей и организационных принципов. Большинство ученых считают перспективными только изящные и лаконичные гипотезы. Кроме того, точка с минимумом исходных данных

* По состоянию на момент написания книги. — *Прим. пер.*

имеет дополнительные преимущества: она обещает максимум предсказательной силы. Рассматривая новые гипотезы об основах Стандартной модели, мы, как правило, скептически относимся к моделям слишком громоздким.

Опять же, как в искусстве, физические теории могут быть просты сами по себе, а могут представлять собой сложные композиции, составленные из простых и предсказуемых элементов. Конечный результат, разумеется, не всегда получается простым, даже если просты исходные компоненты, а иногда и правила, которым они подчиняются.

Крайнее проявление подобных стремлений — поиск единой теории, которая состояла бы всего из нескольких простых элементов и подчинялась небольшому набору правил. Это амбициозная, чтобы не сказать дерзкая, задача. Ясно, что на пути к достижению этой цели нас ждут очевидные препятствия, не позволяющие нам легко отыскать элегантную теорию, которая объяснила бы все без исключения наблюдаемые факты: в мире вокруг мы видим лишь малую часть того, что должна воплощать в себе такая теория. Единая теория, или теория всего, будучи простой и элегантной, должна обладать достаточной глубиной, чтобы охватывать все. Конечно, каждому хотелось бы верить в существование единственной простой и красивой теории, составляющей фундамент всей физики. Однако Вселенная не так чиста, проста и упорядочена, как наши теории. Даже если единая трактовка возможна, потребуется огромное количество исследований, чтобы связать ее со сложными явлениями, которые мы наблюдаем в окружающем мире.

Иногда в суждениях о красоте мы заходим слишком далеко. Наши студенты любят пошутить в адрес профессоров, которые то и дело называют понятные ученым явления «тривиальными», вне зависимости от того, насколько те на самом деле сложны. Конечно, профессор хорошо знает ответ, и базовые элементы, и логику рассуждений, но студенты-то в аудитории ничего этого не знают. Много позже, когда они научатся раскладывать задачу на простые составляющие, она и для них, возможно, станет тривиальной. Но сначала им придется попотеть.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

В науке, как и в жизни, не может быть единого критерия красоты. Есть только несколько интуитивных соображений и экспериментально установленных ограничений, которыми мы можем руководствоваться в поиске истины.

Но не будем заблуждаться, в конечном итоге лишь эксперимент определит, какая из научных гипотез верна, если среди них вообще есть верная. Возможно, в науке эстетические критерии и играют какую-то роль, но подлинный научный прогресс нуждается в глубоком понимании, прогнозировании и тщательном анализе данных. Любая гипотеза, как бы красиво она ни выглядела, может оказаться неверной — и тогда ее следует отбросить.

Но, прежде чем добраться до высоких энергий или гипотетических параметров, необходимых для получения верных физических описаний, физики вынуждены догадываться о том, что скрывается за Стандартной моделью, при помощи эстетических и теоретических соображений. Пока, обладая лишь ограниченными данными, мы определяем направление дальнейших исследований исходя из собственного вкуса и возможностей.

В идеале нам хотелось бы подробно рассмотреть последствия самых разных допущений. Делается это в науке при помощи *моделирования*. Мы с коллегами исследуем различные модели физики элементарных частиц — гипотезы о том, какие физические теории могли бы лежать в основе Стандартной модели. Наша цель — отыскать простые принципы организации сложных явлений, свидетелями которых мы являемся на более легкодоступных масштабах, и таким образом прояснить «белые пятна» наших представлений о мире.

При создании физических моделей ученые пытаются сбалансировать выводы, полученные с помощью общепринятой эффективной теории, и гипотетические представления о все более мелких масштабах. При этом мы используем подход «снизу вверх»: берем то, что нам известно, — и явления, которые уже получили объяснение, и те, что продолжают оставаться для нас загадкой, — и пытаемся дописать картину — вывести такую фундаментальную

модель, которая объяснила бы связи между наблюдаемыми свойствами элементарных частиц и их взаимодействиями.

Понятие «модель» может подразумевать и некую физическую структуру — вспомните крохотные копии зданий, которые используются для демонстрации и проработки архитектурных решений. Речь может идти также о численном моделировании, при котором выясняются возможные последствия заданных (известных или предполагаемых) физических принципов, — вспомните моделирование изменений климата или модели распространения заразных заболеваний.

Моделирование в физике элементарных частиц сильно отличается от обоих названных подходов. Однако можно сказать, что модели элементарных частиц чем-то напоминают моделей со страниц журналов и подиумов. Как на подиуме, так и в физике модели предназначены для демонстрации новых, иногда весьма причудливых, идей. Так же, как в мире моды, зрителей поначалу привлекают самые красивые — или по крайней мере самые яркие — модели, но в конце концов побеждают самые работоспособные и универсальные.

Этим сходство мира моды и науки исчерпывается.

Физические модели представляют собой предположения о том, что может лежать в основе теорий, которые уже проверены. При принятии решения о том, какие из идей наиболее перспективны и стоят дальнейшей проработки, трудно обойтись без эстетических критериев. Однако не менее важную роль при этом играют непротиворечивость и проверяемость этих идей. Модели описывают «глубинные» физические принципы, применимые на расстояниях и размерах, которые нам пока не удастся экспериментально проверить. При помощи моделей мы можем прояснить для себя сущность и последствия различных теоретических предположений.

Модель — это средство экстраполяции; исходя из известного, мы строим предположения о более универсальных теориях, объясняющих максимально возможное число явлений в мире. Это лишь предположения, которые могут оправдаться или не оправдаться, когда эксперименты позволят нам наконец заглянуть в мир

меньших размеров или более высоких энергий и на практике проверить заложенные в них гипотезы и предсказания.

Имейте в виду, что «теория» — это не то же самое, что «модель». Под словом теория я не подразумеваю свободных и ничем не ограниченных рассуждений, как часто бывает при обычном, бытовом использовании этого слова. Неотъемлемой частью любой теории являются известные физические законы, которым они подчиняются, то есть вполне определенный набор принципов со своими правилами и уравнениями, определяющими взаимодействие элементов.

Но даже если мы полностью понимаем некую теорию и ее следствия, то реализовать ее можно множеством разных способов и каждый из них предскажет свои физические следствия в реальном мире. Моделирование — это способ попробовать различные варианты.

Если представить теорию в программе PowerPoint, то модель — это ваша презентация. Теория допускает различные возможности, но вы используете только те из них, которые нужны для демонстрации вашей точки зрения. Теория покажет, где должен находиться заголовок, а где перечислены по пунктам свойства, но именно модель покажет все, что вы считаете нужным донести до аудитории.

Подход к построению моделей в физике меняется в соответствии с тем, ответы на какие вопросы ищут в настоящее время ученые. Физики всегда пытаются предсказать максимальное число физических величин на базе минимального количества начальных предположений, но это не означает, что самые фундаментальные теории рождаются на пустом месте.

В XIX в. физики неплохо представляли себе температуру и давление и умели применять эти понятия задолго до того, как было получено хоть какое-то их объяснение на более фундаментальном микроскопическом уровне — как результат случайного движения большого числа атомов и молекул. В начале XX в. физики пытались строить модели, которые объяснили бы массу в терминах электромагнитной энергии. Эти модели, хотя и основывались на представлении о работе подобных систем, которое тогда разделяли многие ученые, тем не менее оказались неверны. Немного позже

Нильс Бор построил модель атома, чтобы объяснить наблюдаемый спектр его излучения. Вскоре его модель уступила место более всеобъемлющей теории квантовой механики, которая впитала в себя основную идею Бора, но разработала ее на более высоком уровне.

Сегодня авторы моделей пытаются определить, что лежит в основе Стандартной модели физики элементарных частиц. Эту модель называют Стандартной, потому что она хорошо проработана и многократно проверена экспериментально, но в момент своего появления это была всего лишь догадка о том, как можно объединить все имеющиеся наблюдения в единую систему. Позже на базе Стандартной модели были сделаны проверяемые предсказания, и в конечном итоге эксперименты показали, что она верна.

В настоящее время Стандартная модель объясняет все имеющиеся наблюдения, но физики уверены, что она неполна. В частности, она оставляет открытым вопрос о том, что в точности представляют собой частицы и взаимодействия — элементы так называемого сектора Хиггса, ответственные за массы элементарных частиц — и почему частицы в этом секторе обладают именно такими массами, какими обладают. Теории, выводящие нас за пределы Стандартной модели, демонстрируют более глубокие потенциальные взаимосвязи и взаимодействия, которые могли бы дать ответы на эти вопросы. Строятся они на основе выбора конкретных фундаментальных исходных посылок и физических концепций, а также диапазонов размеров и энергий, на которых они применимы.

Значительная часть моих текущих исследований заключается в размышлениях о новых моделях, а также о новых или более проработанных стратегиях поиска, направленных на то, чтобы никакие новые явления не остались незамеченными. Я думаю не только о созданных на основе моих идей моделях, но и о множестве других возможностей. Специалисты по физике элементарных частиц прекрасно знают, какого типа элементы и правила могут работать в моделях — это частицы, силы и допустимые взаимодействия. Но мы не знаем в точности, без каких именно ингредиентов картина реальности получится неполной. Используя известные теоретические составляющие, мы пытаемся распознать те потен-

циально простые базовые идеи, на которых вырастает сложная теория.

Не менее важно и то, что модели помогают нам выявить цели для дальнейших экспериментальных исследований и предсказать, как поведут себя частицы на расстояниях, меньших, чем те, что ученым до сих пор удавалось изучить эмпирически. Результаты измерений помогают нам сделать выбор. Мы пока не знаем, какой будет новая фундаментальная теория, но уже можем судить о ее вероятных отклонениях от Стандартной модели. Рассматривая конкурирующие модели и их следствия, мы можем предсказать, что продемонстрирует нам БАК, если та или иная модель окажется верной.

Исследование моделей и их следствий помогает понять, что именно следует искать ученым. Любая модель с новыми физическими законами, справедливыми в измеримом масштабе энергий, должна предсказывать существование новых частиц и новых отношений между ними. Наблюдение за тем, какие частицы рождаются при столкновениях и какими они обладают свойствами, должно помочь в решении вопроса о том, какие вообще существуют частицы, какие у них массы и как они взаимодействуют. Обнаружение новых частиц или измерение характеристик различных взаимодействий должно подтвердить или отвергнуть предложенные ранее модели и проложить путь к созданию новых, более удачных.

Если данных будет достаточно, эксперименты определят, какая из фундаментальных моделей верна — по крайней мере на том уровне точности, расстояний и энергии, который мы в состоянии исследовать. Мы надеемся, что на самом крохотном диапазоне расстояний, который мы сможем исследовать при энергиях БАКа, правила для фундаментальной теории окажутся достаточно простыми, чтобы позволить нам вывести соответствующие физические законы.

Среди физиков идут оживленные дискуссии о том, какие именно модели следует изучать и как учитывать их в экспериментальных исследованиях. Я, к примеру, нередко сажусь за стол с коллегами-экспериментаторами, чтобы вместе разобраться, как лучше

всего использовать модели для определения направления дальнейших исследований. Не являются ли слишком специфическими контрольные точки с теми или иными параметрами в конкретных моделях? Нет ли лучшего способа рассмотреть все возможности?

Эксперименты на БАКе настолько сложны, что поиск без конкретной цели ни к чему не приведет: интересные данные будут задавлены массой фоновых событий, связанных со Стандартной моделью. Экспериментальные установки разрабатывались и оптимизировались в расчете на существующие модели, но более универсальный поиск в них тоже ведется. Экспериментаторы обязательно должны представлять себе огромное количество моделей, объясняющих те или иные новые данные, которые могут появиться, — это необходимо, чтобы избежать предвзятости.

И теоретики, и экспериментаторы стараются сделать так, чтобы мы не пропустили ничего интересного. Мы не можем знать, которое из множества предположений верно (если такое есть), до тех пор, пока оно не найдет экспериментального подтверждения. Предложенные модели могут верно описывать реальность, но, даже если они окажутся ошибочными, они все же предлагают нам стратегии поиска и сообщают характеристики еще не открытых элементов. Мы надеемся, что БАК даст нам ответы — какими бы они ни были, — и мы должны быть готовы к этому.

ГЛАВА 16

БОЗОН ХИГГСА

Утром 30 марта 2010 г. я проснулась и увидела у себя в почте целый кучу электронных писем с рассказами об успешном пуске и первых столкновениях с энергией 7 ТэВ, состоявшихся накануне ночью. Этот триумф ознаменовал начало реальной программы физических исследований на БАКе. Ускорение частиц и первые столкновения, имевшие место в конце 2009 г., были скорее техническими, чем научными достижениями. Они, конечно, были важны и для экспериментаторов, которые смогли наконец откалибровать свои детекторы на настоящих протонных столкновениях в коллайдере, а не на случайных космических лучах, пролетевших сквозь установку. Следующие полтора года детекторы в Европейском центре ядерных исследований будут регистрировать реальные данные, при помощи которых физики смогут проверить свои модели или наложить на них дополнительные ограничения.

Пуск прошел почти точно по плану. Коллеги-экспериментаторы считают, что это хорошо; еще накануне они высказывали мне свои опасения и говорили, что присутствие журналистов может помешать. Журналисты (и остальные присутствующие) стали свидетелями нескольких ложных стартов — отчасти благодаря установленным на БАКе защитным механизмам, готовым выключить систему сразу же, как только хотя бы что-нибудь пойдет не так. Однако несколько часов спустя все было в порядке: пучки циркулировали по кольцу коллайдера и сталкивались, как положено; газеты и новостные веб-сайты получили массу красивых картинок для публикации.

Кстати, 7 ТэВ, достигнутые при столкновениях в марте 2010 г., — это лишь половинный для БАКа энергетический уровень. Реальную целевую энергию — 14 ТэВ — не планируется задействовать еще по крайней мере несколько лет. Светимость коллайдера — число протонных столкновений в секунду — тоже была намного ниже, чем возможно. Тем не менее в тот день мы смогли поверить, что наше понимание внутренней природы вещества скоро существенно продвинется вперед. А если все пойдет хорошо, то через пару лет БАК будет остановлен, приведен в порядок и вновь запущен уже в полную силу, чтобы дать нам наконец долгожданные ответы.

Одна из важнейших целей коллайдерных исследований — понять, чему фундаментальные частицы обязаны своей массой. Почему все вокруг не носится со скоростью света — а именно это делало бы любое вещество, если бы оно обладало нулевой массой? Ответ на этот вопрос зависит от группы частиц, известных вместе как *сектор Хиггса* и включающих, в частности, бозон Хиггса. В этой главе объясняется, почему этот бозон так важен для понимания феномена возникновения масс. Следующий эксперимент на БАКе, проведенный при более высоких светимости и энергии столкновения, должен в конце концов рассказать нам все о частицах и взаимодействиях.

МЕХАНИЗМ ХИГГСА

Ни один физик не сомневается в том, что на изученных нами до сих пор энергиях Стандартная модель работает. Результаты экспериментов согласуются с ее прогнозами с высокой точностью — лучше 1%.

Однако Стандартная модель полагается на один ингредиент, которого никто пока еще не наблюдал. Механизм Хиггса, названный по имени британского физика Питера Хиггса, — единственный известный нам способ, способный последовательно придавать массы элементарным частицам. Исходя из основных положений «наивной» версии Стандартной модели, ни калибровочные бозоны, передающие взаимодействия, ни сами элементарные частицы,

такие как кварки и лептоны, не должны обладать какой-то ненулевой массой. Тем не менее измерения физических явлений ясно показывают, что те и другие ею обладают. Массы элементарных частиц необходимы для понимания многих явлений атомной физики и физики элементарных частиц, таких как радиус орбиты электрона в атоме или те крохотные расстояния, на которых работает слабое взаимодействие, не говоря уже о формировании структуры Вселенной. Кроме того, массы определяют, сколько энергии нужно для рождения элементарной частицы в соответствии с уравнением $E = mc^2$. И все же в Стандартной модели без механизма Хиггса массы частиц навсегда остались бы загадкой.

Мысль о том, что частицы не имеют изначальных прав на свои массы, звучит весьма авторитарно. Казалось бы, каждая частица должна иметь возможность выбора, иметь ей ненулевую массу покоя или нет. Однако тонкая структура Стандартной модели и любой теории взаимодействий правит твердой рукой и не оставляет своим подданным свободы выбора. Она ограничивает типы дозволенных масс. Для калибровочных бозонов объяснение звучит немного иначе, нежели для фермионов, но базовая логика в том и другом случае имеет отношение к симметриям, лежащим в основе любой теории взаимодействий.

Стандартная модель физики элементарных частиц включает в себя электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия, причем каждое взаимодействие связано с одним из типов симметрии. Без симметрии теория этих взаимодействий, основанная на квантовой механике и специальной теории относительности, предсказывала бы для калибровочных бозонов — частиц, ответственных за передачу взаимодействий — слишком много колебательных режимов, или мод. Если теория не включает симметрию, теоретические расчеты дают бессмысленные предсказания: к примеру, что вероятность высокоэнергетических взаимодействий выше, чем вероятность случайных колебательных мод. Ясно, что в любом точном описании природы такие нефизические частицы — частицы, которые не могут в реальности существовать, потому что колеблются не в том направлении — должны быть заранее исключены.

Можно сказать, что симметрии действуют как спам-фильтры или, может быть, скорее как контроль качества. В любой теории взаимодействий симметрии действуют как фильтры и отбрасывают те элементы, которые неправильно себя ведут. Дело в том, что взаимодействия между нежелательными частицами не уважают симметрий, тогда как частицы, взаимодействующие с сохранением необходимых симметрий, колеблются, как надо. Таким образом, симметрии гарантируют, что теоретические прогнозы касаются только физических частиц, а потому имеют смысл и должны совпадать с результатами экспериментов.

Исходя из вышесказанного симметрии позволяют сформулировать теорию взаимодействий более тонко. Вместо того чтобы исключать в каждом расчете нефизические режимы по одному, симметрии одним широким взмахом исключают из расчета сразу все нефизические частицы. Любая теория с симметричными взаимодействиями рассматривает только физические колебательные режимы, поведение которых, собственно, мы и хотим описать.

Все это замечательно работает в любой теории взаимодействий, где переносчики этих взаимодействий имеют нулевую массу покоя. В симметричных теориях все предсказания в отношении высокоэнергетических взаимодействий имеют смысл, а участвуют в них только физические, то есть реально существующие в природе, колебания. Для безмассовых калибровочных бозонов задача высокоэнергетических взаимодействий решается относительно просто, потому что ограничения соответствующей симметрии устраняют из теории все нефизические, неправильно ведущие себя колебания.

Таким образом, симметрии решают одновременно две задачи: устранение нефизических колебаний и связанных с ними некорректных прогнозов.

Однако калибровочный бозон с ненулевой массой обладает дополнительным физическим — существующим в природе — режимом колебаний. Именно к этой категории относятся калибровочные бозоны, передающие слабое взаимодействие. Симметрии устранили бы слишком большую долю их колебательных режимов. Без какого-то нового, дополнительного ин-

градиента массы слабых бозонов никак не укладываются в Стандартную модель с ее симметриями. Для калибровочных бозонов с ненулевыми массами мы вынуждены учитывать неправильно ведущие себя колебания, а это значит, что решение задачи о высокоэнергетических взаимодействиях перестает быть таким уж простым. Чтобы теория давала разумные прогнозы, необходимо что-то еще.

Далее, ни одна из элементарных частиц Стандартной модели без учета модели Хиггса не может обладать ненулевой массой и соответствовать при этом всем симметриям теории взаимодействий. В присутствии симметрий, связанных с взаимодействиями, кварки и лептоны в безхиггсовской Стандартной модели тоже не могли бы обладать ненулевыми массами.

В главе 14 мы представили таблицу, в которой присутствуют как левые, так и правые фермионы — частицы, которые становятся парными при ненулевых массах. Кварки или лептоны, обладающие ненулевыми массами, порождают взаимодействия, которые превращают левые фермионы в правые. Но, чтобы левые и правые фермионы способны были превращаться друг в друга, те и другие должны участвовать в одних и тех же взаимодействиях. В то же время эксперименты показывают, что слабое взаимодействие иначе действует на левые фермионы, чем на правые, в которые могут превращаться массивные кварки и лептоны. Такое нарушение пространственной симметрии при первом знакомстве кажется поразительным. В конце концов, остальные известные законы природы не различают левое и правое. Но эта замечательная особенность — то, что слабое взаимодействие по-разному относится к левому и правому — была продемонстрирована экспериментально и представляет собой существенную характеристику Стандартной модели.

Тот факт, что левые и правые кварки и лептоны взаимодействуют по-разному, говорит о том, что без дополнительного ингредиента ненулевые массы кварков и лептонов никак не согласуются с известными физическими законами. Эти ненулевые массы связали бы частицы, несущие слабый заряд, с частицами, такого заряда не несущими.

Иными словами, поскольку слабый заряд несут только левые частицы, он может теряться. Судя по всему, заряд при этом уходит в вакуум — пространство, не содержащее никаких частиц. Вообще-то, такого происходить не должно. Заряды должны сохраняться. Если заряд может появляться и исчезать, симметрии, связанные с соответствующим взаимодействием, оказываются нарушенными — и у нас вновь появятся причудливые вероятностные прогнозы высокоэнергетических взаимодействий калибровочных бозонов. Заряды не должны волшебным образом появляться и исчезать, если вакуум на самом деле пуст и не содержит ни частиц, ни полей.

Но заряды вполне могут появляться и исчезать, если вакуум на самом деле не пуст, а содержит *поле Хиггса*, которое придает ему слабый заряд. Поле Хиггса, даже если оно придает вакууму заряд, не состоит из реальных частиц. По существу, это распределение слабого заряда в пределах Вселенной, возникающее только тогда, когда само поле приобретает ненулевую величину. Когда поле Хиггса отлично от нуля, дело обстоит так, как будто Вселенная имеет неограниченные запасы слабого заряда. Представьте, что вы располагаете неограниченным источником денег. Вы можете раздавать деньги или брать их себе, и в вашем распоряжении по-прежнему будет оставаться неограниченная сумма. Примерно так же поле Хиггса насыщает вакуум неограниченным слабым зарядом. При этом оно нарушает симметрии, связанные с взаимодействиями, и позволяет зарядам уходить в вакуум и извлекаться из него, в результате чего возникают массы частиц.

Один из способов представить себе механизм Хиггса и происхождение масс состоит в том, что этот механизм позволяет вакууму вести себя подобно вязкой жидкости — полю Хиггса, пронизывающему вакуум, — несущей слабый заряд. Частицы, несущие этот заряд, такие как слабые калибровочные бозоны, а также кварки и лептоны Стандартной модели, могут взаимодействовать с этой «жидкостью», и это взаимодействие замедляет частицы. Такое замедление говорит об обретении частицами массы — ведь безмассовые частицы путешествуют сквозь вакуум со скоростью света.

Этот тонкий процесс, посредством которого элементарные частицы обретают массу, известен как механизм Хиггса. Он говорит нам не только о том, как частицы обретают массу, но и о свойствах этих масс. Механизм Хиггса объясняет, к примеру, почему одни частицы тяжелые, а другие — легкие. Дело в том, что у частиц, сильнее взаимодействующих с полем Хиггса, масса больше, а у тех, которые взаимодействуют слабее, масса меньше. Истинный, или t -кварк, самый тяжелый из всех, взаимодействует сильнее остальных. Электрон или e -кварк, обладающие небольшой массой, взаимодействуют намного слабее.

Механизм Хиггса позволяет также глубоко заглянуть в природу электромагнетизма и фотонов, которые передают это взаимодействие. Механизм Хиггса говорит нам, что массу обретают только те переносчики взаимодействия, которые взаимодействуют с распределенным в вакууме слабым зарядом. Калибровочные W - и Z -бозоны взаимодействуют с этим зарядом и потому обладают неисчезающей массой. Однако поле Хиггса, насыщающее вакуум и несущее слабый заряд, электрически нейтрально. Фотон не взаимодействует со слабым зарядом, и его масса остается нулевой. Таким образом, фотон — исключение.

Без механизма Хиггса в природе было бы три безмассовых слабых калибровочных бозона и еще один переносчик взаимодействия (тоже с нулевой массой), известный как гиперзарядный калибровочный бозон, и никто и никогда не стал бы вообще говорить о фотоне. Но в присутствии поля Хиггса только уникальная комбинация гиперзарядного калибровочного бозона и одного из трех слабых калибровочных бозонов не взаимодействует с зарядом в вакууме — и именно эта комбинация представляет собой фотон, передающий электромагнитное взаимодействие. Отсутствие у фотона массы имеет принципиальное значение для многих важных явлений, представляющих собой следствие электромагнетизма. Безмассовость фотона объясняет, почему радиоволны распространяются на гигантские расстояния, тогда как слабое взаимодействие ограничено расстояниями крохотными. Поле Хиггса несет слабый заряд, но не несет электрического. Поэтому фотон имеет нулевую массу и путешествует со скоростью света

по определению, тогда как переносчики слабого взаимодействия массивны.

Не запутайтесь: фотоны — элементарные частицы. Но в определенном смысле первоначальные калибровочные бозоны были идентифицированы неверно, потому что они не соответствовали никаким физическим частицам, которые имеют определенные массы (возможно, нулевые) и проходят сквозь вакуум беспрепятственно. До тех пор пока нам не известны слабые заряды, распределенные по вакууму посредством механизма Хиггса, мы никак не можем определить, какие частицы обладают ненулевыми массами, а какие нет. В соответствии с зарядами, полученными вакуумом через механизм Хиггса, гиперзарядный калибровочный бозон и слабый калибровочный бозон при движении сквозь вакуум то и дело превращаются друг в друга, и мы не можем приписать ни одному из них определенной массы. С учетом слабого заряда вакуума можно утверждать, что только фотон и Z-бозон проходят сквозь вакуум, не меняя своей сущности, причем Z-бозон приобретает массу, а фотон — нет. Таким образом, механизм Хиггса делает исключение для одной конкретной частицы под названием «фотон» и для одного конкретного типа заряда — электрического, который фотон переносит.

Таким образом, механизм Хиггса объясняет, почему из всех переносчиков взаимодействий только фотон имеет нулевую массу. Он объясняет и еще одно свойство массы. Этот урок немного тоньше, но он дает нам возможность глубоко разобраться в том, почему механизм Хиггса допускает массы, которые хорошо согласуются с разумными высокоэнергетическими предсказаниями. Если представить себе поле Хиггса как жидкость, то можно вообразить, что при определении массы частиц плотность этой жидкости также имеет значение. А если мы представим эту плотность как результат действия зарядов, расположенных на фиксированных расстояниях, то получится, что одни частицы пролетают настолько маленькие расстояния, что никогда не встречаются со слабым зарядом, — они движутся так, как если бы обладали нулевой массой; частицы же, проходящие большие расстояния, неизбежно сталкиваются со слабыми зарядами и замедляются.

Все вышесказанное соответствует тому факту, что механизм Хиггса связан со *спонтанным нарушением* симметрии, связанной со слабым взаимодействием, а это нарушение симметрии связано с определенным масштабом.

Спонтанное нарушение симметрии возникает в тех случаях, когда симметрия присутствует в законах природы — как в теории фундаментальных взаимодействий, — но нарушается в реальном состоянии системы. Как мы уже говорили, симметрии должны существовать по причинам, связанным с высокоэнергетическим поведением частиц в этой теории. Тогда единственное решение заключается в том, что симметрии существуют, однако спонтанно нарушаются, чтобы слабый калибровочный бозон мог обладать массой, но избегать при этом «неправильного» поведения при высоких энергиях.

Механизм Хиггса основан на представлении о том, что симметрия на самом деле — это часть теории. Законы природы предполагают симметрию. Но реальное состояние окружающего мира игнорирует ее. Вообразите себе карандаш, который сначала стоит торчком (симметрично), а потом падает, выбирая тем самым одно определенное направление. Пока карандаш стоял, все направления для него были одинаковы, но при его падении симметрия нарушается. Таким образом, лежащий карандаш спонтанно нарушает симметрию, которая для стоящего карандаша соблюдалась.

Точно так же механизм Хиггса спонтанно нарушает симметрию слабого взаимодействия. Это означает, что законы физики предусматривают симметрию, но для вакуума, насыщенного зарядом слабого взаимодействия, симметрия нарушается. Поле Хиггса, пронизывающее Вселенную несимметричным образом, нарушает симметрию слабого взаимодействия, которая без него соблюдалась бы, и позволяет элементарным частицам обзаводиться массой.

Помещая в вакуум некий заряд, механизм Хиггса нарушает симметрию, связанную со слабым взаимодействием, причем делает это на определенном масштабе. Этот масштаб задается распределением слабых зарядов в вакууме. На высоких энергиях или на маленьких расстояниях частицы не встречают

никаких слабых зарядов и потому ведут себя как безмассовые. Это означает, что на маленьких расстояниях (или на высоких энергиях, что эквивалентно) симметрия, судя по всему, соблюдается. Однако на больших расстояниях слабый заряд действует в некоторых отношениях как сила трения и замедляет частицы. Похоже, что поле Хиггса придает частицам массу только на низких энергиях, то есть на относительно больших расстояниях.

Именно это нам и нужно. Опасные взаимодействия, которые не имели бы смысла для массивных частиц, применимы только на высоких энергиях. На низких энергиях частицы могут — и должны, как показывают эксперименты — обладать массой. Механизм Хиггса, спонтанно нарушающий симметрию слабого взаимодействия, — единственный известный нам способ обеспечить такое положение вещей.

Хотя мы до сих пор не видели частиц, ответственных за механизм Хиггса, который, в свою очередь, отвечает за массы элементарных частиц, у нас имеются экспериментальные свидетельства того, что механизм Хиггса в природе существует. Его действие мы много раз наблюдали в совершенно ином контексте: а именно в *сверхпроводящих* материалах. Сверхпроводимость возникает тогда, когда электроны образуют пары и эти пары пронизывают весь материал. Так называемый *конденсат* в сверхпроводниках состоит из электронных пар, играющих ту же роль, что и поле Хиггса в приведенном выше примере.

Но в сверхпроводнике конденсат переносит не слабый заряд, а электрический. То есть конденсат как бы придает массу фотону, который передает электромагнитное взаимодействие внутри сверхпроводника. Масса *экранирует* заряд; это значит, что внутри сверхпроводящего материала электрическое и магнитное поля далеко не распространяются, а силы спадают очень быстро на коротких расстояниях. Квантовая механика и специальная теория относительности утверждают, что *расстояние экранирования* внутри сверхпроводника есть прямое следствие фотонной массы, которая существует только в сверхпроводящем субстрате. В этих материалах электрические поля не могут проникать дальше, чем на расстояние экранирования, потому что фотон,

отражаясь от пронизывающих сверхпроводник электронных пар, обретает массу.

Механизм Хиггса работает аналогичным образом*. Но вместо электронных пар (несущих электрический заряд), пронизывающих вещество, мы говорим здесь о поле Хиггса (несущем слабый заряд), пронизывающем вакуум. А вместо фотона и его массы, экранирующей электрический заряд, речь идет о слабых калибровочных бозонах и их массах, экранирующих слабый заряд. Слабые калибровочные бозоны обладают ненулевой массой, поэтому слабое взаимодействие эффективно лишь на очень малых субъядерных расстояниях.

Поскольку это единственный непротиворечивый способ объяснить существование массы у слабых калибровочных бозонов, физики уверены, что механизм Хиггса в природе действует. И мы считаем его ответственным не только за массы слабых калибровочных бозонов, но и за массы всех вообще элементарных частиц. У нас нет никакой другой непротиворечивой теории, которая позволила бы частицам Стандартной модели, несущим слабый заряд, обладать массой.

Мы преодолели очень сложный раздел книги, содержащий несколько абстрактных концепций. Представление о механизме Хиггса и поле Хиггса неразрывно связано с квантовой теорией поля и физикой элементарных частиц и далеко от любых явлений, которые человек может хотя бы вообразить. Поэтому позвольте мне еще раз коротко сформулировать некоторые основные положения. Если бы механизма Хиггса не было, мы вынуждены были бы отказаться либо от признания масс элементарных частиц, либо от обоснованных предсказаний, связанных с высокими энергиями. Но и то и другое представляет собой важную часть верной теории. Предлагаемое

* Описание сверхпроводимости через фотонную массу дали в 1950 г. В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау. Идея генерации массы частиц путем спонтанного нарушения симметрии высказана в 1962 г. Филипом Андерсоном. Питер Хиггс в 1964 г. предложил для релятивистских уравнений Гинзбурга — Ландау решение в виде частиц и предсказал существование тяжелого скалярного бозона. Аналогичные идеи одновременно выдвинули Браут и Энглерт, Гуральник, Хаген и Киббл. Последующие работы Виктора Попова и Людвига Фаддеева по калибровочным полям, Стивена Вайнберга и Абдуса Салама по теории электрослабого взаимодействия и Герарда 'т Хоофта по перенормировке позволили к середине 1970-х гг. сформулировать то, что сейчас известно как механизм Хиггса. — *Прим. пер.*

решение состоит в том, что законы природы предусматривают симметрию, но она может спонтанно нарушаться из-за ненулевой величины поля Хиггса. Нарушение симметрии вакуума позволяет элементарным частицам иметь ненулевую массу. Однако поскольку спонтанное нарушение симметрии связано с определенным диапазоном энергий (и расстояний), его действие сказывается только при низких энергиях. Речь идет об энергиях, соответствующих массам элементарных частиц, и о более низких энергиях (и, соответственно, о расстояниях, характерных для слабого взаимодействия и больших). Для этих энергий и масс действие гравитации пренебрежимо мало, и Стандартная модель (с учетом масс) верно описывает измерения в физике элементарных частиц. В то же время симметрия, предусмотренная законами природы, позволяет строить разумные высокоэнергетические прогнозы. Плюс к тому механизм Хиггса объясняет нулевую массу фотона как результат его невзаимодействия с пронизывающим Вселенную полем Хиггса.

Однако, хотя теоретически все это выглядит последовательно и логично, экспериментальные доказательства изложенных выше идей нам еще только предстоит получить. Даже Питер Хиггс признал важность подобной проверки. В 2007 г. он сказал, что математические построения кажутся ему очень убедительными, но «если это не подтверждено экспериментально, то это просто игра; все это необходимо проверить». Мы считаем предложенную Питером Хиггсом гипотезу верной, а потому ожидаем в самые ближайшие годы интереснейших открытий. Доказательства должны появиться на БАКе в виде одной или нескольких частиц; в простейшем варианте доказательством стала бы частица, известная как *бозон Хиггса*, или *higgс*.

ПОИСК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ

«Хиггс» означает не только человека и механизм, но и название предполагаемой частицы. Бозон Хиггса — ключевое недостающее звено Стандартной модели*. Это признак существования механиз-

* Дебатировался также вопрос о том, относятся ли к Стандартной модели правые нейтрино. Даже если таковые присутствуют, они, скорее всего, чрезвычайно тяжелы и не слишком важны для низкоэнергетических процессов. — *Прим. авт.*

ма Хиггса, который мы надеемся обнаружить в ходе экспериментов на Большом адронном коллайдере. Его открытие подтвердило бы теоретические построения и показало бы, что поле Хиггса действительно пронизывает вакуум. У нас есть серьезные основания считать, что механизм Хиггса действует во Вселенной — ведь никто не может без него сконструировать сколько-нибудь разумную теорию, которая объясняла бы массы элементарных частиц. Мы также считаем, что в самом скором времени должны появиться и какие-то экспериментальные доказательства в пользу наших теоретических построений, поскольку БАК вот-вот должен начать эксперименты на соответствующем масштабе энергий. Скорее всего, этим доказательством будет бозон Хиггса.

Отношения между полем Хиггса, составляющим часть механизма Хиггса, и бозоном Хиггса, который представляет собой реальную частицу, достаточно сложны, но очень напоминают отношения между электромагнитным полем и фотоном. Вы можете ощутить действие классического магнитного поля, просто поднеся магнит к холодильнику, хотя никаких реальных физических фотонов при этом не возникает. Классическое поле Хиггса — поле, существующее даже при отсутствии квантовых эффектов — пронизывает все пространство и может принимать ненулевое значение, оказывая, таким образом, влияние на массы частиц. Но ненулевое значение поля может возникать и в том случае, когда реальных частиц в пространстве нет.

Однако если что-нибудь «заденет» поле, то есть передаст ему немного энергии, то эта энергия может породить флуктуации поля, которые, в свою очередь, приведут к рождению частицы. Если речь идет об электромагнитном поле, родится фотон. Если речь идет о поле Хиггса, родится бозон Хиггса. Поле Хиггса пронизывает пространство и отвечает за нарушение электрослабой симметрии. Частица Хиггса, с другой стороны, возникает из поля Хиггса везде, где есть энергия: к примеру, в БАКе. О том, что поле Хиггса существует, свидетельствует существование массы у элементарных частиц само по себе. Открытие бозона Хиггса на БАКе усилило нашу убежденность в том, что за происхождение этой массы отвечает именно механизм Хиггса.

Иногда пресса — а вслед за ней и публика, падкая на громкие и интригующие названия — называет бозон Хиггса «частицей Бога». Журналистам нравится это название, потому что на него обращают внимание; именно поэтому, кстати, это случайное выражение в устах физика Леона Ледермана было подхвачено с таким энтузиазмом. Бозон Хиггса — замечательное открытие, но его «псевдоним» не стоит воспринимать всерьез.

Возможно, это прозвучит излишне наукообразно, но существование новой частицы, играющей роль бозона Хиггса, очень солидно обосновано. Помимо изложенного выше теоретического обоснования, этого требует структура Стандартной модели. Представьте, что фундаментальная теория предусматривала бы массивные частицы, а механизма Хиггса для объяснения массы не существовало. В этом случае, как объяснялось в начале главы, предсказания для высокоэнергетических взаимодействий выглядели бы абсурдно — в них появлялись бы даже вероятности больше единицы. Разумеется, мы не можем верить таким предсказаниям. Стандартная модель без дополнительных структур неизбежно оказалась бы неполной. Единственный выход — введение дополнительных частиц и взаимодействий.

Теория с участием бозона Хиггса аккуратно обходит проблемы высокоэнергетических прогнозов. Взаимодействия с бозоном Хиггса не только изменяют прогноз для высокоэнергетических взаимодействий, но полностью устраняют «неправильное» поведение частиц на высоких энергиях. Разумеется, это не просто совпадение. Это именно то, что гарантирует механизм Хиггса. Мы пока не знаем наверняка, верно ли мы предсказываем реальные следствия действия механизма Хиггса, но физики уверены, что в масштабе слабого взаимодействия должна появиться новая частица или несколько частиц.

Исходя из этих соображений, мы уверены, что новые частицы или взаимодействия, «спасающие» теорию, не могут быть слишком тяжелыми или происходить при слишком высоких энергиях. При отсутствии дополнительных частиц некорректные предсказания появляются уже на энергиях около 1 ТэВ. Поэтому можно сказать, что бозон Хиггса (или что-то иное, что играет ту же роль)

не только существует, но и должен быть достаточно легким, чтобы попасть в пределы доступных БАКу энергий. Точнее говоря, расчеты показывают: чтобы Стандартная модель не давала некорректных предсказаний для высокоэнергетических взаимодействий, необходимо, чтобы масса бозона Хиггса не превосходила 800 ГэВ.

В реальности мы ожидаем, что бозон Хиггса окажется заметно легче этого показателя. Существующие теории тяготеют к относительно легкому бозону Хиггса — большая часть теоретических предположений указывает на массу, лежащую лишь чуть выше предела, достигнутого в экспериментах 1990-х гг. на LEP, то есть чуть выше 114 ГэВ. Если бы бозон Хиггса был легче названной величины, его можно было бы получить и обнаружить на LEP, и многие в то время думали, что стоят на пороге открытия. Сегодня большинство физиков считает, что масса бозона Хиггса должна быть очень близка к этой величине и, по всей видимости, не превосходит 140 ГэВ.

Самый весомый аргумент в пользу легкого бозона Хиггса основан на экспериментальных данных — не только на результатах поиска самого бозона, но и на результатах измерения других величин Стандартной модели. Предсказания Стандартной модели очень хорошо согласуются с результатами измерений, и даже небольшие отклонения могли бы нарушить эту согласованность. Бозон Хиггса влияет на предсказания Стандартной модели через квантовые эффекты. При слишком тяжелом бозоне Хиггса эти эффекты были бы слишком велики, и согласованность между экспериментальными данными и теоретическими предсказаниями нарушалась бы.

Напомним, что согласно квантовой механике в любом взаимодействии принимают участие и виртуальные частицы. Они появляются на краткий миг и исчезают вновь, какое бы начальное состояние вы ни выбрали, и вносят свой вклад в итоговое взаимодействие. Так что хотя многие процессы Стандартной модели проходят вообще без участия бозона Хиггса, обмен частицей Хиггса тем не менее влияет на все предсказания в рамках Стандартной модели, такие как скорость распада калибровочного Z-бозона на кварки и лептоны и отношение масс W- и Z-бозонов. Влияние

виртуальных эффектов Хиггса на эти *точные электрослабые* измерения зависит от массы бозона Хиггса. При этом оказывается, что предсказания хорошо согласуются с экспериментом только в том случае, если масса бозона Хиггса не слишком велика.

Вторая (более умозрительная) причина считать, что бозон Хиггса должен оказаться не слишком тяжелым, имеет отношение к теории так называемой суперсимметрии, к которой мы вскоре обратимся. Многие физики считают, что суперсимметрия реально существует в природе, и исходя из этой теории масса бозона Хиггса должна быть близка к измеренной массе калибровочного Z-бозона, то есть относительно невелика.

Учитывая предположение о том, что бозон Хиггса не слишком тяжел, можно задать вопрос: почему мы видели все частицы Стандартной модели, но никогда не видели бозона Хиггса. Все дело в его свойствах. Даже если масса частицы невелика, мы ее не увидим до тех пор, пока не сумеем получить на коллайдере и зарегистрировать. А наша способность сделать это определяется свойствами этой частицы. В конце концов, частицу, которая вообще ни с чем не взаимодействует, никто никогда не увидит, какой бы легкой она ни была.

Мы немало знаем о том, как должны выглядеть взаимодействия бозона Хиггса, потому что бозон Хиггса и поле Хиггса, хоть это и разные вещи, похоже взаимодействуют с другими элементарными частицами. А о взаимодействиях поля Хиггса с элементарными частицами мы можем судить по массам этих частиц. Поскольку механизм Хиггса отвечает за массы элементарных частиц, мы можем сказать, что поле Хиггса сильнее всего взаимодействует с самыми тяжелыми частицами. А поскольку бозон Хиггса возникает из поля Хиггса, мы можем сказать то же и о его взаимодействиях. Бозон Хиггса, как и поле Хиггса, сильнее взаимодействует с теми частицами Стандартной модели, которые обладают наибольшей массой.

Более сильное взаимодействие между бозоном Хиггса и тяжелыми частицами подразумевает, что для получения бозона Хиггса лучше всего было бы начать с тяжелых частиц и их столкновений. К несчастью, в коллайдерах мы не можем начать с тяжелых частиц.

Представьте, как в БАКе могли бы возникнуть бозон Хиггса или, вообще говоря, любая частица. В столкновениях на БАКе участвуют легкие частицы. Судя по небольшой массе, с частицей Хиггса они взаимодействуют так слабо, что если бы в рождении бозона Хиггса не участвовали никакие другие частицы, то возникал бы он слишком редко, чтобы мы могли его обнаружить на любом из наших коллайдеров.

К счастью, квантовая механика предлагает нам и другие варианты. Бозон Хиггса незаметно рождается в коллайдерах с участием тяжелых виртуальных частиц. При столкновении легких кварков могут родиться тяжелые частицы, которые затем испустят бозон Хиггса. К примеру, легкие кварки могут при столкновении породить виртуальный W -бозон, первый в ряду калибровочных бозонов. Эта виртуальная частица может затем излучить бозон Хиггса (схему этого процесса можно увидеть на первой схеме рис. 51). Поскольку виртуальный W -бозон намного тяжелее и верхнего, и нижнего кварков в составе протона, с бозоном Хиггса он взаимодействует соответственно сильнее. При достаточном количестве протонных столкновений именно так должен рождаться хиггс.

Другой вариант рождения бозона Хиггса реализуется, когда кварки испускают два виртуальных слабых калибровочных бозона, которые затем сталкиваются и порождают один бозон Хиггса, как можно видеть на второй схеме рис. 51. В этом случае хиггс возникает вместе с двумя струями, которые формируются вокруг кварков, разлетающихся после появления калибровочных бозонов. И этот, и предыдущий механизм порождают не только бозоны Хиггса, но и другие частицы. В первом случае Хиггс рождается в связке с калибровочным бозоном. Во втором — а для БАКа он имеет большее значение — бозон Хиггса возникает вместе со струями.

Но бозоны Хиггса могут рождаться и сами по себе. Это происходит, когда сталкиваются глюоны, порождая истинный кварк и его антикварк, которые затем аннигилируют с образованием бозона Хиггса, как можно увидеть на третьей схеме. На самом деле истинные кварк и антикварк — частицы виртуальные и живут недолго, но квантовая механика утверждает, что этот процесс происходит довольно часто — ведь истинный кварк активно вза-

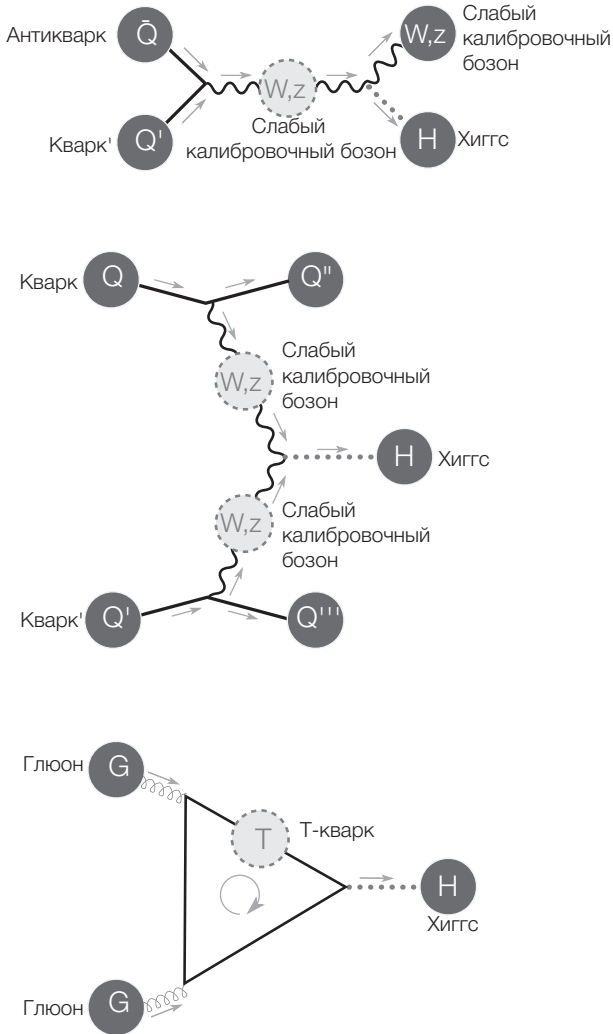


РИС. 51. Три модели рождения бозона Хиггса (сверху вниз): излучение Хиггса, W-Z-синтез, глюон-глюонный синтез

имодействует с хиггсом. Этот механизм возникновения частицы, в отличие от двух первых, не оставляет никаких следов, кроме следа непосредственно бозона Хиггса, который затем распадается.

Так что, несмотря на то что сам хиггс не обязательно слишком уж тяжел — по массе он, скорее всего, сравним со слабыми калибровочными бозонами и уступает истинному кварку, — в его рождении, вероятно, должны быть задействованы тяжелые частицы, такие как калибровочные бозоны или истинные кварки. Поэтому высокоэнергетические столкновения (к примеру, в БАКе) и, разумеется, громадная их частота создают прекрасные условия для возникновения бозонов Хиггса.

Но, несмотря на то что хиггсы в БАКе должны возникать с достаточно высокой частотой, для их наблюдения и регистрации существует еще одно серьезное препятствие — характер распада этих частиц. Бозон Хиггса, подобно многим другим тяжелым частицам, нестабилен. Обратите внимание: распадается именно частица Хиггса, а никак не поле. Поле Хиггса пронизывает вакуум и придает массу элементарным частицам; оно никуда не пропадает. А вот бозон Хиггса — это реальная элементарная частица, обнаружимое следствие работы механизма Хиггса. Подобно другим частицам, она может возникать в коллайдере. И точно так же, подобно другим нестабильным частицам, не может жить вечно. Поскольку распад хиггса происходит практически мгновенно, единственный способ обнаружить эту частицу — это зарегистрировать продукты ее распада.

Бозон Хиггса распадается на частицы, с которыми он способен взаимодействовать, а именно — на любые частицы, приобретающие массу через механизм Хиггса и достаточно легкие, чтобы на их образование хватило энергии. Когда при распаде бозона Хиггса рождаются частица и соответствующая ей античастица, масса каждой из них должна составлять меньше половины его массы, чтобы не нарушался закон сохранения энергии. При этом чаще всего частица Хиггса будет распадаться на самые тяжелые частицы, на которые сможет при этом условия. Но это, к сожалению, означает, что относительно легкий бозон Хиггса лишь изредка распадается на те частицы, которые можно без труда обнаружить и распознать.

Если бозон Хиггса, вопреки ожиданиям, окажется действительно тяжелым — вдвое с лишним тяжелее, чем W -бозон (но менее чем вдвое тяжелее истинного кварка), то искать его будет от-

носительно несложно. Тяжелый хиггс будет практически всегда распадаться на пару W - или Z -бозонов (на рис. 52 показана схема распада на W -бозоны). Экспериментаторы знают, как распознать получившиеся при этом частицы, так что бозон Хиггса можно будет обнаружить без большого труда.

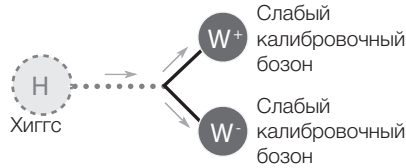


РИС. 52. Тяжелый бозон Хиггса может распадаться на пару калибровочных W -бозонов

Следующий наиболее вероятный сценарий распада относительно тяжелого бозона Хиггса должен проходить с участием красивого кварка и соответствующей ему античастицы. Однако частота такого распада была бы намного меньше, потому что масса красивого кварка невелика, и поэтому он гораздо слабее взаимодействует с бозоном Хиггса, чем калибровочный W -бозон. Если хиггс достаточно тяжел, чтобы распадаться на W -бозоны, он будет давать при распаде красивые кварки меньше чем в одном случае из ста. Распад на еще более легкие частицы будет происходить еще реже. Так что если бозон Хиггса все же окажется достаточно тяжелым — тяжелее, чем мы ожидаем, — он будет распадаться на слабые калибровочные бозоны. А регистрировать такие распады относительно несложно.

Однако, как уже говорилось ранее, и теория, и экспериментальные данные Стандартной модели говорят нам, что бозон Хиггса, скорее всего, окажется более легким и не сможет распадаться на слабые калибровочные бозоны. В этом случае наиболее частым вариантом будет распад на красивый кварк и его античастицу — красивый антикварк (рис. 53), — а этот распад зарегистрировать гораздо сложнее. С одной стороны, проблема состоит в том, что при столкновении протонов рождается множество активно взаимодействующих кварков и глюонов, которые легко можно

спутать с небольшим количеством красивых кварков, родившихся при гипотетическом распаде бозона Хиггса. Мало того, в БАКе будет возникать так много истинных кварков, что их распад с образованием красивых кварков тоже будет маскировать сигнал от бозона Хиггса. Теоретики и экспериментаторы сейчас ищут способ надежно регистрировать финальную стадию распада хиггса в виде красивых кварка и антикварка. Тем не менее, несмотря на максимальную частоту, это, вероятно, не самый перспективный режим для поиска хиггса в БАКе, хотя теоретики и экспериментаторы, скорее всего, найдут способ воспользоваться и этим вариантом.

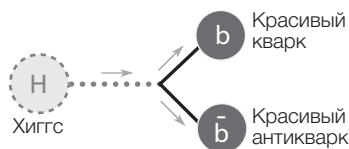


РИС. 53. Легкий бозон Хиггса будет распадаться преимущественно на красивые кварки

Так что ученым придется исследовать и альтернативные финальные состояния хиггсового распада, хотя наблюдаться они будут намного реже. Самые перспективные кандидаты — тау-частица и анти-тау-частица или пара фотонов. Напомню, что тау-частица — самый тяжелый из трех типов заряженных лептонов и самая тяжелая, помимо красивого кварка, частица, на пару которых может распадаться бозон Хиггса. Частота фотонного распада намного меньше — бозоны Хиггса распадаются на фотоны только через квантовые виртуальные эффекты, — зато фотоны относительно несложно регистрировать. Вообще, это непростой режим, но экспериментаторы умеют так хорошо измерять характеристики фотонов, что, как только бозонов распадется достаточное количество, смогут безошибочно распознать бозон Хиггса, при распаде которого они образовались.

Поскольку обнаружение бозона Хиггса имеет для науки принципиальное значение, на обеих экспериментальных установках — и на CMS, и на ATLAS — предусмотрены хитроумные и точные стратегии поиска фотонов и тау-частиц; более того, детекторы

обеих установок проектировались с расчетом на поиск бозона Хиггса. Электромагнитные калориметры, описанные в главе 13, рассчитаны на тщательное измерение энергии фотонов, а мюонные детекторы помогают регистрировать распады еще более тяжелых тау-частиц. Считается, что вместе эти средства достаточны для того, чтобы убедиться в существовании бозона Хиггса, а как только хиггсы будут обнаружены, свойства их тоже можно будет установить.

Как рождение, так и распад бозона Хиггса ставят перед экспериментаторами достаточно серьезные проблемы, но ученые БАКа должны оказаться на высоте и достойно ответить на этот вызов. Физики надеются, что в ближайшие несколько лет мы сможем отпраздновать открытие бозона Хиггса и больше узнать о свойствах этой частицы.

СЕКТОР ХИГГСА

Итак, мы ожидаем в скором времени обнаружить бозон Хиггса. В принципе, он мог бы родиться и при пробном пуске Большого адронного коллайдера на половинной мощности — ведь энергия столкновения при этом более чем достаточна для создания этой частицы. Однако мы уже говорили о том, что бозон Хиггса возникает при столкновении протонов лишь в очень небольшой доле случаев. Это означает, что частицы Хиггса будут рождаться только тогда, когда столкновений будет много, а это подразумевает высокую светимость коллайдера. Скорее всего, число столкновений, которые первоначально планировалось получить до остановки коллайдера на полтора года и подготовки его к новому пуску уже на целевых энергиях, слишком мало; бозонов Хиггса в этот период возникло бы слишком мало, чтобы их можно было заметить. Однако новый план, который предусматривает работу БАКа в течение всего 2012 г., а затем остановку его на год, может оказаться более удачным в этом смысле. Не исключено, что именно в этот период ученым удастся «поймать» неуловимый бозон Хиггса*. Разумеется,

* Так оно и случилось! Четвертого июля 2012 г. было официально объявлено, что на обеих экспериментальных установках достоверно обнаружены нейтральные частицы-бозоны с энергией 125,3–126,0 ГэВ, которые, вероятно, и являются долгожданными бозонами Хиггса. — *Прим. пер.*

позже, когда БАК будет работать на полную мощность, его светимость будет достаточно высокой, а поиск хиггса станет для работающих на БАКе ученых одной из основных целей.

Может показаться, что экспериментальный поиск бозона Хиггса не так уж необходим, — ведь ученые совершенно уверены в его существовании, а искать его трудно и дорого. Но на самом деле игра стоит свеч, причем по нескольким причинам. Самая, пожалуй, важная из них состоит в том, что возможности теоретического прогнозирования не бесконечны. Большинство людей доверяет — и небезосновательно — только реальным научным результатам, подтвержденным наблюдениями. Бозон Хиггса — частица в своем роде уникальная и очень отличается от всего, что ученым случалось открывать прежде. Это единственный фундаментальный *скаляр**, с которым мы когда-либо сталкивались. В отличие от *векторных* частиц, таких как кварки и калибровочные бозоны, скаляры, то есть частицы с нулевым спином, остаются неизменными при вращении или при движении относительно них вашей системы отсчета. До сих пор единственными частицами с нулевым спином оставались связанные состояния кварков, которые сами по себе обладают ненулевым спином. Мы не можем утверждать, что скаляр Хиггса существует, пока он не появится и не оставит в детекторе видимых следов.

После того как мы обнаружим (если обнаружим, конечно) бозон Хиггса и убедимся в его существовании, нам захочется познакомиться с его свойствами. Самое важное неизвестное — его масса. Важно узнать также о том, как и при каких условиях он распадается. Ожидаемые параметры нам известны, но нужно экспериментально определить, согласуются ли реальные данные с предсказанными. Это поможет нам понять, верна ли простая теория, описывающая поле Хиггса, или это лишь часть более сложной теории. Измерив свойства бозона Хиггса, мы сможем заглянуть за пределы Стандартной модели.

К примеру, если бы за нарушение электрослабой симметрии отвечало два поля Хиггса, а не одно, этот факт серьезно изме-

* Скаляр (от лат. *scalaris* — ступенчатый) — величина, каждое значение которой может быть выражено одним (действительным) числом. Примерами скаляров являются длина, площадь, время, масса, плотность, температура и т. п. — *Прим. ред.*

нил бы наблюдаемые взаимодействия бозона Хиггса. В других моделях частота рождения бозона Хиггса может оказаться отличной от ожидаемой. А существование других частиц, заряженных относительно взаимодействий Стандартной модели, могло бы повлиять на относительную частоту различных вариантов распада бозона Хиггса.

Это приводит нас еще к одной причине изучать бозон Хиггса — мы пока не знаем, как именно реализуется механизм Хиггса. В простейшей модели — той самой, что излагалась до сих пор в этой главе — экспериментальным сигналом должен служить один бозон Хиггса. Хотя мы уверены, что за массы элементарных частиц отвечает механизм Хиггса, мы пока не знаем точно, какой набор частиц участвует в его реализации. Большинство ученых до сих пор считают, что мы, скорее всего, обнаружим легкий бозон Хиггса. Если так и произойдет, это открытие станет важным подтверждением важной идеи.

Но в альтернативных моделях фигурирует более сложный сектор Хиггса, позволяющий сделать больше проверяемых прогнозов. К примеру, модели суперсимметрии, речь о которых пойдет в следующей главе, предсказывают существование в этом секторе не одной, а нескольких частиц. При этом сам бозон Хиггса тоже предполагается обнаружить, но его взаимодействия будут отличаться от тех, которые предсказывает модель с одной частицей Хиггса. К тому же остальные частицы сектора Хиггса могли бы дать нам собственные интересные данные, если, конечно, они достаточно легкие и их можно получить.

Некоторые модели даже предполагают, что фундаментальный скаляр Хиггса не существует, а механизм Хиггса реализуется более сложной частицей, причем не фундаментальной; сторонники этой модели считают, что эта частица представляет собой скорее связанное состояние других, более элементарных частиц — вроде спаренных электронов, придающих в сверхпроводящем материале массу фотону. Если дело обстоит именно так, то сложная частица Хиггса должна оказаться удивительно тяжелой, а по параметрам взаимодействия отличаться от любого фундаментального бозона Хиггса. В настоящее время эти модели не пользуются особой популярно-

стью, потому что их трудно согласовать со всеми имеющимися экспериментальными данными. Тем не менее их тоже надо проверить.

ПРОБЛЕМА ИЕРАРХИИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Надо сказать, что бозон Хиггса — лишь верхушка айсберга. Каким бы интересным он ни был, его получение вовсе не является единственной целью ученых. Возможно, главный повод изучать масштаб слабого взаимодействия заключается в том, что никто не считает хиггс единственной неизвестной величиной. Физики предполагают, что бозон — лишь один из элементов гораздо более сложной модели, которая сможет многое рассказать нам о природе вещества и пространства.

Дело в том, что бозон Хиггса — единственная ниточка, ведущая нас к решению другой громадной загадки, известной как *проблема иерархии*. Проблема иерархии касается вопроса о том, почему массы частиц — и масса хиггса, в частности — принимают именно те значения, которые мы знаем. Почему масштаб масс, соответствующий слабому взаимодействию, — а именно он определяет массы элементарных частиц — в десять тысяч триллионов раз (иначе говоря, в 10^{16} раз) меньше, чем масса Планка, определяющая силу гравитационного взаимодействия (рис. 54).

Громадность массы Планка относительно слабой массы соответствует относительной слабости гравитационного взаимодействия, сила которого *обратно пропорциональна* массе Планка. Если эта масса так велика — а мы это знаем, — то сила тяготения должна быть чрезвычайно слабой.

Факты говорят о том, что тяготение — самое слабое из всех известных взаимодействий. На первый взгляд тяготение не кажется очень уж слабым, но только потому, что каждого из нас притягивает вся громадная масса Земли. Если вместо этого рассмотреть гравитационное притяжение между двумя электронами, то выяснится, что она на 43 порядка величины меньше силы электромагнитного взаимодействия между ними. Гравитация, действующая на элементарные частицы, пренебрежимо мала. В этом контексте

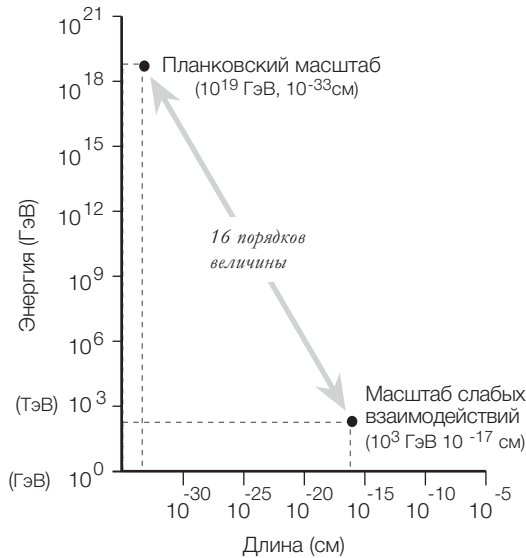


РИС. 54. Проблема иерархии в физике элементарных частиц: масштаб энергий слабого взаимодействия на 16 порядков меньше, чем планковский масштаб, связанный с гравитацией. Соответственно, планковская длина намного меньше расстояний, доступных БАКу

проблема иерархии звучит примерно так: почему сила гравитационного взаимодействия настолько слабее остальных известных нам фундаментальных сил?

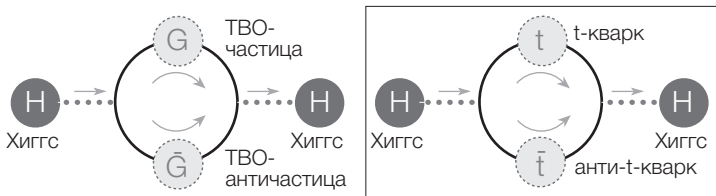


РИС. 55. Квантовый взнос в массу бозона Хиггса со стороны тяжелой частицы (к примеру, обладающей массой масштаба Теории великого объединения) и ее античастицы (слева) и со стороны виртуального истинного кварка и его антикварка (справа)

Специалисты по физике элементарных частиц не любят, когда столь большие числа, как отношение массы Планка к массе сла-

бого взаимодействия, остаются необъясненными. Согласно квантовой теории поля, объединяющей в себе квантовую механику и специальную теорию относительности, особой разницы между этими двумя показателями быть не должно. Для теоретиков это очень серьезно. По существу, квантовая теория поля утверждает, что масса слабого взаимодействия и массовая константа Планка должны быть примерно равны.

В квантовой теории поля масса Планка важна не только потому, что определяет масштаб, на котором сильна гравитация. Помимо всего прочего это масса, на которой существенны и гравитация, и квантовая механика и на которой физические правила в том виде, в каком мы их знаем, должны нарушаться. Однако на более низких энергиях мы умеем проводить расчеты и составлять прогнозы на основе квантовой теории поля, и большое количество успешных предсказаний убеждает физиков в том, что эта теория верна. Более того, наиболее точно измеренные физические величины вполне согласуются с предсказаниями квантовой теории поля. Такая согласованность не случайна.

А вот при попытке применить те же принципы к бозону Хиггса и учесть квантово-механический вклад в его массу от виртуальных частиц возникают тревожные факторы. Получается, что виртуальный вклад практически любой известной нам частицы придает частице Хиггса массу, сравнимую с массой Планка. Такими промежуточными частицами могут быть как тяжелые объекты, такие как частицы с громадной массой масштаба Теории великого объединения (рис. 55, *слева*), так и обычные частицы Стандартной модели, такие как t -кварки (рис. 55, *справа*). Результат тот же; в любом случае виртуальная поправка делает массу хиггса слишком большой. Проблема в том, что дозволенные энергии виртуальных частиц, участвующих в обмене, могут достигать энергии Планка. В этом случае вклад их в массу хиггса может быть почти таким же большим. Но тогда масштаб масс, на котором спонтанно нарушается симметрия, связанная со слабым взаимодействием, тоже будет соответствовать энергии Планка, а это на 16 порядков большие величины — в десять тысяч триллионов раз — это слишком много!

Проблема иерархии очень остро стоит для Стандартной модели с одним бозоном Хиггса. Технически лазейка в этой структуре имеется. Масса хиггса без учета виртуальных составляющих может оказаться громадной и принимать именно то значение, чтобы скомпенсировать виртуальные составляющие как раз до необходимого нам уровня точности. Проблема в том, что это, хотя и возможно, означало бы, что надо аккуратно компенсировать шестнадцать десятичных знаков.

Все мы, физики, считаем, что проблема иерархии (именно под таким названием известна несогласованность масс) указывает на нечто большее — и лучшее — в фундаментальной теории. Пока ни одна простая модель не смогла полностью справиться с этой проблемой. Все перспективные варианты связаны с тем, чтобы расширить Стандартную модель и приписать ей новые свойства. Решение проблемы иерархии наряду с выяснением принципа действия механизм Хиггса является основной задачей БАКа — и темой следующей главы.

ВАКАНТНОЕ МЕСТО ТОП-МОДЕЛИ

В январе 2010 г. мои коллеги собрались в Южной Калифорнии на конференцию, чтобы обсудить проблемы физики элементарных частиц и поиск скрытой массы в эпоху БАКа. Организатор конференции Мария Спироупу — ученый-экспериментатор на CMS и сотрудник физического факультета Калифорнийского технологического института — попросила меня прочитать первую лекцию, рассказать о БАКе и дать обзор основных физических целей на ближайшее будущее.

Мария хотела, чтобы конференция получилась динамичной, и предложила нам начать с «дуэли» между тремя выступающими. Мало того, что термин «дуэль» в применении к трем участникам звучит странно, еще и аудитория с множеством приглашенных гостей оказалась очень сложной — в ней присутствовали как специалисты, так и просто интересующиеся представители научного мира Калтеха. Мария попросила уделить побольше внимания темным моментам современных теорий и экспериментов, причем излагать простым и доступным языком.

Я поступила так, как поступил бы на моем месте любой разумный человек перед лицом таких противоречивых требований: начала тянуть время. Результатом моих изысканий в Сети стал первый слайд презентации (рис. 56); позже Деннис Овербай опубликовал его в *The New York Times* в своей статье о конференции — вместе с печаткой в слове «суперсимметрия».

Возле каждого участника «дуэли» (это были я и еще двое выступающих) стояла табличка, из которой было ясно, какую из мо-

делей он намеревается защищать. Все участники конференции, как бы сильно они ни были убеждены в верности своей модели, прекрасно понимали, что в самом ближайшем будущем появятся новые объективные данные, которые и решат вопрос о том, кто будет смеяться последним (или получит Нобелевскую премию).



РИС. 56. Такими я представила модели-кандидаты на слайде для своей презентации

БАК предоставляет нам уникальную возможность получить новые знания и сформировать новые представления о мире. Специалисты в области физики элементарных частиц надеются очень

скоро узнать ответы на сложные вопросы, над которыми мы размышляем уже не один десяток лет. Почему частицы обладают массами? Из чего состоит темное вещество? Решают ли дополнительные измерения проблему иерархии? Участвуют ли в этом дополнительные симметрии пространства-времени? Или здесь работает какой-то совершенно неизвестный механизм?

Среди предлагаемых ответов — модели с такими названиями, как *суперсимметрия*, *техницвет* и *дополнительные измерения*. Вообще говоря, ответы могут оказаться далекими от всего, что предлагалось, но эти модели дают нам конкретные цели поиска и говорят о том, на что надо обратить внимание. В этой главе представлено несколько моделей-кандидатов, которые каждая по-своему пытаются решить проблему иерархии; рассказ о них позволит ощутить «аромат» тех исследований, которые будут проводиться на БАКе. Поиск доказательств в пользу всех моделей ведется одновременно; какой бы ни оказалась подлинная теория природы, наши исследования не пропадут даром: в любом случае нас ждут важные открытия.

СУПЕРСИММЕТРИЯ

Начнем, пожалуй, с необычного вида симметрии, известного как суперсимметрия, и моделей с ее участием. Если бы вы провели опрос среди физиков-теоретиков, то значительная их часть сказала бы, что суперсимметрия решает проблему иерархии. А если бы вы опросили экспериментаторов на тему о том, что им больше всего хочется найти, то значительная их часть также назвала бы суперсимметрию.

Еще в 1970-е гг. многие физики уверовали в то, что такие красивые и удивительные теории, так теория суперсимметрии, просто обязаны быть верными, а сама суперсимметрия должна существовать. Более того, они вычислили, что фундаментальные взаимодействия на высоких энергиях в модели суперсимметрии должны действовать с одинаковой силой — и это даже лучше, чем приблизительное соответствие, которое наблюдается в Стандартной модели; в перспективе это допускает объединение взаимодействий.

Многие теоретики также считают, что суперсимметрия — самое убедительное решение проблемы иерархии из всех имеющихся, несмотря на то что согласовать все детали этой теории с уже известными фактами очень трудно.

Суперсимметричные модели предполагают, что у каждой элементарной частицы Стандартной модели — у электронов, кварков и т. п. — имеется партнер в виде частицы с теми же параметрами взаимодействий, но иными квантово-механическими свойствами. Если мир суперсимметричен, то в нем существует множество неизвестных частиц, которые в скором времени могут быть обнаружены: речь идет о суперсимметричных партнерах всех известных частиц (рис. 57).

Standard Model Particles				Supersymmetric Partners			
Quarks		Leptons		Squarks		Sleptons	
u up	d down	ν_1 lightest neutrino	e electron	$\tilde{u}$ sup	$\tilde{d}$ sdown	$\tilde{\nu}_1$ sneutrino	$\tilde{e}$ selectron
c charm	s strange	ν_2 middle neutrino	μ muon	$\tilde{c}$ scharm	$\tilde{s}$ sstrange	$\tilde{\nu}_2$ sneutrino	$\tilde{\mu}$ smuon
t top	b bottom	ν_3 heaviest neutrino	τ tau	$\tilde{t}$ stop	$\tilde{b}$ sbottom	$\tilde{\nu}_3$ sneutrino	$\tilde{\tau}$ stau
Electroweak Gauge Bosons				Winos, Higgsinos, Charginos			
W^+ W^- Z γ				χ_1^+ χ_1^- χ_2^+ χ_2^-			
Higgs Bosons				Higgsinos, Neutralinos			
H	A	H^0	$H^\pm$	$\tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{\chi}_2^0$	$\tilde{\chi}_3^0$	$\tilde{\chi}_4^0$
gluons				gluinos			
g				$\tilde{g}$			

РИС. 57. В теории суперсимметрии у каждой частицы Стандартной модели имеется суперсимметричный партнер, символ которого дополняется значком тильды, а название — у кварков и лептонов — буквой s впереди. Сектор Хиггса в ней также усилен по сравнению со Стандартной моделью

Суперсимметричные модели действительно могли бы помочь в решении проблемы иерархии; если так, они делали бы это весьма примечательным способом. В полностью суперсимметричной модели виртуальный вклад от частиц и их суперсимметричных партнеров в точности компенсируется. Иными словами, если сложить квантово-механический вклад от всех частиц суперсимметричной модели и прибавить получившуюся величину к массе бозона Хиггса, обнаружится, что прибавка в точности равняется нулю. В суперсимметричной модели Хиггс будет легким или вообще безмассовым даже с учетом виртуальных квантово-механических «добавок». В настоящей суперсимметричной теории вклады от обоих типов частиц полностью компенсируются (рис. 58).

Возможно, это заявление кажется фантастическим, но в действительности компенсация добавок массы гарантируется, потому что суперсимметрия представляет собой совершенно особый вид симметрии. Это симметрия пространства и времени — она напоминает знакомые виды симметрии, такие как симметрия вращения и параллельного переноса, но расширяет их в квантово-механическую область.

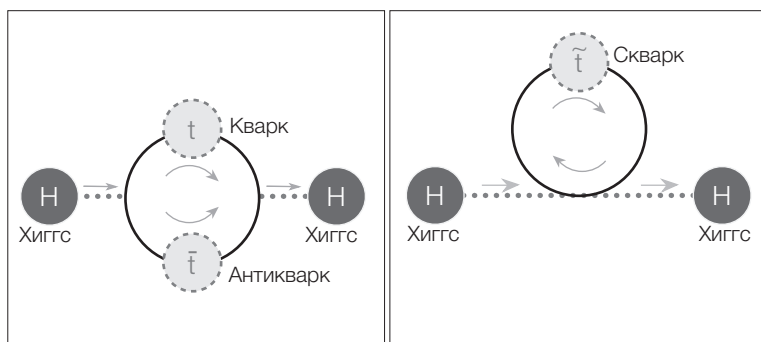


РИС. 58. В суперсимметричной модели вклад в массу бозона Хиггса от суперсимметричных частиц в точности компенсирует вклад от частиц Стандартной модели. К примеру, на двух приведенных здесь диаграммах сумма виртуальных вкладов равняется нулю

Квантовая механика делит вещество на две очень разные категории — бозоны и фермионы. Фермионы — это частицы, облада-

ющие полуцелым *собственным моментом импульса*, где момент импульса — это квантовое число, которое описывает поведение частицы, которое в определенном смысле можно уподобить ее вращению. Под полуцелым моментом импульса подразумеваются величины вроде $1/2$, $3/2$, $5/2$ и т. д. Примеры фермионов — кварки и лептоны Стандартной модели: их момент импульса равен $1/2$. Бозоны — это частицы, которые, подобно переносящим взаимодействие калибровочным бозонам или ожидающему своего открытия бозону Хиггса, имеют суммарный момент импульса, выражаемый целыми числами, такими как 0, 1, 2 и т. д.

Фермионы и бозоны различаются не только моментами импульса. Они очень по-разному себя ведут, когда в одном месте оказывается две или более одинаковые частицы. К примеру, идентичные фермионы с одинаковыми свойствами невозможно обнаружить в одном месте. Об этом говорит нам *принцип исключения*, или *запрет Паули*, названный в честь австрийского физика Вольфганга Паули. Именно этим свойством фермионов объясняется структура периодической системы Менделеева, основанная на том, что электроны, которые не отличаются друг от друга ни по одному квантовому числу, должны находиться на разных орбитах вокруг атомного ядра. По этой же причине мой стул не проваливается в центр Земли — фермионы стула просто не могут находиться в том же месте, что фермионы вещества планеты.

Бозоны же ведут себя строго противоположным образом. Их как раз вероятнее найти в одном месте. Они могут буквально громоздиться один на другой — примерно как крокодилы; именно поэтому могут существовать такие явления, как бозе-конденсат, где частицы должны находиться в одинаковом квантово-механическом состоянии. В лазерах тоже используется бозонное родство фотонов. Интенсивный луч лазера состоит из множества идентичных фотонов.

Интересно, что в суперсимметричной модели частицы, которые мы считаем очень разными, — бозоны и фермионы — можно заменить на противоположные, и в результате получится ровно то же, с чего все началось. У каждой частицы есть партнер противоположного квантово-механического типа, обладающий в точ-

ности такими же зарядами и массой и отличающийся только моментом импульса. Названия новых частиц звучат довольно забавно — на лекциях они обязательно вызывают смешки в аудитории. К примеру, партнером фермионного электрона является бозонный *селектрон*. Бозонный фотон состоит в паре с фермионным фотино, а W -бозон спарен с W ino-фермионом. Новые частицы взаимодействуют между собой подобно соответствующим частицам Стандартной модели, но при этом обладают противоположными квантово-механическими свойствами.

В суперсимметричной теории свойства каждого бозона сопоставлены свойствам его суперпартнера-фермиона, и наоборот. Поскольку у каждой частицы есть суперпартнер, и все взаимодействия между ними строго сбалансированы, теория допускает существование столь причудливой симметрии, которая заменяет фермионы бозонами, и наоборот.

Чтобы понять загадочную на первый взгляд взаимную компенсацию виртуальных вкладов в массу хиггса, следует вспомнить, что суперсимметрия подбирает каждому бозону соответствующий партнер-фермион. В частности, бозону Хиггса в этой модели ставится в соответствие фермион Хиггса, или хиггсино. Если на массу бозона квантово-механические добавки оказывают существенное влияние, то масса фермиона не может быть много больше его *классической массы*, то есть массы без учета квантово-механических поправок.

Логика здесь заложена довольно тонкая, но большие поправки не возникают, потому что массы фермионов относятся как к правым, так и к левым частицам. Масса позволяет им превращаться друг в друга и обратно. Если классического массового члена нет и частицы не могут превращаться друг в друга до прибавления квантово-механических виртуальных эффектов, то они не смогут сделать этого и после учета всех квантово-механических вкладов. Если фермион с самого начала не имеет массы (то есть не имеет классической массы), то его масса останется нулевой и после включения квантово-механических поправок.

К бозонам подобные аргументы не применимы. Бозон Хиггса, к примеру, имеет нулевой собственный момент импульса, так что ни в каком смысле мы не можем говорить о том, что он

вращается влево или вправо. Но из соображений суперсимметрии массы бозонов соответствуют массам фермионов. Поэтому если масса хиггсина равна нулю (или мала), точно такой же должна быть согласно теории суперсимметрии масса его партнера — бозона Хиггса — даже с учетом квантово-механических поправок.

Мы пока не знаем, верно ли это довольно изящное объяснение стабильности иерархии и компенсации поправок к массе хиггса. Но если суперсимметрия действительно решает проблему иерархии, то мы многое можем сказать о том, каких результатов следует ожидать на БАКе. В этом случае мы знаем, какие именно новые частицы должны существовать, потому что у каждой известной частицы должен быть суперсимметричный партнер. Мало того, мы можем оценить массы новых частиц.

Разумеется, если бы суперсимметрия в природе соблюдалась в точности, мы бы сразу знали и массы всех суперпартнеров. Они были бы попросту идентичны массам соответствующих известных частиц. Однако ни одну частицу-суперпартнер до сих пор обнаружить не удалось. Это свидетельствует о том, что суперсимметрия, даже если она реально существует в природе, не может быть строгой. При строгой суперсимметрии мы давно уже открыли бы и селектрон, и скварки, и все остальные суперсимметричные партнеры, предсказанные теорией.

Так что суперсимметрия должна *нарушаться* в том смысле, что отношения, предсказанные теорией суперсимметрии, не могут быть строгими. Согласно теории нарушенной суперсимметрии у каждой частицы по-прежнему есть суперпартнер, но массы этих суперпартнеров отличаются от масс оригинальных частиц Стандартной модели.

Однако если суперсимметрия нарушена слишком сильно, она не сможет разрешить проблему иерархии, потому что мир при сильно нарушенной симметрии выглядит в точности так же, как если бы этой симметрии вовсе не было. Суперсимметрия должна быть нарушена ровно настолько, чтобы мы до сих пор не могли наблюдать ее признаков, но чтобы масса Хиггса была тем не менее защищена от больших квантово-механических вкладов, которые сделали бы ее слишком большой.

Это говорит о том, что суперсимметричные частицы должны иметь массы масштаба слабого взаимодействия. Будь они легче — и мы бы их уже обнаружили; будь они тяжелее — и следовало бы ожидать более тяжелого хиггса. Мы не можем точно сказать, какими будут эти массы, ведь и масса Хиггса известна нам лишь очень приблизительно. Но мы знаем, что если эти массы окажутся слишком большими, то проблема иерархии никуда не денется.

Поэтому мы делаем вывод о том, что если суперсимметрия существует в природе и решает проблему иерархии, то должно существовать множество новых частиц с массами в диапазоне от нескольких сотен гигаэлектронвольт до нескольких тераэлектронвольт. Это именно тот диапазон, в котором БАК должен будет вести поиск. При энергии столкновения 14 ТэВ коллайдер должен выдавать эти частицы даже с учетом того, что кваркам и глюонам, порождающим при столкновении новые частицы, достается лишь небольшая часть исходной энергии протонов.

Проще всего будет получить на БАКе суперсимметричные частицы, несущие сильный (или цветовой) заряд. Эти частицы при столкновении протонов (или, точнее, при столкновении кварков и глюонов в них) могут рождаться в изобилии. Иными словами, при штатной работе БАКа могут возникать новые суперсимметричные частицы, участвующие в сильном взаимодействии. Если это так, они оставят в детекторах очень заметные и характерные следы.

Эти *сигнатуры* — экспериментальные свидетельства, оставляемые частицей — зависят от того, что происходит с частицей после возникновения. Большинство суперсимметричных частиц будут быстро распадаться. Причина в том, что, как правило, для каждой такой тяжелой частицы существует более легкая частица (такая как частицы Стандартной модели) с точно таким же полным зарядом. Если это так, то тяжелая суперсимметричная частица распадется на частицы Стандартной модели таким образом, чтобы сохранился первоначальный заряд, и эксперимент обнаружит только частицы Стандартной модели.

Вероятно, этого недостаточно, чтобы распознать суперсимметрию. Однако почти во всех суперсимметричных моделях су-

персимметричная частица не может распадаться исключительно на частицы Стандартной модели. После ее распада должна остаться другая (более легкая) суперсимметричная частица. Причина в том, что суперсимметричные частицы появляются (или исчезают) только парами. Поэтому на месте распада одной суперсимметричной частицы должна остаться другая суперсимметричная частица. Следовательно, самая легкая из таких частиц должна быть стабильной. Эта самая легкая частица, которой не на что распадаться, известна физикам как легчайшая суперсимметричная частица, или LSP.

С экспериментальной точки зрения распад суперсимметричной частицы характерен тем, что даже после завершения всех процессов легчайшая из нейтральных суперсимметричных частиц должна остаться. Космологические ограничения говорят о том, что LSP не несет никаких зарядов и потому не будет взаимодействовать ни с одним из элементов детектора. Это означает, что в каждом случае возникновения и распада любой суперсимметричной частицы экспериментальные результаты покажут, что импульс и энергия не сохраняются, их часть куда-то пропадает. Частица LSP уйдет незамеченной и унесет свой импульс и энергию туда, где их невозможно будет зарегистрировать; сигнатурой LSP будет дефицит энергии.

Предположим, к примеру, что в результате столкновения возникает скварк — суперсимметричный партнер кварка. На какие частицы он распадется, зависит от его массы и от того, какие имеются более легкие частицы. Одним из возможных вариантов распада будет превращение скварка в обычный кварк и легчайшую суперсимметричную частицу (рис. 59). Напомню, что распад может происходить практически немедленно, и детектор регистрирует только его продукты. Если произошел распад скварка, детекторы регистрируют пролет кварка в треkere и в адронном калориметре, который измеряет энергию, отдаваемую частицами, участвующими в сильном взаимодействии, но установка определит также недостачу части импульса и энергии. Тот факт, что импульса не хватает, экспериментаторы определяют точно так же, как и при рождении нейтрино. Они измерят весь поперечный

по отношению к пучку импульс и обнаружат, что в сумме он не равен нулю.

Одна из сложнейших задач, стоящих перед экспериментаторами, — достоверно и однозначно распознать недостачу импульса. В конце концов, все незарегистрированное будет казаться пропавшим! Если что-то пойдет не так или будет измерено неверно, а в результате уйдет незамеченной хотя бы крохотная доля энергии, то недостающий импульс создаст полную картину улетевшей суперсимметричной частицы, хотя на самом деле ничего особенного при столкновении не возникло.



РИС. 59. Скварк может распадаться на кварк и легчайшую суперсимметричную частицу

Разумеется, скварк никогда не возникает сам по себе, а только вместе с другим объектом, также участвующим в сильном взаимодействии (к примеру, с другим скварком или антискварком), поэтому экспериментаторы регистрируют и измеряют по крайней мере две струи (пример см. на рис. 60). Если при столкновении протонов возникли два скварка, при распаде они породят два кварка, которых регистрируют детекторы. Часть энергии и импульса уйдут из системы с двумя LSP, и само их отсутствие будет свидетельствовать о возникновении новых частиц.

Как ни странно, долгие задержки с пуском БАКа сыграли и положительную роль: они дали экспериментаторам время как следует разобраться в своих детекторах. Их удалось заранее откалибровать, так что с первого дня работы коллайдера измерения будут чрезвычайно точными, а данные об упущенной энергии — надежными. Теоретики, с другой стороны, получили время обдумать альтернативные стратегии поиска для суперсимметричной и других моделей. К примеру, мне вместе с Дейвом Таккер-Смитом, ученым из Колледжа Уильямса, удалось найти отличный от вышеописан-

ного — но родственный — способ поиска скварка. Наш метод опирается на измерение только импульса и энергии получающихся кварков; в нем не нужно точно измерять недостающий импульс (а это очень непросто и не дает надежных результатов). Метод вызвал среди ученых БАКа заметное оживление; экспериментаторы CMS сразу же приняли его и не только показали, что метод работает, но и в течение всего нескольких месяцев обобщили и улучшили его. Теперь это часть стандартной стратегии поиска суперсимметрии; метод, предложенный нами так недавно, был использован в первом же сеансе поиска суперсимметрии на CMS.

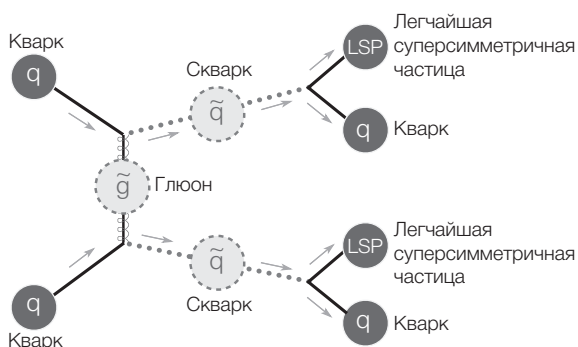


РИС. 60. Два скварка, одновременно возникшие в БАКе, распадутся на кварк и LSP каждый и оставят после себя сигнатуру в виде дефицита энергии

Если суперсимметрия будет обнаружена, экспериментаторы на этом не остановятся. Они попытаются определить весь спектр суперсимметричных частиц, а теоретики будут работать над интерпретацией полученных результатов. Под идеей суперсимметрии и частиц, способных вызывать ее спонтанное нарушение, скрывается интереснейшая теория. Мы знаем, какие суперсимметричные частицы должны существовать, если суперсимметрия существенна для проблемы иерархии, но мы пока не знаем ни их точных масс, ни того, как эти массы возникают.

То, что увидит БАК, очень сильно зависит от спектра масс суперсимметричных частиц, который, вероятно, отличается от спектра масс обычных частиц. Мы знаем, что частицы могут распадаться

только на более легкие. Цепочка распадов — последовательность возможных распадов суперсимметричных частиц — определяется их массами, тем, какие из них легче, а какие тяжелее. Скорости различных процессов также зависят от массы частиц. Более тяжелые частицы в среднем распадаются быстрее. Кроме того, их обычно сложнее получить, потому что они возникают только при высокоэнергетических столкновениях. Все это дало бы нам важную информацию о том, что лежит в основе Стандартной модели и что ожидает нас на следующих энергетических масштабах. Естественно, это относится к анализу любых новых данных, которые нам удастся получить.

Тем не менее следует помнить, что, несмотря на популярность теории суперсимметрии среди физиков, существует несколько поводов для беспокойства и оснований сомневаться в том, что эта теория действительно применима в реальном мире и решает проблему иерархии.

Во-первых, и это, возможно, самое главное, мы пока не видели никаких экспериментальных свидетельств в пользу этой теории. Если суперсимметрия существует, то единственным оправданием для полного отсутствия доказательств может быть тот факт, что все суперпартнеры тяжелые. Но естественное решение проблемы иерархии требует, чтобы суперпартнеры были относительно легкими. Чем тяжелее суперпартнеры, тем менее адекватным средством решения проблемы иерархии представляется суперсимметрия. Потребуется подгонка, определяемая отношением массы бозона Хиггса к масштабу масс, при которых нарушается суперсимметрия. Чем больше это отношение, тем сильнее придется «настраивать» теорию.

В суперсимметричной модели есть единственный способ сделать Хиггса достаточно тяжелым, чтобы его не обнаружили до сих пор, а именно — включить в его массу значительные квантово-механические поправки, для которых опять же необходимы тяжелые суперпартнеры. Их массы должны быть настолько большими, что естественное решение проблемы иерархии вновь невозможно, несмотря на суперсимметрию.

Еще одна проблема с суперсимметрией — проблема поиска непротиворечивой модели, которая предусматривала бы наруше-

ние суперсимметрии и была согласована со всеми полученными до сего дня экспериментальными данными. Суперсимметрия — очень специфическая симметрия, она устанавливает связи между многими взаимодействиями и запрещает некоторые из них, которые, вообще говоря, квантовая механика допускает. При нарушении суперсимметрии берет верх «принцип анархии» и все, что может случиться, случается. Большинство моделей предсказывают типы распадов, которые либо никогда не регистрировались в эксперименте, либо встречаются слишком редко по сравнению с прогнозом. В общем, стоит суперсимметрии нарушиться, и квантовая механика не упустит случая разворошить осиное гнездо.

Возможно, физики просто не замечают верных ответов. Мы, разумеется, не можем точно сказать, что хороших моделей не существует или что некоторой подгонки не потребуется. Конечно, если суперсимметрия — верное решение проблемы иерархии, то доказательства ее существования скоро будут получены на БАКе. Так что этот вариант, безусловно, стоит исследовать. Открытие суперсимметрии означало бы, что эта новая симметрия пространства-времени применима не только в теоретических изысканиях, но и в реальном мире.

Однако пока суперсимметрия не доказана, имеет смысл рассмотреть и альтернативные варианты. И первой в очереди стоит модель, известная как *техницвет*.

ТЕХНИЦВЕТ

Еще в 1970-е гг. физики рассматривали и альтернативную гипотезу решения проблемы иерархии, известную как теория *техницвета*. В моделях этого класса фигурируют частицы, которые интенсивно взаимодействуют между собой посредством новой силы, получившей шутовское название *техницветной*. Суть идеи состояла в том, что сила эта действует примерно так же, как сильное взаимодействие (известное в среде физиков еще и как цветное взаимодействие), но связывает между собой частицы на масштабе энергий, характерном для слабого взаимодействия, а не на намного более низком уровне протонных масс.

Если ответом на проблему иерархии действительно является техницвет, то БАК не произведет на свет ни одного фундаментального бозона Хиггса. Вместо этого он выдаст некое связанное состояние — что-то похожее на адрон, которое будет играть роль частицы Хиггса. Экспериментальным свидетельством в пользу техницвета будет множество сложных частиц (связанных состояний) и сильных взаимодействий — все очень похоже на привычные адроны, но только на гораздо более высоком уровне энергий на масштабе слабого взаимодействия или даже выше.

Однако если решение проблемы иерархии — действительно техницвет, то мы должны были бы уже обнаружить тому доказательства, хотя, конечно, могли и пропустить что-то не слишком заметное.

Кроме того, строить модели на базе теории техницвета еще сложнее, чем на основе суперсимметрии. Оказалось, что найти модель, которая согласовывалась бы со всем, что мы наблюдаем в природе, — очень нетривиальная задача, и до сих пор подобрать полностью подходящую модель не удалось.

Тем не менее экспериментаторы будут работать непредвзято; поиск техницветной силы и любого другого нового типа сильного взаимодействия тоже входит в программу, но надежды на положительный результат не слишком велики. Однако если окажется все-таки, что именно теория техницвета лежит в фундаменте нашего мироустройства, то, может быть, Microsoft Word перестанет наконец воспринимать это слово только как название запатентованного полиграфического процесса и исправлять первую его букву на заглавную.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

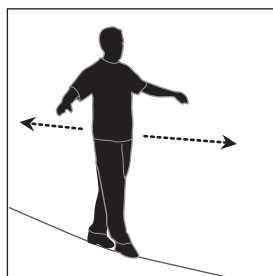
Ни суперсимметрия, ни техницвет не дают нам идеального решения проблемы иерархии. Суперсимметричные теории не предлагают нам экспериментально непротиворечивых механизмов нарушения суперсимметрии, а создать на основе техницветной силы теорию, которая предсказывала бы правильные массы для кварков и лептонов, еще сложнее. Поэтому физики решили отойти от ша-

блонов и рассмотреть идеи, на первый взгляд еще более неоднозначные. Не забывайте, что даже если теория кажется поначалу нелепой, это ничего не значит. Только после того как полностью разберемся в ее следствиях, мы сможем решить, какая из идей самая красивая и, что гораздо важнее, правильная.

Лучшее понимание теории струн и ее компонентов, которого физики добились в 1990-е гг., позволило создать новые подходы к решению проблемы иерархии. На новые идеи физиков вдохновили элементы теории струн, хотя и не обязательно непосредственно следующие из ее очень ограниченной структуры, и речь в них идет о дополнительных пространственных измерениях. Если дополнительные измерения существуют — а у нас есть основания предполагать, что они могут существовать, — то именно в них может скрываться ключ к решению проблемы иерархии. Если это действительно так, то экспериментальных доказательств тоже можно ждать от БАКа.

Дополнительные пространственные измерения — концепция довольно экзотическая. Если во Вселенной действительно есть такие измерения, то пространство вокруг нас на самом деле совсем не такое, каким мы его наблюдаем в повседневной жизни. Помимо обычных трех измерений — лево-право, верх-низ, вперед-назад (длина, ширина и высота, иначе говоря) — пространство продолжается также в иных, невидимых направлениях.

Человек на канате



Муравей на канате

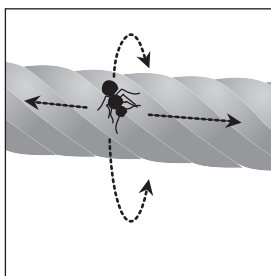


РИС. 61. Человек и крохотный муравей воспринимают натянутый канат очень по-разному. Для человека он имеет лишь одно измерение, для муравья — два

Почему мы не видим этих измерений? Причина может заключаться в том, что они слишком малы, чтобы непосредственно влиять на что-либо из того, что мы можем наблюдать; это предположил физик Оскар Клейн еще в 1926 г. Идея в том, что из-за ограниченных возможностей нашего восприятия некоторые измерения могут оказаться слишком маленькими и потому неразличимыми для нас. Так, гимнаст, идущий по канату, видит свой путь одномерным, тогда как крохотный муравей на том же канате может двигаться в двух измерениях (рис. 61).

В другом варианте измерения могут быть скрытыми потому, что пространство-время изогнуто или скручено — как и должно происходить по Эйнштейну в присутствии энергии. Если искривление достаточно сильное, то эффекты дополнительных измерений незаметны, как определили в 1999 г. мы с Раманом Сандрамом. Это означает, что геометрия свернутого пространства также позволяет измерениям «прятаться».

Но почему у ученых вообще возникла мысль о каких бы то ни было дополнительных измерениях, если никто никогда ничего подобного не видел? В истории физики такое происходило не раз. Никто до поры до времени не «видел» атомы и никто не «видел» кварки. Тем не менее сегодня у нас полно экспериментальных доказательств существования и того и другого.

Никакие законы физики не утверждают, что пространственных измерений может быть только три. Общая теория относительности Эйнштейна работает при любом числе измерений. Более того, вскоре после того как Эйнштейн завершил свою теорию гравитации, Теодор Калуца расширил его идеи и предположил существование четвертого пространственного измерения, а еще через пять лет Оскар Клейн предложил вариант того, как это измерение может быть свернуто и чем оно должно отличаться от трех привычных.

Теория струн — ведущий кандидат на роль теории, объединяющей гравитацию и квантовую механику, — является еще одной причиной того, что физики сейчас всерьез думают о дополнительных измерениях. Теория струн не включает в себя очевидным образом ту теорию гравитации, с которой мы знакомы. Для этого ей необходимы дополнительные измерения.

Меня часто спрашивают, сколько всего измерений существует во Вселенной. Этого мы не знаем. Теория струн предполагает шесть или семь дополнительных измерений. Но создатели моделей на этом не останавливаются. Вполне возможно, что разные варианты теории струн дадут разные ответы на этот вопрос. Во всяком случае, авторов представленных в этой главе моделей интересуют только те измерения, которые в достаточной мере искривлены или настолько велики, что могут оказывать влияние на физические предсказания. Могут существовать и другие измерения, слишком маленькие даже для физики элементарных частиц, но мы не будем принимать в расчет подобные сверхмалые сущности. Вспомним, что такое эффективная теория, и забудем обо всем слишком мелком или невидимом — о том, что не оказывает на нашу систему никакого измеримого воздействия.

Кроме того, теория струн вводит новые элементы, а именно браны; их назначение — обеспечить геометрии Вселенной дополнительные возможности в том случае, если она действительно содержит дополнительные измерения. В 1990-е гг. физик-теоретик, специалист по теории струн Джо Полчински установил, что теория струн — это не просто теория одномерных объектов. Вместе с коллегами он продемонстрировал, что для этой теории также принципиально важны многомерные объекты, известные как браны.

«Брана» происходит от слова «мембрана». Подобно мембранам, которые представляют собой двумерные поверхности в трехмерном пространстве, браны в многомерном пространстве — это поверхности с меньшим числом измерений. Браны способны захватывать в ловушку частицы и силы, так что те теряют способность передвигаться по пространству полной размерности. Браны в многомерном пространстве похожи на занавеску у вас в ванной, которая представляет собой двумерную поверхность в трехмерной комнате (рис. 62). Как капли воды могут двигаться только по двумерной поверхности оконного стекла, так и частицы и силы могут оказаться заперты на «поверхности» браны с меньшим числом измерений, чем в окружающем пространстве.

Можно сказать, что существует два типа струн: *открытые струны*, у которых есть концы, и *замкнутые струны*, образующие

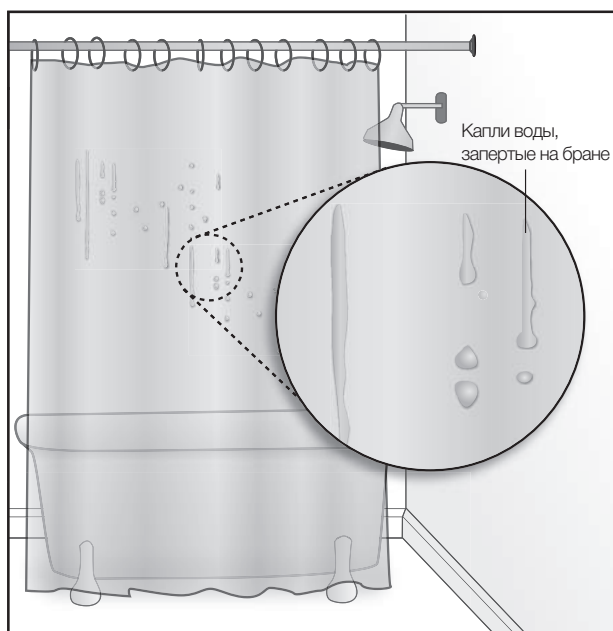


РИС. 62. Брана захватывает в ловушку частицы и силы, которые могут двигаться вдоль нее, но не в состоянии ее покинуть — примерно как капли воды на занавеске в душе

кольца вроде аптечных резинок (рис. 63). В 1990-е гг. струнники-теоретики поняли, что концы открытых струн не могут находиться где попало — струны должны начинаться и заканчиваться на бранах. Частицы, возникающие из колебаний открытой струны, прикрепленной к бране, тоже оказываются запертыми на ней. Частицы, представляющие собой колебания этих струн, не могут никуда уйти с браны. Как капли на окне, они могут передвигаться в пределах измерений браны, но не могут ее покинуть.

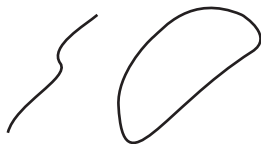


РИС. 63. Открытая струна с двумя концами и замкнутая бесконечная струна

Теория струн предполагает, что существует множество типов бран, но для моделей, пытающихся разрешить проблему иерархии, больше всего интересны те, что распространяются на три измерения — те самые три физических измерения пространства, которые нам известны. Частицы и силы могут быть заперты на такой бране, при том что пространство и тяготение охватывают больше измерений (на рис. 64 схематично представлен мир браны, где человек и магнит ограничены измерениями браны, а гравитация действует как на ней, так и за ее пределами).

Дополнительные измерения теории струн в принципе могли бы оказывать физическое влияние на наблюдаемый мир, как и трехмерные браны. Возможно, важнейшая причина рассматривать дополнительные измерения заключается в том, что они могут влиять на видимые явления и, в частности, объяснять серьезнейшие загадки, такие как проблема иерархии в физике элементарных частиц. Дополнительные измерения и браны могут оказаться ключом к решению этой проблемы; возможно, они помогут понять, почему гравитация так слаба.

Это возвращает нас к главной причине обращения к многомерным моделям и дополнительным пространственным измерениям. Они могут оказывать влияние на явления, в которых мы сейчас пытаемся разобраться, и если это так, то не исключено, что доказательства их существования появятся в самом ближайшем будущем.

Напомню, что проблему иерархии можно сформулировать двумя разными способами. Можно описать суть вопроса тем, что масса хиггсовой частицы — и, соответственно, масштаб слабого взаимодействия — на много порядков меньше массы Планка. Именно этот вопрос мы рассматривали, говоря о суперсимметрии и техницветной силе. Но можно задать и эквивалентный вопрос: а почему гравитация так слаба по сравнению с другими известными фундаментальными взаимодействиями? Сила тяготения определяется планковским масштабом — громадной массой, в десять тысяч триллионов раз превышающей массу слабого взаимодействия. Чем больше масса Планка, тем слабее сила тяготения. Только когда масса объектов достигает или почти достигает планковского масштаба, сила тяготения становится существенной. А до тех пор

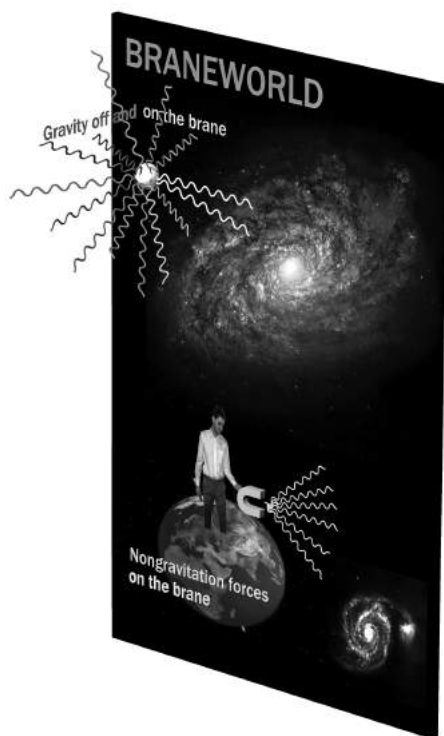


РИС. 64. Частицы и взаимодействия Стандартной модели могут быть заперты в мире браны, существующей в многомерном пространстве. В этом случае все вокруг — мои знакомые, вещество и известные нам звезды, взаимодействия, такие как электромагнетизм, наша Галактика и Вселенная — существует в привычных трех измерениях. Гравитация, с другой стороны, распространяется на все пространство. (Фото публикуется с разрешения Марти Розенберга.)

пока частицы намного легче и не подходят под масштаб, заданный массой Планка (как, собственно, и обстоит дело в нашем мире), сила тяготения остается чрезвычайно слабой.

Загадка, связанная со слабостью гравитационных сил, по существу эквивалентна проблеме иерархии — решение одной решает и другую. Но формулировка проблемы иерархии в терминах гравитации помогает думать о решениях, связанных с дополнительными измерениями. А нам пора познакомиться с парой наводящих вопросов.

ИЕРАРХИЯ И БОЛЬШИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

С того самого момента, когда человек впервые задумался над проблемой иерархии, физики были уверены, что решение этой проблемы должно быть связано с модифицированными взаимодействиями частиц на масштабе слабого взаимодействия, то есть на энергиях порядка 1 ТэВ. С учетом только частиц Стандартной модели квантовый вклад в массу частицы Хиггса попросту слишком велик. Должен найтись фактор, который вмещается и «укротит» большие квантово-механические поправки к массе хиггса.

Суперсимметрия и техницвет — два примера моделей, где в высокоэнергетических взаимодействиях могут участвовать новые тяжелые частицы, которые компенсируют ненужные добавки или вообще не дадут им возникнуть. До 1990-х гг. все предлагавшиеся решения проблемы иерархии попадали в одну и ту же категорию — моделей с новыми частицами и взаимодействиями и даже новыми симметриями, проявляющимися на масштабе энергий слабого взаимодействия.

В 1998 г. Нима Аркани-Хамед, Савас Димопулос и Гия Двали предложили альтернативный подход к проблеме. Они указали на то, что поскольку проблема касается не только масштаба слабого взаимодействия, но и его соотношения с масштабом Планка, связанным с гравитацией, то, может быть, все дело в некорректном понимании фундаментальной природы гравитации.

Они предположили, что на самом деле среди масс не существует никакой иерархии — по крайней мере по отношению к фундаментальному масштабу гравитации в сравнении со слабым масштабом. Может быть, в многомерной Вселенной сила тяготения сильна, а в нашем мире с количеством измерений «три-плюс-один» ее измерение дает такой слабый результат только потому, что она как бы «размазана» по всем измерениям. Их гипотеза состояла в том, что на самом деле в многомерной Вселенной гравитация становится сильной на масштабе масс слабого взаимодействия, а при измерениях мы получаем такие скромные результаты не потому, что гравитация фундаментально слаба, а потому лишь,

что она, помимо трех привычных измерений, распространяется на большие невидимые измерения.

Чтобы это понять, представьте себе поливальный шланг. Если вода разбрызгивается только в привычных измерениях, то эффект будет зависеть от количества воды в емкости и расстояния от разбрызгивателя до цели. Но если измерений на самом деле больше трех, то вода по выходу из шланга распределится на все эти измерения. Мы на заданном расстоянии от источника увидим намного меньше воды, потому что часть ее уйдет в другие измерения, видеть которые мы не можем (такая ситуация схематически изображена на рис. 65).

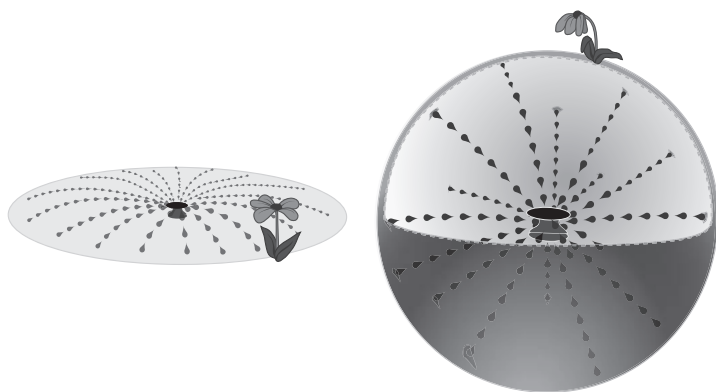


РИС. 65. В многомерном пространстве сила взаимодействия слабеет быстрее, чем в пространстве с меньшим числом измерений. Ситуация аналогична разбрызгиванию воды в многомерном разбрызгивателе, где вода расходится намного быстрее, чем в обычном трехмерном. Вода быстрее расходится по трем измерениям, чем по двум, — на рисунке воды хватает только тому цветку, который получает ее из двумерного, а не трехмерного разбрызгивателя

Если бы размеры дополнительных измерений были конечны, то вода достигла бы границ этих измерений и дальше никуда не пошла. Но количество воды, которую объект в любой конкретной точке многомерного пространства будет получать, окажется намного меньше того объема, которое он получил бы, если бы вода вообще не уходила бы в дополнительные измерения. Точно так же гравитация может «растекаться» по измерениям, хотя и не вся,

если измерения имеют конечные размеры. Большие измерения «разбавляют» силу тяготения, которую мы испытываем у себя, в трехмерном мире. Если эти измерения достаточно велики, сила тяготения у нас становится очень слабой, несмотря на то что фундаментальная сила тяготения в многомерном пространстве значительна. Не забывайте, однако, для того чтобы эта идея работала, дополнительные измерения должны быть просто громадными по сравнению с тем, что предсказывает нам теория, — ведь гравитация в трехмерном мире действительно очень слаба.

Тем не менее БАК экспериментально проверит и эту идею. Хотя сегодня они представляется невероятной, окончательный критерий истины для нас — практика, а вовсе не простота поиска и составления моделей. Если какая-то модель реально приложима к окружающему нас миру, она оставит в эксперименте свой характерный след. Поскольку многомерная гравитация в данной модели является сильной на масштабах энергий, примерно соответствующих слабому взаимодействию, то есть на энергиях, которые будут получены на БАКе, то частицы при столкновении должны будут породить многомерный гравитон — частицу, передающую многомерное гравитационное взаимодействие. Гравитон обязательно должен быть многомерным и передвигаться в многомерном пространстве, потому что сила тяготения, с которой мы имеем дело, чрезвычайно слаба и никак не позволит создать гравитон в трехмерном мире. А вот в сценарии с большими дополнительными измерениями гравитация в целом окажется достаточно сильна, чтобы породить гравитон на энергиях, характерных для БАКа.

Результатом будет появление частиц, известных как моды Калуцы — Клейна (КК) и представляющих собой проекцию многомерного гравитона на наше трехмерное пространство. Эти частицы названы в честь Теодора Калуцы и Оскара Клейна, первыми предположивших существование в нашей Вселенной дополнительных измерений. КК-частицы взаимодействуют аналогично известным нам частицам, но обладают большей массой. Эти массы возникают у них в результате дополнительного импульса в направлении дополнительных измерений. Если КК-мода связана с гравитоном, как предсказывает модель больших дополнительных измерений,

то, возникнув, она просто исчезнет из детектора. Свидетельством эфемерного визита такой частицы станет недостача энергии (на рис. 66 показано, как КК-частица рождается и уносит с собой энергию и импульс, которых так никто и не видел).

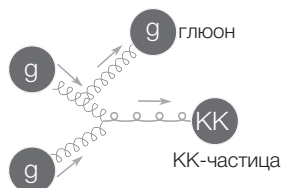


РИС. 66. В сценарии с большими дополнительными измерениями в коллайдере может возникнуть КК-партнер гравитона с импульсом в дополнительных измерениях. Если это произойдет, он, родившись, исчезнет из детектора, оставив след в виде недостачи энергии и импульса

Разумеется, недостача энергии — признак не только модели с большими дополнительными измерениями, но и суперсимметричных моделей. Сигналы могут оказаться настолько похожими, что приверженцы той и другой модели, скорее всего, попытаются интерпретировать экспериментальные данные каждый в свою пользу — по крайней мере вначале. Но точное понимание следствий и предсказаний обоих типов моделей поможет нам определить, которая из них верна. Мы ведь помним, что одна из основных целей создания моделей — последующее сравнение экспериментальных сигнатур и подробностей с их теоретическими следствиями. Обозначив различные сценарии, мы получаем теоретическую частоту появления и характерные черты сигнатур, которые модель должна давать, и можем затем сравнивать их с экспериментальными данными во всех подробностях.

В настоящий момент я, как и большинство моих коллег, сомневаюсь в том, что сценарий с большими дополнительными измерениями в самом деле является решением проблемы иерархии, хотя вскоре мы увидим совершенно другой пример модели с дополнительными измерениями, который представляется гораздо более многообещающим.

Мы не ждем, что дополнительные измерения окажутся настолько большими. Дело в том, что в изложенном сценарии допол-

нительные измерения должны быть просто огромными по сравнению с другими масштабами. Даже если при этом удалось бы решить проблему иерархии между слабым и гравитационным масштабами, возникла бы новая иерархия, связанная с размерами новых измерений.

Еще более тревожно то, что в этом сценарии эволюция Вселенной должна была бы выглядеть совершенно иначе, чем то, что мы наблюдаем вокруг. Ведь дополнительные очень большие измерения должны расширяться вместе с остальной Вселенной до тех пор, пока температура в них не опустится до очень низкого уровня. А чтобы модель хотя бы приближалась к истинной, предсказываемая ею эволюция Вселенной должна соответствовать той, что мы наблюдаем в трехмерном пространстве. Это сложная проблема для любого сценария с большими дополнительными измерениями.

Тем не менее полностью исключить эту идею нельзя. В принципе, при достаточной изобретательности авторы моделей смогут обойти или решить большинство из них. Но модели при этом, как правило, становятся переусложненными и запутанными, и большинство физиков выступает против них. Отчасти поэтому многие из них обратились к более многообещающим вариантам дополнительных измерений, таким, к примеру, как описанный в следующем разделе. Тем не менее только эксперимент может сказать наверняка, соответствуют ли модели с большими дополнительными измерениями действительности.

СВЕРНУТОЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Большие дополнительные измерения — не единственное потенциально возможное решение проблемы иерархии, даже в контексте многомерной Вселенной. Уже после того как идея дополнительных измерений перестала восприниматься в научном мире как нелепая и невозможная, мы с Раманом Сандрамом придумали, как нам кажется, вариант получше; большинство физиков согласны, что он с гораздо большей вероятностью может оказаться верным. Имейте в виду, сказанное вовсе не означает, что боль-



РИС. 67. Структура Рэндалл — Сандрама включает в себя две браны, связывающие четвертое пространственное измерение (пятое измерение пространства-времени). В этом пространстве волновая функция гравитона (вероятность обнаружить гравитон в любой заданной точке пространства) экспоненциально падает от гравитационной браны к бране слабого взаимодействия

шинство физиков поддерживает новую идею. Многие считают, что без новых экспериментальных данных точно предсказать результаты работы БАКа или получить совершенно правильную модель можно лишь по счастливой случайности. Но наша идея, вероятно, имеет не самые плохие шансы оказаться верной; главное же, она, как большинство хороших моделей, представляет четкую поисковую стратегию, при помощи которой ученые смогут более полно использовать все возможности БАКа и, может быть, даже обнаружить доказательства того, что предложенная модель верна.

Решение, которое предложили мы с Раманом, предусматривает одно-единственное дополнительное измерение, притом не обязательно большое. И — в противоположность сценариям с большими дополнительными измерениями — эволюция Вселенной автоматически согласуется с современными космологическими наблюдениями.

Мы сосредоточили внимание на одном новом измерении, но их может быть и больше — вот только в нашем сценарии они не будут играть существенной или хотя бы различимой роли в объяснении свойств частиц. Поэтому мы можем вполне оправданно игнорировать их при исследовании проблемы иерархии — в полном соответствии с концепцией эффективной теории — и сосредоточиться на выводах, которые можно сделать исходя из существования одного дополнительного измерения.

Если наша с Раманом идея верна, то БАК вскоре расскажет нам о природе пространства много интересного. Оказывается, предложенная нами Вселенная сильно искривлена в соответствии с учением Эйнштейна о том, как ведет себя пространство-время в присутствии вещества и энергии. Говоря технически, геометрия, выведенная нами из уравнений Эйнштейна, свернута (этот термин использовался в геометрии и раньше). Это означает, что пространство и время изменяются вдоль единственного дополнительного измерения, представляющего интерес. Все происходит таким образом, что пространство и время, а также масса и энергия при переходе из одной точки многомерного пространства в другую масштабируются, как показано на рис. 68.

Одно из важных следствий такой геометрии свернутого пространства заключается в том, что частица Хиггса, будучи тяжелой в какой-то другой точке многомерного пространства, имеет в том месте, где мы живем, массу, соответствующую слабому взаимодействию, как, собственно, и должно быть. Такое заявление кажется несколько произвольным, но на самом деле никакого произвола нет. Согласно нашему сценарию существует брана, на которой мы живем — брана слабого взаимодействия, — и вторая брана, где сосредоточена гравитация, — брана гравитации, или брана Планка, как между собой называют ее физики. На этой бране должна

располагаться другая вселенная, отделенная от нашей дополнительным измерением (рис. 67). При этом вторая брана должна располагаться где-то совсем рядом — на бесконечно малом расстоянии, в 10^{30} раз меньше сантиметра.

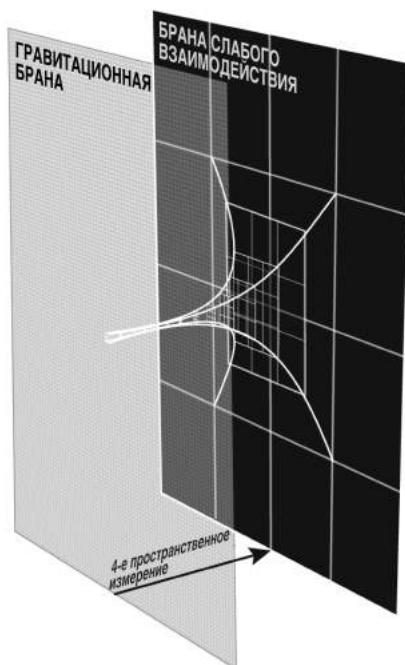


РИС. 68. Еще один способ понять, почему свернутая геометрия решает проблему иерархии, заключается в понятиях самой геометрии. При переходе от одной браны к другой пространство, время, энергия и масса экспоненциально меняются. В этом сценарии было бы очень логично обнаружить, что масса Хиггса экспоненциально меньше массы Планка

Свернутая геометрия имеет одно замечательное свойство (проиллюстрированное на рис. 67); заключается оно в том, что *гравитон* — частица, переносящая гравитационное взаимодействие, — намного тяжелее на второй бране, чем на нашей. Это делает гравитационное взаимодействие сильным в другом измерении, но очень слабым в том мире, где мы живем. Более того, Раман и я обнаружи-

ли, что гравитация в нашем мире должна быть экспоненциально слабее, чем на другой бране; таким образом, мы получаем естественное объяснение слабости гравитации в нашем мире.

Иначе следствия такой организации Вселенной можно интерпретировать через геометрию пространства-времени, схематически изображенную на рис. 68. Масштаб пространства-времени зависит от расположения браны на четвертой пространственной оси. Массы также претерпевают экспоненциальное масштабирование, причем таким образом, чтобы бозон Хиггса получился таким, как нужно. Можно, конечно, спорить о допущениях, на которых основана наша модель, но сама геометрия непосредственно следует из теории гравитации Эйнштейна, если постулировать, какую энергию имеют браны и какую — само многомерное пространство. Мы с Раманом нашли решение соответствующих уравнений общей теории относительности и, сделав это, получили уже описанную мной геометрию: а именно искривленное свернутое пространство, в котором массы масштабируются таким образом, что проблема иерархии решается автоматически.

В отличие от моделей с большими дополнительными измерениями, модели, основанные на геометрии свернутого пространства, не заменяют прежнюю загадку (проблему иерархии) новой (почему дополнительные измерения настолько велики?). В свернутой геометрии дополнительные измерения вовсе не велики, а большие числа возникают в результате экспоненциального масштабирования пространства и времени. Экспоненциальное масштабирование делает отношение размеров — и масс — объектов громадным даже в тех случаях, когда эти объекты очень близки друг к другу в многомерном пространстве.

Экспоненциальная функция не придумана нами. Она возникает из уникального решения уравнений Эйнштейна в предложенном нами сценарии. Мы с Раманом вычислили, что в свернутой геометрии отношение сил гравитационного и слабого взаимодействий экспоненциально зависит от расстояния между двумя бранами. Если промежуток между ними измеряется разумной величиной — что-нибудь вроде нескольких десятков единиц в терминах гравитационной шкалы, — то верное иерархическое соотношение

между массами и силами взаимодействий возникает вполне естественно.

В свернутой геометрии гравитация в нашем мире слаба не потому, что «растекается» по большим дополнительным измерениям, а потому, что сконцентрирована в другом месте: на другой бране. Наша гравитация — всего лишь «хвост» того, что в других регионах многомерного мира проявляется как очень интенсивное взаимодействие.

Мы не видим другой вселенной, потому что наши браны объединяет лишь сила гравитационного взаимодействия, а гравитация здесь слишком слаба, чтобы передавать легко наблюдаемые сигналы. Вообще говоря, этот сценарий можно рассматривать как единственный пример мультивселенной, в которой содержимое и элементы нашего мира взаимодействуют очень слабо — а иногда и совсем не взаимодействуют — с содержимым другого мира. Большинство подобных построений проверить невозможно. В конце концов, если какое-то вещество находится так далеко, что его свет не достигнет нас даже за все время жизни Вселенной, мы никак не сможем убедиться в его существовании. Предложенный нами сценарий мультивселенной необычен тем, что общее для двух миров гравитационное взаимодействие имеет экспериментально проверяемые следствия. Мы не рассчитываем непосредственно добраться до второй вселенной, но частицы, путешествующие в многомерном пространстве, могут попасть и в наш мир.

Самым очевидным следствием многомерности мира при отсутствии детальных исследований — таких, какие будут проводиться на БАКе, — является объяснение иерархии масштабов масс, в котором нуждается любая теория физики элементарных частиц, чтобы успешно описывать наблюдаемые явления.

Мы надеемся, что высокие энергии, которые планируется получить на БАКе, помогут нам понять, что представляет собой дополнительное пространственное измерение — всего лишь причудливую идею или реальный факт бытия Вселенной. Если наша теория верна, то следует ожидать, что на БАКе будут получены моды Калуцы — Клейна. Из-за связи с проблемой иерархии масштаб энергий, на котором при таком сценарии следует искать

КК-моды, примерно соответствует тому масштабу, который будет исследоваться на БАКе в рабочем режиме. Считается, что КК-моды в этом случае должны обладать массой порядка 1 ТэВ, то есть масштаба слабого взаимодействия. Эти тяжелые частицы, возможно, возникнут, как только на БАКе будут достигнуты достаточно высокие энергии. Обнаружение КК-частиц послужило бы ключевым доказательством нашей идеи и позволило бы заглянуть в огромный непознанный мир.

Заметим, что КК-моды свернутой геометрии обладают важной отличительной чертой. Если сам гравитон взаимодействует с окружающим необычайно слабо — в конце концов, он передает чрезвычайно слабое гравитационное взаимодействие, — то КК-моды гравитона взаимодействуют гораздо активнее и сильнее, почти на уровне так называемого слабого взаимодействия, которое в триллионы раз сильнее гравитации.

Причина того, что КК-гравитоны взаимодействуют с такой удивительной силой, заключается в особенностях свернутой геометрии, по которой они путешествуют. Из-за сильной искривленности пространства-времени взаимодействия КК-гравитонов намного сильнее, чем взаимодействия самого гравитона, переносящего то самое гравитационное взаимодействие, которое мы испытываем. В свернутой геометрии масштабируются не только массы, но и гравитационные взаимодействия. Расчеты показывают, что в свернутой геометрии взаимодействия КК-гравитонов сравнимы по силе с взаимодействием частиц масштаба слабого взаимодействия.

Это означает, что, в отличие от суперсимметричных моделей, а также маловероятных моделей с большими дополнительными измерениями, для экспериментального доказательства этого сценария не придется искать и измерять недостающую энергию на месте интересных частиц, сумевших ускользнуть незамеченными. Вместо этого у нас будут гораздо более четкие и простые для распознавания сигнатуры в виде частиц, которые внутри детектора будут распадаться на частицы Стандартной модели, оставляющие видимые следы (см. пример на рис. 69, где КК-частица рождается и распадается на электрон и позитрон).

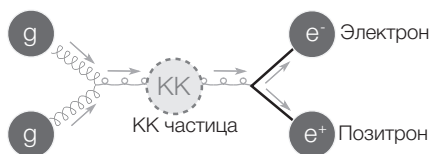


РИС. 69. В моделях Рэндалл — Сандрама КК-гравитон может родиться и распасться внутри детектора на видимые и легко обнаружимые частицы, такие как электрон и позитрон

Именно так, кстати говоря, открывались все новые тяжелые частицы. Непосредственно они не видны, но можно наблюдать те частицы, на которые они распадаются. Такие наблюдения принципиально дают намного больше информации, чем можно получить путем измерения недостающей энергии. Путем изучения свойств продуктов распада экспериментаторы могут многое узнать и о свойствах первоначальной частицы.

Если сценарий со свернутой геометрией соответствует действительности, мы скоро увидим пары частиц, рождающихся при распаде КК-мод гравитона. Измерив энергии, заряды и другие свойства частиц конечного состояния, экспериментаторы смогут определить по ним массу и другие свойства КК-частиц. Эти идентифицирующие признаки наряду с относительными частотами распада в разные конечные состояния должны помочь экспериментаторам определить, открыли ли они в самом деле КК-гравитон или какую-нибудь иную новую экзотическую сущность. Модель говорит нам о природе частицы, которую предстоит обнаружить, если эта модель верна, и предсказания, сформулированные на основе этих данных, должны помочь физикам различить возможные варианты.

Один мой друг-сценарист никак не может взять в толк, почему я, зная о потенциальных последствиях возможных в ближайшее время открытий, не сгораю от нетерпения в ожидании новых экспериментальных данных. При каждой нашей встрече он настойчиво спрашивает: «Ну, разве результаты этих исследований не изменят нашу жизнь? Они ведь могут подтвердить ваши теории? Почему вы не в Женеве и не общаетесь постоянно с тамошними исследователями?»

Конечно, в чем-то он прав. Но экспериментаторы уже знают, что нужно искать и на что обращать внимание, так что бóльшая часть теоретической работы уже проделана. Когда у нас появляются новые идеи о том, что можно поискать, мы, естественно, с ними связываемся. Для этого нам не обязательно лететь в Европейский центр ядерных исследований и общаться лично. Да и ученых можно найти где угодно — как на территории США, так и почти в любом уголке мира. Телекоммуникации сегодня очень развиты и прекрасно работают, отчасти благодаря тому открытию, которое много лет назад в том же CERN привело Тима Бернерса-Ли к созданию Интернета.

Кроме того, я знаю слишком много о том, какие серьезные препятствия могут возникнуть перед учеными в таком поиске, даже после того как БАК будет выведен на рабочий режим. Поэтому я понимаю, что результатов, возможно, придется какое-то время подождать. К счастью для нас, только что описанные КК-моды оставляют за собой одну из самых понятных и очевидных сигнатур, так что искать их одно удовольствие. КК-гравитоны распадаются на любые частицы — в конце концов, каждая частица испытывает на себе силу тяготения, — поэтому экспериментаторы могут сосредоточиться на тех конечных состояниях, которые легче всего распознать.

Однако следует отметить две причины, по которым поиск может оказаться более сложным, чем предполагалось первоначально, и по которым нам, возможно, придется подождать результатов, даже если идея сама по себе верна.

Один из этих моментов заключается в том, что другие перспективные модели свернутой геометрии, возможно, дают менее четкие экспериментальные сигнатуры, обнаружить которые намного труднее. Эти модели описывают структуры, лежащие в основе наблюдаемых событий: в данном случае структура включает в себя дополнительные измерения и браны. Они также предлагают конкретное приложение общих принципов, воплощенных в этой структуре. Наш первоначальный сценарий предполагал, что по многомерному пространству распространяется только гравитация. Однако позже некоторые из нас разработали на основе

первой модели новые сценарии. В этих альтернативных сценариях не все частицы находятся на бранах, а это означает существование дополнительных КК-частиц — ведь каждая частица многомерного пространства должна иметь свои КК-моды. Оказывается также, что обнаружить другие КК-частицы намного сложнее. Возникшая проблема стала стимулом для новых активных исследований; ученые искали способы увидеть и распознать эти не столь явные сценарии. Наши теоретические исследования будут полезны для поиска не только КК-частиц, но и любых других энергичных массивных частиц, которые, возможно, будут фигурировать в каких-то новых моделях.

Другая причина, по которой поиск КК-частиц может оказаться затруднен, состоит в том, что сами КК-частицы могут оказаться тяжелее, чем мы надеемся. Нам известен примерный диапазон масс для этих частиц, но точных значений мы пока не знаем. Если КК-частицы легкие, то на БАКе мы без труда получим их в изобилии и обнаружить их будет несложно. Но если эти частицы тяжелее, чем нам кажется, то БАК произведет их совсем немного. А если они окажутся еще тяжелее, то не исключено, что на БАКе их вообще нельзя будет получить. Иными словами, для получения новых частиц и новых взаимодействий понадобятся более высокие энергии, чем те, которые мы сможем получить. В случае БАКа с его фиксированной длиной туннеля и ограниченным энергетическим диапазоном это всегда было поводом для беспокойства.

Я как теоретик мало что могу по этому поводу сделать. Энергия БАКа такова, какова она есть. Но мы можем попытаться «поймать» легкие признаки существования дополнительных измерений, даже если КК-моды окажутся слишком тяжелыми. Когда мы с Патриком Мидом проводили расчеты вероятности рождения многомерных черных дыр, мы обращали внимание не только на отрицательный общий результат — гораздо более низкую частоту рождения черных дыр, чем утверждалось первоначально. Мы думали и о том, что произойдет, если гравитация в многомерном пространстве сильна, но никаких черных дыр не возникнет. Мы задались вопросом, можно ли на БАКе получить хоть какие-то интересные признаки многомерной гравитации, и обнаружили, что даже без но-

вых частиц и экзотических объектов, таких как черные дыры, экспериментаторы, по идее, должны получить заметные отклонения от предсказаний Стандартной модели. Открытие, конечно, не гарантируется, но экспериментаторы постараются выжать все, что можно, из существующей установки и детекторов. Другие теоретики в более продвинутых исследованиях придумали и предложили усовершенствованные методики поиска КК-мод, рассчитанные в том числе и на тот случай, если частицы Стандартной модели обитают в многомерном пространстве.

Существует также вероятность, что нам повезет и масштаб масс новых частиц и взаимодействий окажется меньше, чем мы предполагаем. Если это так, то мы не только обнаружим КК-моды раньше, чем ожидалось, но и сможем наблюдать другие новые явления. Если теория струн представляет собой фундаментальную теорию природы, а масштаб новой физики не слишком велик, то БАК сможет даже произвести — в дополнение к КК-частицам и новым взаимодействиям — дополнительные частицы, связанные с колебаниями базовых струн. При более традиционных предположениях эти частицы были бы слишком тяжелыми. Но свернутая геометрия дает надежду на то, что некоторые моды струн окажутся легче, чем предполагалось, и смогут появиться при слабых взаимодействиях.

Ясно, что у свернутой геометрии немало интересных возможностей, и мы с нетерпением ожидаем появления экспериментальных результатов. Следствия такой геометрии, если они будут обнаружены, изменят наши представления о природе Вселенной. Но мы сможем узнать о том, которая из этих возможностей верна (если таковая имеется), лишь после того как БАК сделает свое дело.

КРАТКИЙ ИТОГ

Проводимые в настоящее время на БАКе эксперименты проверяют все идеи, изложенные в этой главе. Мы надеемся, что если хотя бы какая-то из этих моделей верна, то признаки этого вскоре появятся. Может быть, появятся прямые доказательства, такие

как КК-моды, а может быть, будут отмечены лишь небольшие отклонения от процессов Стандартной модели. Так или иначе, и теоретики, и экспериментаторы сейчас настороже и ждут. Всякий раз, когда на БАКе фиксируется (или не фиксируется) какое-либо явление, диапазон возможностей сужается. И если нам повезет, одна из предложенных гипотез может оказаться верной. Узнавая больше о том, что происходит на БАКе и как работают детекторы, мы, можно надеяться, узнаем больше и о том, как расширить возможности коллайдера. По мере появления экспериментальных данных теоретики попытаются интерпретировать их в свете имеющихся гипотез.

Мы не знаем, сколько придется ждать, прежде чем мы начнем получать ответы; это естественно, потому что мы не знаем в точности, какими могут оказаться массы и взаимодействия. Кое-какие открытия могут быть сделаны уже в ближайшие год-два. Других, возможно, придется ждать лет десять. Для некоторых, вполне возможно, потребуются более высокие энергии, чем когда-либо будут получены на БАКе. Ждать, конечно, тяжело и тревожно, но результаты, скорее всего, будут потрясающими и оправдают все усилия. Не исключено, что они трансформируют наши представления о фундаментальной природе реальности — или хотя бы о природе вещества, из которого все мы состоим. Когда результаты будут получены, перед нами, возможно, откроются новые миры. Не исключено, что уже при нашей жизни взгляд человечества на Вселенную сильно изменится.

СНИЗУ ВВЕРХ ИЛИ СВЕРХУ ВНИЗ?

Ничто не заменит ученым реальных экспериментальных результатов. Мы, физики, не сидели сложа руки последние 25 лет в ожидании пуска БАКа и появления надежных данных. Мы тщательнейшим образом обдумывали, что именно следует искать в экспериментах и что должны означать те или иные результаты. Мы также изучали данные экспериментов, проводившихся в этот период, и сумели узнать немало интересных подробностей об известных частицах и взаимодействиях, что помогало определиться с направлением основных исследований.

Этот период дал нам прекрасную возможность углубленно поразмышлять о вещах, не связанных напрямую с экспериментом. Самые интересные и смелые модели и теоретические прогнозы этого периода стали следствием углубленных математических исследований. Сомневаюсь, что мне, к примеру, пришло бы в голову заняться дополнительными измерениями или чисто математическими аспектами суперсимметрии, если бы экспериментальных данных было достаточно. Даже если бы измерения показали, что эти идеи верны, то без предварительной очень серьезной математической работы в их следствиях пришлось бы разбираться довольно долго.

И эксперименты, и математика способствуют развитию науки. Но дорога прогресса редко бывает простой и понятной, и физики по-разному смотрят на то, какая стратегия исследований является наилучшей. Авторы моделей используют подход «снизу вверх»,

представленный в главе 15; они начинают с известных фактов (выясненных в ходе экспериментов), а затем обращаются к оставшимся загадкам и особенностям, не нашедшим объяснения. При этом они часто и активно используют теоретические математические построения. В предыдущей главе мы познакомились с некоторыми примерами моделей и поговорили о том, как характер модели влияет на поиск, который будут проводить на БАКе экспериментаторы.

Другие, в особенности специалисты по теории струн, применяют подход «сверху вниз»: они начинают с теории, которую считают верной, — в данном случае с теории струн — и пытаются при помощи заложенных в нее принципов сформулировать непротиворечивую квантовую теорию гравитации. Теории, основанные на таком подходе, определены на высоких энергиях и малых расстояниях, и само название подхода является отсылкой к теоретическому утверждению о том, что все можно вывести из фундаментальных принципов, определенных на масштабе высоких энергий. Конечно, с названием можно запутаться — ведь высокие энергии соответствуют малым расстояниям, — но не стоит забывать, что объекты, действующие на малых расстояниях, представляют собой фундаментальный строительный материал любого вещества. При таком подходе все можно вывести из базовых принципов и фундаментальных факторов, которые определяются на малых расстояниях и высоких энергиях, — отсюда и название «сверху вниз».

В этой главе мы поговорим о подходах «снизу вверх» и «сверху вниз» и о том, чем они отличаются друг от друга. Мы попробуем разобраться в их различиях, но подумаем и о том, как они иногда сливаются, рождая замечательные идеи.

ТЕОРИЯ СТРУН

В отличие от авторов моделей, физики-теоретики с большей склонностью к математике пытаются работать, отталкиваясь от чистой теории. Каждый из нас надеется начать с единственной элегантной теории; лишь разобрав по косточкам все ее последствия, сле-

дует попытаться применить полученные закономерности к экспериментальным данным. Почти любая попытка создания единой теории воплощает в себе такой подход, и теория струн здесь не исключение; это, возможно, самый показательный пример. Это попытка при помощи чисто теоретических рассуждений вывести наиболее фундаментальные принципы, из которых в принципе следуют все известные физические явления.

Специалисты по теории струн делают громадный скачок, перепрыгивая по физической шкале сразу от масштаба слабого взаимодействия к планковскому масштабу, при котором гравитация становится сильной. Маловероятно, что в обозримом будущем эти идеи удастся непосредственно проверить в эксперименте (хотя многомерные модели, описанные в предыдущей главе, могут стать приятным исключением). Но, несмотря на то что саму теорию струн проверить очень сложно, ее элементы порождают в умах теоретиков мысли и концепции, которые вполне могут войти в потенциально наблюдаемые модели.

Выбирая между теорией струн и строительством моделей, физики, по существу, задаются философским вопросом и выбирают между подходом Платона, который пытался проникнуть в суть вещей, опираясь на фундаментальные истины, и Аристотеля, исходившего из эмпирических наблюдений. Какой подход выбрать — «сверху вниз» или «снизу вверх»? Этот выбор можно сформулировать и иначе. Кто лучше — молодой Эйнштейн или старый? Первоначально Эйнштейн проводил мысленные эксперименты, основанные на реальных физических ситуациях. Тем не менее он также ценил красоту и элегантность. Даже когда экспериментальные результаты противоречили его мыслям о специальной теории относительности, он уверенно (и, как выяснилось в конце концов, верно) решал, что эксперимент ошибается, потому что его следствия были бы слишком некрасивыми и доверия не вызывали.

Эйнштейн стал склоняться к математическому подходу после того, как математика помогла ему завершить общую теорию относительности. Поскольку математические построения оказались необходимы для завершения его теории, позже Эйнштейн стал относиться к теоретическим методам с большим доверием. Одна-

ко пример Эйнштейна не позволяет сделать однозначный выбор: ведь, несмотря на успешное применение математики при создании общей теории относительности, более поздние математические поиски единой теории поля успехом не завершились.

Теория великого объединения, предложенная Говардом Джорджи и Шелдоном Глэшоу, также была основана на подходе «сверху вниз». Вообще, подобные теории, как правило, базируются на реальных данных — при их создании авторы опираются на конкретный набор частиц и взаимодействий, существующих в Стандартной модели, а также на силу взаимодействий. Но при этом теория экстраполирует происходящее от того, что нам достоверно известно, до того, что, возможно, происходит на очень отдаленных от нас масштабах энергий.

Интересно, что хотя Великое объединение взаимодействий должно произойти на значительно более высоких энергиях, чем те, что могут быть достигнуты в ускорителях частиц, даже первоначальная модель теории позволяла прогнозировать потенциально наблюдаемые события. Так, модель теории Великого объединения Джорджи — Глэшоу предсказывала, что протон должен распадаться. Распад протона — редкое событие, но экспериментаторы проанализировали гигантский объем информации с надеждой найти видимый след хотя бы одного протонного распада. Когда этого не произошло, первоначальная теория Великого объединения была отвергнута.

С тех пор ни Джорджи, ни Глэшоу не работали над теориями, построенными «сверху вниз» и позволяющими сделать громадный скачок от энергий, которые мы можем непосредственно наблюдать в ускорителях, к энергиям, настолько от нас далеким, что происходящее там может давать лишь очень слабые экспериментально наблюдаемые следствия или, что еще вероятнее, не давать вообще никаких. Эти ученые решили, что шансы угадать принципы, действующие на много порядков дальше, чем все наблюдаемые в нашем мире явления, что мы непосредственно наблюдаем, просто ничтожны.

Несмотря на скепсис Джорджи и Глэшоу, многие физики решили, что разбираться с некоторыми сложными теоретическими вопросами можно только на основании подхода «сверху вниз». Специалисты по теории струн выбрали для себя область деятельности, которая не является в строгом смысле наукой, но уже породила множество ин-

интереснейших, хотя и противоречивых идей. Эти люди в какой-то степени разобрались в своей теории, но по большей части до сих пор заняты складыванием головоломки — ищут ключевые фундаментальные принципы и одновременно развивают свои радикальные идеи.

Рассматривать теорию струн как теорию гравитации их представляют не конкретные экспериментальные данные, а теоретические загадки. Теория струн предлагает естественного кандидата на роль гравитона; в то же время квантовая механика говорит нам, что такая частица должна существовать и передавать гравитационное взаимодействие. В настоящее время эта теория — ведущий кандидат на роль полностью непротиворечивой теории квантовой гравитации — теории, в которую должны войти и квантовая механика, и общая теория относительности Эйнштейна и которая должна работать на всех представимых энергетических масштабах.

Физики могут использовать известные теории для надежного прогнозирования на малых расстояниях: к примеру, внутри атома, где квантовая механика играет огромную роль, а сила тяготения пренебрежимо мала. Поскольку гравитация почти не оказывает действия на частицы атомного масштаба масс, мы вполне можем учитывать только квантовую механику, а тяготение со спокойной совестью игнорировать. Кроме того, физики могут уверенно прогнозировать явления на больших расстояниях: к примеру, в пределах размеров галактик, где гравитация играет решающую роль, а квантовой механикой можно спокойно пренебречь*.

Однако у нас нет теории, которая включала бы одновременно и квантовую механику, и гравитацию и работала бы на всех возможных энергиях и расстояниях. В частности, мы не знаем, как проводить расчеты на по-настоящему громадных энергиях и чрезвычайно малых расстояниях, сравнимых с энергией или длиной Планка. Поскольку на более тяжелые и энергичные частицы гравитация влияет сильнее, для частиц с массой порядка массы Планка она будет играть существенную роль. А на крохот-

* Забавно тем не менее, что применение принципа Паули для галактической темной материи из фермионов дает модельно-независимое ограничение снизу на массу частицы темной материи (фермион должен быть тяжелее, чем примерно 1 кэВ). — *Прим. науч. консульт.*

ной планковской длине будет очень заметно влияние квантовой механики.

Эта проблема ни в коем случае не снижает ценности вычислений, проведенных для наблюдаемых явлений — по крайней мере для любых явлений в БАКе, — но она означает, что теоретическая физика на данный момент неполна. Физики пока не знают, как непротиворечиво включить квантовую механику и гравитацию на чрезвычайно высоких энергиях и малых расстояниях, где влияние обоих взаимодействий примерно одинаково важно для прогнозов и ни одним из них нельзя пренебречь. Этот важный пробел в наших знаниях о мире потенциально способен указать нам путь вперед. Многие считают, что теория струн может быть решением проблемы.

Название «теория струн» происходит от фундаментальных осциллирующих струн, лежавших в основе первоначальной формулировки теории. Частицы в теории струн существуют, но возникают в результате колебаний струны. Различные частицы соответствуют различным колебаниям — примерно так же, как вибрации одной и той же скрипичной струны могут рождают разные ноты. В принципе, экспериментальным доказательством теории струн должно стать обнаружение новых частиц, соответствующих многочисленным дополнительным модам вибрации струны.

Однако в большинстве своем такие частицы, скорее всего, окажутся слишком тяжелыми, чтобы мы когда-нибудь смогли их непосредственно наблюдать; именно поэтому так трудно экспериментально проверить, действительно ли теория струн верно описывает природу. Уравнения теории струн описывают объекты настолько невероятно крохотные и обладающие при этом такой невероятно высокой энергией, что никакой детектор, который мы в состоянии себе хотя бы вообразить, не способен их зарегистрировать. Теория определена на масштабе энергий, которые примерно в десять миллионов миллиардов раз превосходят все, что мы можем экспериментально исследовать при современном уровне техники. А ведь в настоящее время мы не знаем даже, что произойдет при увеличении энергии столкновения частиц в коллайдере всего на один порядок — в 10 раз.

Специалисты по теории струн не могут точно предсказать, что происходит на экспериментально достижимом диапазоне энергий, потому что содержимое и другие свойства частиц в теории струн зависят от пока не установленной конфигурации фундаментальных составляющих. Следствия теории струн в природе зависят от того, как организованы элементы. В современной формулировке теория струн содержит больше частиц, взаимодействий и измерений, чем мы наблюдаем в окружающем нас мире. Что же тогда отличает видимые частицы, взаимодействия и измерения от невидимых?

Пространство в теории струн — это не обязательно то трехмерное пространство, которое мы видим вокруг себя. Вместо этого формулы теории струн описывают шесть или семь дополнительных пространственных измерений. Работоспособная версия теории струн должна объяснять, чем невидимые дополнительные измерения отличаются от трех известных нам. Как бы интересна и замечательна ни была теория струн, ее загадочные особенности, такие как несколько дополнительных измерений, затрудняют ее привязку к реальной действительности и видимой Вселенной.

Чтобы перейти от высоких энергий, для которых определена теория струн, к прогнозам в измеримых диапазонах энергий, необходимо выяснить, как будет выглядеть оригинальная теория без самых тяжелых частиц. Существует немало возможных проявлений теории струн в достижимом диапазоне энергий, но мы пока не знаем, как различить между собой громадное число возможных вариантов или хотя бы выделить среди них вариант, похожий на наш мир. Проблема в том, что мы пока недостаточно хорошо понимаем теорию струн, чтобы предсказать ее следствия в видимом диапазоне энергий. Сложность теории мешает нам делать точные прогнозы. Мало того, что она ставит перед нами сложнейшие математические задачи; иногда вообще не ясно, как правильно организовать ингредиенты теории струн и определить, какую именно математическую задачу следует решать.

Помимо всего прочего, мы теперь знаем, что теория струн гораздо сложнее, чем первоначально считалось, и включает в себя множество других ингредиентов с разными размерностями —

бран. Название «теория струн» продолжает использоваться, но физики говорят также об М-теории, хотя никто достоверно не знает, что в этом названии означает буква М.

Теория струн — величественное сооружение, которое уже помогло нам открыть для себя новые глубины математики и физики, и она вполне может содержать в себе кусочки верного фундаментального описания природы. К несчастью, громадная теоретическая пропасть отделяет эту теорию в ее современном виде от возможности прогнозировать на ее основе явления нашего мира.

В конечном итоге, если теория струн верна, то все модели, описывающие явления реального мира, должны выводиться из ее фундаментальных принципов. Но нынешняя формулировка этой теории абстрактна, а ее связь с наблюдаемыми явлениями очень слаба. Нам очень повезет, если удастся найти верные физические принципы, с учетом которых теоретические предсказания теории струн будут соответствовать нашему миру. Это, разумеется, конечная цель теории струн, но задача эта невероятно сложна.

Хотя элегантность и простота могут быть отличительными чертами верной теории, по-настоящему судить о ее красоте мы можем лишь тогда, когда достигнем достаточно полного понимания принципов ее работы. Выяснение того, как и почему природа прячет дополнительные измерения теории струн, стало бы поразительным достижением. Физики очень хотят понять, как это происходит.

ЛАНДШАФТ

Как я пошутила в книге «Закрученные пассажи», большинство попыток приблизить теорию струн к реальности явственно отдает пластической хирургией. Чтобы согласовать теорию струн с реалиями нашего мира, теоретикам приходится прятать то, чего здесь быть не должно, удалять частицы и скромно убирать с глаз долой лишние измерения. Но, несмотря на то что получившийся в результате комплект частиц иногда поразительно похож на правильный, всегда можно разглядеть, что похож-то он похож, да не совсем.

В последнее время попытки приблизить теорию струн к реальности чем-то напоминают кастинг актеров. Ну и что, что большинство явившихся на прослушивание девиц играть не умеет, а у некоторых лица не выражают никаких эмоций. Если как следует поработать и устроить достаточно прослушиваний, в конце концов вполне может появиться красивая, талантливая и очень перспективная актриса.

Точно так же некоторые идеи теории струн основаны на том, что наша Вселенная представляет собой редкое, но идеальное сочетание всех составных частей. Даже если теория струн сумеет в конце концов объединить все известные взаимодействия и частицы, может оказаться, что в ней присутствует единственный стабильный бассейн, представляющий конкретный набор частиц, сил и взаимодействий, или, что вероятнее, более сложный ландшафт с множеством возможных холмов и долин и соответственно множеством разнообразных следствий.

Судя по недавним исследованиям, теория струн может проявлять себя во множестве возможных вселенных — в сценарии, соответствующем варианту *мультивселенной*. Разные вселенные могут находиться так далеко друг от друга, что никогда не взаимодействуют — даже через силу тяготения — за все время своего существования. В этом случае каждая из вселенных может развиваться по собственному пути, а мы окажемся лишь в одной из них.

Если бы такие вселенные существовали, а способов заселить их у нас не было, то мы с полным основанием могли бы игнорировать все вселенные, кроме собственной. Но космологическая эволюция по крайней мере обеспечивает способы создания их всех. А разные вселенные могут обладать существенно разными свойствами; в них все может быть разным: вещество, типы взаимодействий, энергия.

Некоторые физики используют идею ландшафта вкупе с *антропным принципом*, чтобы попытаться обойти один из особенно неприятных вопросов теории струн и физики элементарных частиц. Суть антропного принципа заключается в том, что поскольку мы обитаем во Вселенной, допускающей существование галактик и жизни, то определенные параметры должны прини-

мать (по крайней мере, примерно) именно те величины, которые они и имеют в реальности, в противном случае задаваться этими вопросами было бы просто некому. К примеру, наша Вселенная не могла обладать такой высокой энергией, чтобы расширяться с большей скоростью — так, чтобы вещество не успело сконденсироваться в различные космические объекты.

В таком случае нам нужно определить, какие физические особенности, если таковые имеются, выделяют одно-единственное сочетание частиц, сил и энергий (а именно наше) из всех возможных. Мы ведь даже не знаем, какие свойства должны быть предсказуемыми, а какие попросту необходимы для того, чтобы мы жили на Земле и могли обсуждать научные проблемы. Какие свойства имеют фундаментальные объяснения, а какие случайны и определяются местными условиями?

Лично я считаю, что ландшафт из множества возможных конфигураций, где мы могли бы в принципе существовать, вполне возможен, потому что у любой системы уравнений гравитации, которые мы в состоянии придумать, существует множество возможных решений; я не вижу ни одной причины, по которой то, что мы видим вокруг, было бы единственным и неповторимым. Но антропный принцип как средство объяснения наблюдаемых явлений меня не удовлетворяет. Проблема в том, что мы никогда не знаем, достаточно ли для этого одного только антропного принципа. Какие явления мы по идее должны точно предсказывать, а какие определяются просто обстоятельствами? Помимо всего прочего, антропный принцип невозможно проверить. Он может оказаться верным. Но мы всегда готовы от него отказаться, если найдется более фундаментальное и проверяемое объяснение.

ВЕРНЕМСЯ НА ЗЕМЛЮ

Теория струн, скорее всего, содержит немало глубоких и перспективных идей. Она уже помогла нам заглянуть краешком глаза во владения квантовой гравитации и математики и обеспечила интересными ингредиентами для построения новых моделей. Но, скорее всего, пройдет еще немало времени, прежде чем мы

сможем в достаточной мере разобраться в теории, чтобы ответить на самые интересные для нас вопросы. Вывести следствия теории струн для нашего реального мира просто так, на основании чисто теоретических построений, может оказаться слишком сложно. Даже если на базе теории струн в принципе можно построить удачные модели, отыскать их будет очень трудно из-за множества избыточных элементов.

Модельный подход в физике подпитывается интуитивным ощущением того, что энергии, при которых теория струн способна делать конкретные прогнозы, слишком далеки от нас и совершенно недоступны. Как и в ситуации со многими другими явлениями, которые на разных масштабах описываются по-разному, очень может быть, что механизмы, отвечающие за загадки физики элементарных частиц, лучше всего изучать на релевантных энергиях.

Физики стремятся к общей глобальной цели, но мнение о том, как лучше всего этой цели достичь, у каждого свое. Я предпочитаю модельный подход, потому что экспериментальные данные, которые, возможно, будут получены в ближайшее время, дадут новую пищу для оценки и построения моделей. Мы с коллегами иногда пользуемся идеями из теории струн, а некоторые из наших исследований имеют для теории струн непосредственное значение, но применение теории струн само по себе не является нашей главной целью. Наша цель — разобраться в проверяемых явлениях. Модели можно описывать и проверять экспериментально, даже если они никак не связаны с самыми фундаментальными физическими теориями.

Авторы моделей прагматично признают, что мы не в состоянии вывести все сразу. Предположения, на которых основана модель, могут быть частью фундаментальной теории, а могут просто освещать новые отношения, базирующиеся на еще более глубоких теоретических основаниях. Модели — это эффективные теории. Если верность какой-то модели подтверждается экспериментально, то эта модель может указать специалистам по теории струн направление новых исследований. Приверженцы построения моделей, в свою очередь, уже черпают — и не без пользы — из богатого набора идей, выработанных на основе теории струн.

Но модели в первую очередь сосредоточиваются на относительно низких энергиях и экспериментах, исследующих эти энергетические диапазоны.

Модели, выходящие за рамки Стандартной модели, включают в себя также и ее компоненты как результат действия модели на уже исследованных уровнях энергий; но, помимо этого, они работают с новыми силами, новыми частицами и новыми типами взаимодействия, которые можно зарегистрировать только на малых расстояниях. Даже в этих условиях полностью согласовать модель с явлениями реального мира очень трудно, и в процессе согласования результирующая точная модель, как правило, теряет значительную долю своей первоначальной элегантности. Поэтому авторы моделей внимательно следят за появлением новых идей.

Слушатели часто удивляются, когда я говорю, что работаю одновременно над несколькими моделями, зная при этом, что все они не могут оказаться верными и что данные БАКа, вероятно, помогут в них разобраться и определить, которая из них верна. Они удивляются еще сильнее, когда слышат, что я не обязательно приписываю очень уж большую вероятность той модели, над которой работаю. Тем не менее я стараюсь выбирать такие модели, которые освещали бы по-настоящему новый способ экспериментального поиска. Модели, которые я рассматриваю, имеют, как правило, какую-нибудь интересную черту или механизм, предлагающие возможное объяснение загадочных явлений. Учитывая множество неизвестных — и неопределенные критерии прогресса, — прогнозирование и интерпретирование реальности представляет собой серьезную проблему. Только чудом можно было бы создать единственно верную модель с первой попытки.

В теориях многомерного мира есть очень интересная черта: в их создании участвовали оба подхода — и «снизу вверх», и «сверху вниз». Специалисты по теории струн признали принципиальную важность бран в своих теоретических построениях. А приверженцы подхода «снизу вверх» поняли, что, переформулировав проблему иерархии в терминах гравитации, можно найти альтернативные решения.

В настоящее время теоретические идеи проходят проверку на Большом адронном коллайдере. Сделанные на БАКе открытия, какими бы они ни оказались, будут направлять и сдерживать в будущем создание моделей. Получив экспериментальные результаты для энергичных столкновений, мы сможем определить, какие из моделей истинны. Даже если наблюдения не подтвердят ни одной из предложенных моделей, опыт их создания поможет нам ограничить диапазон возможностей и приблизиться к истине.

Моделирование помогает распознать возможности, предложить новые поисковые стратегии и корректно интерпретировать уже полученные данные. Возможно, нам повезет угадать. Но моделирование также позволяет нам внимательнее взглянуть на цель нашего поиска. Даже если в ходе экспериментов не оправдаются полностью предсказания ни одной из моделей, они все же помогут нам разобраться в любых полученных результатах. Именно экспериментальные результаты должны рассортировать многочисленные идеи и гипотезы и определить, которая из них — если такая есть — верно описывает действительность. Если ни одна из существующих моделей не сработает, данные помогут нам в работе над новыми моделями.

Высокоэнергетические эксперименты — не просто поиск новых частиц. Это, по существу, поиск структуры фундаментальных физических законов, обладающих еще большими объяснительными возможностями. Пока эксперименты не дадут ответов на наши вопросы, мы можем лишь строить предположения. Пока мы не стесняемся применять эстетические критерии при выборе модели, которая представляется нам верной. Но, когда в экспериментах будут достигнуты энергии или расстояния и набрана статистика, необходимая для различения моделей, мы будем знать много больше. Экспериментальные результаты — те, что мы надеемся получить на БАКе — определяют, какие из наших предположений верны, и таким образом помогут установить фундаментальную природу реальности.

Часть V

МАСШТАБИРОВАНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

ГЛАВА 19

ВСЕЛЕННАЯ НАИЗНАНКУ

Когда-то давно, когда я училась в начальной школе, однажды утром я прочла ошеломляющую новость о том, что Вселенная внезапно состарилась вдвое. Меня это поразило до глубины души. Как может такой важный фактор, как возраст Вселенной, меняться настолько радикально, не нивелируя при этом все остальные наши знания об окружающем мире?

Сегодня же меня удивляет другое. Меня поражает, как много и точно мы сумели узнать о Вселенной и ее истории. Мы теперь знаем не только возраст Вселенной точнее, чем когда-либо; мы знаем, как изменялась Вселенная во времени, как формировались атомные ядра, как галактики и скопления галактик начинали свой эволюционный путь.

Космология в последние годы вступила в замечательную эпоху, когда революционные достижения, — и экспериментальные, и теоретические, — помогли получить чрезвычайно обширное и подробное описание, в возможность которого никто не поверил бы еще 20 лет назад. Совместив передовые экспериментальные методики с вычислениями, сделанными на основе общей теории относительности и физики элементарных частиц, ученые получили подробную картину того, что представляла собой Вселенная на ранних стадиях и как она развивалась во времени до нынешнего состояния.

До сих пор эта книга сосредоточивалась в первую очередь на мелких масштабах, где мы исследовали внутреннюю природу

вещества. Достигнув сегодняшнего предела в путешествии внутрь материи, мы можем теперь перейти к масштабам, разговор о которых был начат в главе 5, и поговорить о размерах объектов внешней Вселенной.

При этом не следует забывать об одной существенной особенности, из-за которой путешествие к космическим масштабам отличается от путешествия в глубины вещества; мы ведь не можем аккуратно разложить по полочкам все аспекты Вселенной, опираясь на одни только размеры. Наблюдения не просто регистрируют сегодняшнее состояние Вселенной; из-за конечности скорости света они в каком-то смысле позволяют нам заглянуть в прошлое. Структуры, которые мы видим сегодня, вполне могут оказаться обитателями ранней Вселенной, свет от которых добрался до наших телескопов через миллиарды лет после того, как был излучен. Добавим, что нынешняя сильно расширившаяся Вселенная могла бы многократно вместить более раннюю версию самой себя.

Тем не менее размер играет очень существенную роль в интерпретации наших наблюдений — как нынешнего состояния Вселенной, так и истории ее развития во времени, и в этой главе мы поговорим о том и о другом. Во второй части главы мы рассмотрим эволюцию Вселенной как целого, начиная с крохотного первоначального размера и заканчивая большой и сложной структурой, которую мы наблюдаем сегодня. Но сначала мы познакомимся с сегодняшней Вселенной и с некоторыми размерами, характеризующими то, что нас окружает. Мы пройдем по шкале масштабов снизу вверх — от привычных предметов к большим размерам и более отдаленным объектам на Земле и в космосе. Наша экскурсия по большим масштабам и объектам будет значительно короче, чем предыдущее путешествие в глубины материи. Несмотря на богатство структуры Вселенной, большую часть того, что мы видим, можно объяснить при помощи известных физических законов — не фундаментальных, а новых. Формирование звезд и галактик протекает в соответствии с известными законами химии и электромагнетизма — наук, берущих начало в уже рассмотренных нами малых масштабах. Здесь, однако, и гравита-

ция играет принципиально важную роль: все зависит от скорости и плотности объектов, на которые она действует.

ЭКСКУРСИЯ ПО ВСЕЛЕННОЙ

Книга и фильм «Степени десяти» (Powers of Ten) — одно из классических путешествий по далеким мирам и измерениям — начинаются и заканчиваются изображением пары людей, сидящих на травке в парке в Чикаго; надо сказать, что это место подходит для начала нашего путешествия не хуже любого другого. Постоим мгновение на твердой земле (которая, как нам уже известно, состоит в основном из пустоты) и оглядимся вокруг. Какие привычные размеры и расстояния мы увидим? Но не будем задерживаться на человеческом масштабе — примерно двухметровом, — а покинув это уютное гнездышко, устремимся к новым высотам и большим размерам (на рис. 70 вы можете увидеть примеры масштабов, о которых пойдет речь в этой главе).

Одно из самых ярких свидетельств того, что человек живо реагирует на высоту, превосходящую человеческие масштабы, мне довелось наблюдать во время выступления танцевального ансамбля Элизабет Стреб. Ее танцовщицы падают ничком с перекладки, которая поднимается все выше и выше, и последняя танцовщица падает уже с высоты около 10 м. Это определенно больше той высоты, на которой человек чувствует себя комфортно, и свидетельством тому были многочисленные испуганные вскрики в аудитории. Человек не должен падать с такой высоты, и уж точно не должен падать лицом вниз.

Большинство высоких зданий тоже вызывает у нормального человека сильную реакцию, хотя, возможно, и не столь драматичную, — от восхищения до страха и отчуждения. Одна из задач, стоящих перед архитекторами при проектировании высотных зданий, — приблизить эти сооружения, многократно превосходящие нас по размеру, к человеку, гуманизировать их. Здания и конструкции могут быть разными по форме и размеру, но наша реакция на них всегда отражает чисто физиологическую и психологическую реакцию на размер.

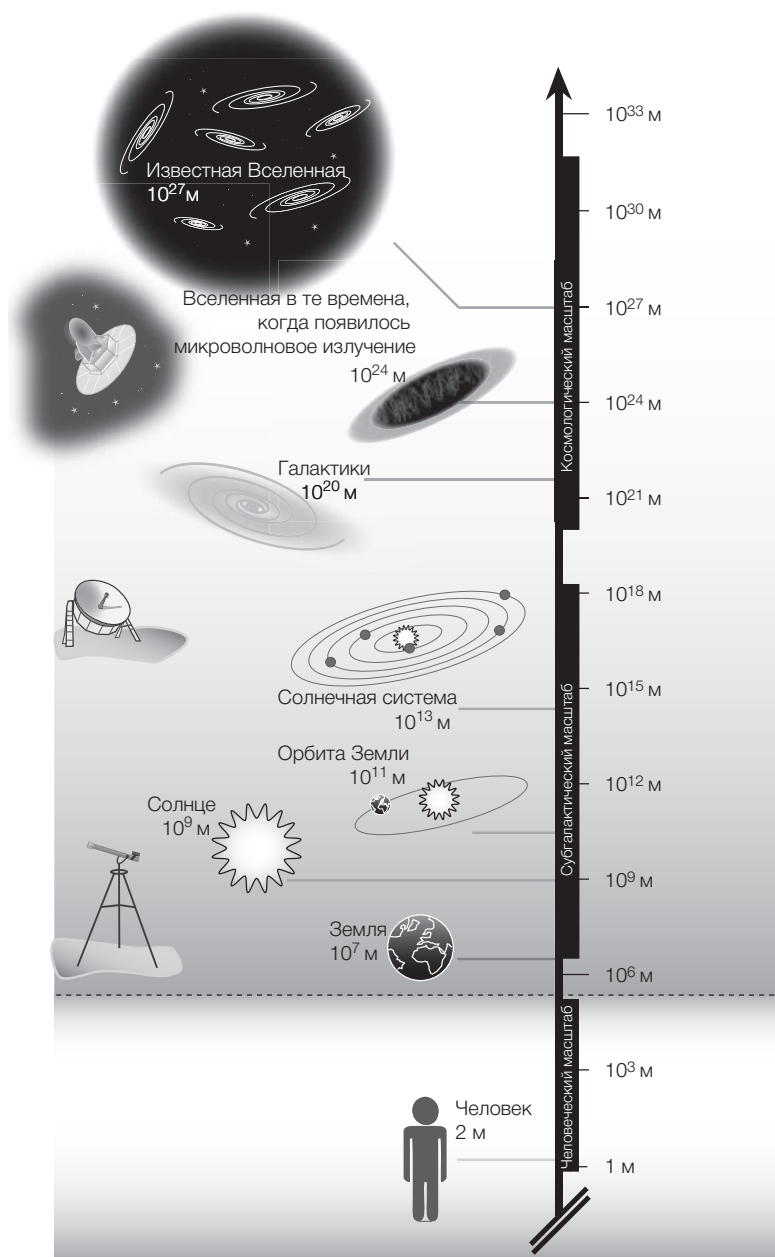


РИС. 70. Обзор больших масштабов и единиц длины, которые используются для их описания

Самое высокое сооружение в мире — башня «Бурдж-Халифа» в Дубае, столице Объединенных Арабских Эмиратов, высотой 828 м. Это чертовски много, но башня стоит в основном пустая, и фильм «Миссия невыполнима — 4» вряд ли придаст ей такой же культурный статус, какой приобрела другая башня — Empire State Building — после фильма «Кинг-Конг». Культовое нью-йоркское здание ниже арабской башни в два с лишним раза, однако заполнено гораздо плотнее.

Мы живем в мире, где много громадных естественных объектов, превосходящих все созданное человеком во много раз; многие из них вызывают восхищение и преклонение. В вертикальном направлении гора Эверест имеет высоту 8,8 км — высочайший пик Земли. Много лет назад я была счастлива, когда наконец добралась до ее вершины, хотя на сделанном там фото мы с приятелем выглядим достаточно жалко. Марианская впадина глубиной 11 км — самое глубокое известное место в океане и нижняя точка поверхности земной коры. Именно туда, в эту чужеродную впадину, устремился режиссер Джеймс Кэмерон, после того как успешно завоевал мир со своим фильмом «Аватар».

На поверхности Земли естественные тела имеют значительно большие размеры. Ширина Тихого океана, к примеру, составляет около 20 млн м, тогда как Россия — длина ее территории по широте около 8 млн м — вдвое меньше. Земля имеет примерно 12 млн м в диаметре, а ее окружность достигает 40 млн м. США (4,2 млн м по широте) примерно вдесятеро меньше, но их длина все равно превосходит диаметр Луны, составляющий около 3,5 млн м.

Объекты в открытом космосе также могут иметь самые разные размеры. Астероиды, к примеру, различаются между собой очень сильно — мелкие могут быть размером с гальку, крупные намного превосходят любые объекты на поверхности Земли. Солнце — около 1,4 млрд м в ширину — превосходит Землю по размеру более чем в 100 раз. А Солнечная система, которую я возьму в пределах до Плутона (который входит в Солнечную систему независимо от того, является он планетой или нет), примерно в 8000 раз больше радиуса Солнца.

Расстояние от Земли до Солнца значительно меньше — всего лишь 150 млрд м — одна двухсотая от одной тысячной светового года. А световой год — это расстояние, которое свет может преодолеть за год — результат перемножения 300 млн м/сек (скорости света) и 30 млн сек (продолжительности года в секундах). Из-за конечной скорости света солнечный свет, достигающий Земли, уже имеет возраст около 500 сек.

В нашей обширной Вселенной существует множество видимых структур самых разных видов и размеров. Астрономы объединяют большинство небесных тел в несколько типов. Для масштаба скажем, что галактика, как правило, имеет размер около 30 000 световых лет, или 3×10^{20} м, в поперечнике. Это относится и к нашей Галактике — Млечному Пути, — размер которой примерно втрое больше. Скопления галактик имеют размер около 10^{23} м, или 10 млн световых лет. Свету требуется 10 млн лет, чтобы пересечь такое скопление галактик из конца в конец.

Несмотря на громадный разброс размеров, большинство небесных тел подчиняется законам Ньютона. Орбиту Луны, как и орбиту Плутона или даже самой Земли, можно рассчитать в рамках ньютоновой теории всемирного тяготения. Учитывая расстояние от планеты до Солнца, ее орбиту можно предсказать на основании одних только законов Ньютона — тех самых, что заставили упасть на землю легендарное яблоко.

Тем не менее более точные измерения планетарных орбит показали, что законы Ньютона — не последнее слово науки. Потребовалась общая теория относительности, чтобы объяснить прецессию перигелия Меркурия, то есть видимое изменение параметров его орбиты вокруг Солнца со временем. Общая теория относительности — более всеохватная теория, которая включает в себя ньютоновы законы (для невысоких плотностей и скоростей), но работает и за пределами этих ограничений.

Для описания большинства объектов общая теория относительности не нужна, однако ее эффекты могут накапливаться со временем, а там, где плотность объекта достаточно велика, как в черных дырах, они проявляются в полную силу. Черная дыра в центре нашей Галактики имеет радиус около 100 млрд (10^{11}) м.

Заклученная в этом объеме масса очень велика — около 4 млн солнечных масс — и здесь, как и в случае всех остальных черных дыр, описать ее гравитационные свойства без общей теории относительности невозможно.

Вся видимая Вселенная в настоящее время простирается примерно на 100 млрд световых лет в поперечнике — 10^{27} м, или в миллиард раз больше нашей Галактики. Такое громадное число вызывает удивление, ведь получается, что размер Вселенной больше, чем расстояние, до которого мы реально можем «дотянуться» (13,75 млрд световых лет). Считается, что с момента Большого взрыва прошло 13,75 млрд лет и ничто за это время не могло преодолеть большее расстояние, так что и размер никак не может быть больше.

Однако здесь нет никакого противоречия. Причина, по которой Вселенная в целом больше, чем расстояние, которое мог преодолеть свет за время ее жизни, состоит в том, что пространство расширяется. В понимании этого явления большую роль играет общая теория относительности. Ее уравнения говорят о том, что растягивается сама ткань космоса. Мы можем видеть точки Вселенной, расположенные невероятно далеко друг от друга — так далеко, что сами они «видеть» друг друга не в состоянии.

Учитывая конечную скорость света и конечный возраст Вселенной, наблюдаемые расстояния в ней, разумеется, тоже конечны, и мы уже подошли к верхнему их пределу. Видимая Вселенная — это все, что доступно нашим телескопам. Тем не менее размер Вселенной почти наверняка не ограничен тем, что мы видим. Как и в случае с малыми расстояниями, где мы можем строить предположения, выходящие за рамки сегодняшних экспериментальных ограничений, здесь мы тоже можем строить предположения о том, что находится за пределами наблюдаемой Вселенной. Единственный предел в направлении больших расстояний кладет наше собственное воображение и естественное нежелание думать о структурах, которые мы не имеем никакой надежды когда-нибудь увидеть.

Мы в самом деле не знаем, что находится там, за *горизонтом* — границей наблюдаемой Вселенной. Ограниченность наших на-

блюдательных возможностей позволяет допустить существование там новых необычных явлений. Другие структуры, другие измерения, даже другие законы природы могут иметь место до тех пор, пока их существование не вступает в противоречие с наблюдаемыми явлениями. Это не означает, что буквально математически непротиворечивые структуры физически существуют в природе, как иногда утверждает мой коллега-астрофизик Макс Тегмарк. Однако это означает все же, что там, за горизонтом, может находиться множество самых неожиданных явлений и объектов.

Мы пока не знаем, существуют ли другие измерения или другие вселенные. Более того, мы не можем даже сказать наверняка, конечно Вселенная в целом или бесконечна, хотя большинство из нас считает, что, скорее всего, бесконечна. Ни одно наблюдение, ни одно измерение не дают никаких признаков ее конца, но дальность наблюдений и измерений ограничена. Вообще, Вселенная может иметь конец, так же как может иметь форму мяча или воздушного шара. Но в настоящее время ни одно теоретическое или экспериментальное свидетельство не указывает на это.

Большинство физиков предпочитают не думать слишком много о том, что царит за пределами видимой Вселенной, поскольку мы вряд ли когда-нибудь узнаем, что там. Однако любая теория гравитации или квантовой гравитации дает нам математические инструменты для предположений и прогнозов. На основе теоретических методов и гипотез о дополнительных пространственных измерениях физики иногда придумывают экзотические варианты иных вселенных, которые либо вообще не контактируют с нашей Вселенной, либо контактируют только через гравитацию. Как говорилось в главе 18, специалисты по теории струн и другие физики рассматривают возможность существования мультивселенной, состоящей из множества независимых вселенных, что согласуется с уравнениями теории струн; иногда эти рассуждения сочетаются с антропным принципом, который использует возможную множественность вселенных в своих интересах. Некоторые даже пытаются отыскать сигнатуры, по которым в будущем можно было бы судить о существовании подобных мультивселенных. Как мы видели в главе 17, в одном конкретном сценарии двухбрановая мульти-

вселенная помогла бы нам получить ответы на некоторые вопросы физики элементарных частиц — и в этом случае имела бы проверяемые следствия. Но большинство дополнительных вселенных, будучи возможными, в обозримом будущем наверняка останутся за пределами наших экспериментальных проектов. Поэтому пока они останутся лишь теоретическими абстрактными гипотезами.

БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ: ОТ МАЛОГО К БОЛЬШОМУ — СКВОЗЬ ВРЕМЯ

Теперь, когда мы вышли в пространство и рассуждаем о самых больших размерах, которые можно увидеть в наблюдаемой Вселенной, можно сказать, что мы достигли внешних пределов видимого (и воображаемого). Попробуем разобраться, как Вселенная, в которой мы живем, развивалась во времени и откуда взялись те громадные структуры, которые мы сегодня видим. Теория Большого взрыва говорит нам, что Вселенная за 13,75 млрд лет своей жизни выросла с первоначального размера до нынешних 100 млрд световых лет. Фред Хойл шутливо назвал теорию в честь первоначального толчка — взрыва, после которого раскаленный плотный шар начал расширяться, превращаясь в массу звезд и звездных структур, которые мы наблюдаем: шар рос, вещество «растекалось» по все большему объему и постепенно остывало.

Однако есть вещи, о которых мы вообще ничего не знаем: что, собственно, взорвалось в самом начале и как это произошло или хотя бы какого оно было размера до взрыва. Если последующую эволюцию Вселенной мы себе более или менее представляем, то ее рождение по-прежнему покрыто тайной. Но хотя теория Большого взрыва ничего не говорит нам о начальном моменте существования Вселенной, это все же очень успешная теория, которая может многое сообщить нам о ее последующем развитии. Сегодняшние наблюдения вместе с теорией Большого взрыва позволяют нам в значительной степени восстановить ход эволюции нашей Вселенной.

В начале XX в. никто еще не знал, что Вселенная расширяется. Вообще, в тот момент, когда Эдвин Хаббл впервые взглянул на небо, об эволюции Вселенной известно было очень мало.

Харлоу Шепли измерил Млечный Путь и получил 300 000 световых лет в поперечнике, но при этом он был убежден, что, кроме Млечного Пути, во Вселенной ничего нет. В 1920-е гг. Хаббл понял, что некоторые туманности, которые Шепли считал пылевыми облаками (и которые выглядели под стать этому скучному названию), на самом деле представляют собой галактики, отстоящие от нас на миллионы световых лет.

Распознав галактики, Хаббл сделал второе поразительное открытие — расширение Вселенной. В 1929 г. он отметил красное смещение галактик, то есть доплеровский эффект, при котором свет от более далеких объектов сдвигается к большим длинам волн. Красное смещение свидетельствовало о том, что галактики удаляются от нас, примерно так же, как более глухой вой сирены машины скорой помощи говорит о том, что машина быстро удаляется прочь (рис. 71). Оказалось, что галактики, которые Хабблу удалось выявить, не являются неподвижными по отношению к Солнечной системе, а разбегаются в разные стороны. Эффект видимого разбегания галактик было легче всего объяснить тем, что мы живем в расширяющейся Вселенной, где расстояния между галактиками постоянно увеличиваются.

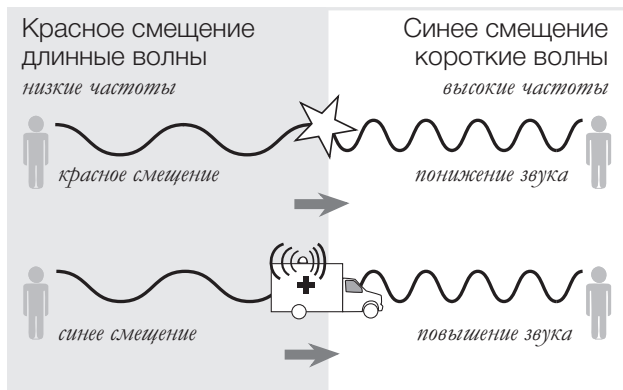


РИС. 71. Свет от объекта, удаляющегося от нас, сдвигается к более низким частотам, то есть к красному концу спектра, тогда как свет от объектов, приближающихся к нам, сдвигается в сторону более высоких частот, то есть претерпевает синее смещение. Аналогичным образом звук сирены понижается, когда машина отъезжает, и повышается, когда она подъезжает

Расширение Вселенной отличается от картин, которые первым делом возникают в нашем воображении. Нельзя считать, что Вселенная расширяется в каком-то заранее определенном пространстве. Вселенная — это все, что существует. Вокруг нее нет ничего, в пределах чего она могла бы расти. Вселенная, как и само пространство, просто расширяется. Любые две точки в ней со временем отдаляются друг от друга. Другие галактики непрерывно убегают от нашей, но наше местоположение ничем не выделяется среди прочих, — просто все галактики разбегаются по отношению друг к другу и к любой конкретной точке в пространстве.

Вообразить себе эту ситуацию можно при помощи обычного воздушного шарика. Представьте, что вы отметили на шарике две произвольные точки. Если вы продолжите надувать шарик, точки отдалятся друг от друга (рис. 72). Примерно то же происходит с любыми двумя точками во Вселенной при ее расширении. Расстояние между ними — или между любыми двумя галактиками — увеличивается.

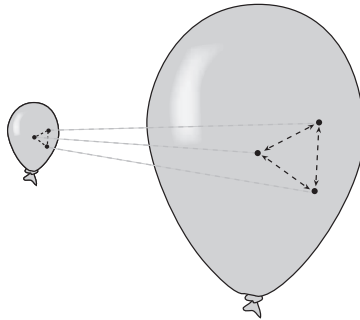


РИС. 72. На примере вселенной-шарика можно видеть, как все точки на ее поверхности удаляются друг от друга при надувании шарика (расширении Вселенной)

Обратите внимание: в нашей аналогии точки не обязательно увеличиваются сами по себе — увеличиваются расстояния между ними. Именно так происходит и в реальной расширяющейся Вселенной. Атомы, к примеру, прочно скреплены электромагнитными силами и, естественно, не становятся больше. Не увеличиваются в размерах и такие относительно плотные и прочно связанные структуры, как галактики. Сила, заставляющая Вселенную расши-

ряться, действует и на них тоже, но поскольку в них значительны и другие силы, то сами галактики не растут с общим расширением Вселенной. Действующие в них силы притяжения настолько существенны, что галактики сохраняют свои размеры, тогда как расстояния между ними непрерывно растут.

Разумеется, аналогия с воздушным шариком далеко не идеальна. У Вселенной три пространственных измерения, а не два, как у оболочки шарика. Более того, Вселенная велика и, вероятно, бесконечна по размеру, а не мала и искривлена, как поверхность шарика. Мало того, шарик существует в нашей Вселенной и расширяется в ней же, в отличие от Вселенной, которая существует и расширяется сама по себе. Но, несмотря на все ограничения, сравнение с шариком помогает представить, что такое расширение пространства. Каждая точка на ней удаляется одновременно от всех остальных точек.

Аналогия с шариком — на этот раз речь идет о его внутреннем содержимом — помогает понять и то, как Вселенная остывала, превращаясь из горячего плотного шара в нынешнее свое состояние. Представьте очень горячий шар, который вдруг начинает расширяться до очень больших размеров. Если сначала он, возможно, слишком горяч и до него невозможно дотронуться, то после расширения воздух в нем окажется намного прохладнее. Теория Большого взрыва утверждает, что первоначальная горячая и плотная Вселенная расширялась, одновременно остывая.

Надо сказать, что еще Эйнштейн вывел гипотезу о расширении Вселенной из уравнений общей теории относительности. Однако в то время никто еще не измерил и не обнаружил это расширение экспериментально, и Эйнштейн не поверил собственным выводам. Пытаясь примирить свою теорию со стационарной Вселенной, он ввел новый тип энергии, включив для этого в свои уравнения лямбда-член. После наблюдений Хаббла Эйнштейн отказался от этого искусственного средства и назвал его «величайшим заблуждением». Однако оказалось, что и гипотеза о дополнительной энергии не была полностью ошибочной. Как мы скоро узнаем, недавние измерения показывают, что так называемая космологическая константа, введенная Эйнштейном, действительно не-

обходима для объяснения наблюдаемых явлений. В то же время ее измеренная величина, отвечающая за недавно обнаруженное *ускорение* расширения, оказалась примерно на порядок больше, чем та, что предлагал сам Эйнштейн, чтобы просто стабилизировать Вселенную.

Расширение Вселенной — прекрасный пример слияния похожих «сверху вниз» и «снизу вверх» в физике. Теория гравитации Эйнштейна подразумевала, что Вселенная должна расширяться, но лишь с экспериментальным открытием этого расширения физики почувствовали себя на верном пути.

Сегодня мы называем число, определяющее скорость расширения Вселенной в настоящее время, *постоянной Хаббла*. Это постоянная величина в том смысле, что местное расширение в любой точке пространства идет с одинаковой скоростью. Однако параметр Хаббла не постоянен во времени. В прежние времена, когда Вселенная была более горячей и плотной, а гравитационные эффекты в ней проявлялись сильнее, она расширялась намного быстрее, чем сегодня.

Точно измерить постоянную Хаббла очень сложно, потому что мы сталкиваемся здесь с той самой проблемой, которую понимали и раньше, — проблемой различения прошлого и настоящего. Нам нужно знать, как далеко от нас находятся галактики, испытывающие красное смещение, поскольку красное смещение определяется скоростью, а она связана с расстоянием через коэффициент в виде постоянной Хаббла. Именно связанные с этим неточные измерения были причиной двукратного занижения возраста Вселенной, о котором я говорила в начале этой главы. Неопределенность при оценке параметра Хаббла была примерно такой же, как и неопределенность возраста Вселенной.

Это противоречие к настоящему моменту практически разрешено. Параметр Хаббла измерен Венди Фридман из Гарвард-Смитсоновского центра астрофизики, так что скорость удаления галактики, отстоящей от нас на миллион световых лет, составляет примерно 22 км/сек. На основании этой величины мы теперь знаем, что возраст Вселенной составляет около 13,75 млрд лет. Погрешность в определении возраста все еще может составлять 0,2 млрд

лет, но ошибиться вдвое мы уже не можем. Оставшаяся неопределенность тоже может показаться очень большой, но на самом деле получившийся диапазон достаточно узок, чтобы сегодня практически не влиять на наши представления об окружающем мире.

Теорию Большого взрыва подтвердили и еще два принципиально важных класса наблюдений, результаты которых прекрасно совпадают с ее предсказаниями. Один класс измерений основан одновременно на физике элементарных частиц и предсказаниях общей теории относительности и потому подтверждает то и другое одновременно; речь идет об измерении плотности различных элементов, таких как гелий и литий, в космосе. Относительное количество этих элементов, предсказанное теорией Большого взрыва, совпадает с реально измеренным. Это в некотором роде косвенное доказательство, так как для вычисления этих плотностей необходимы сложные и подробные расчеты, основанные на ядерной физике и космологии. Несмотря на это, случайное совпадение реально обнаруженного множества разных элементов с предсказанной маловероятно, и, скорее всего, это означает, что физики и астрономы на верном пути.

Когда американские ученые Роберт Уилсон и Арно Пензиас в 1964 г. случайно обнаружили фоновое микроволновое излучение с температурой 2,7 К, их открытие стало новым подтверждением теории Большого взрыва. Чтобы вы могли представить, что это за излучение, скажу, что ничего не может быть холоднее абсолютного нуля — нуля градусов по Кельвину. Фоновое излучение Вселенной теплее абсолютного нуля менее чем на три градуса.

Сотрудничество и приключения Роберта Уилсона и Арно Пензиаса (за которые они в 1978 г. были удостоены Нобелевской премии) — прекрасный пример того, как фундаментальная наука и технологии иногда объединяют усилия и достигают результата, которого никто не мог предугадать. В давние времена, когда фирма AT&T еще была в Америке телефонным монополистом, она сделала замечательную вещь — основала Лабораторию Белла, знаменитую Bell Labs, выдающийся исследовательский центр, где бок о бок проводятся фундаментальные и прикладные исследования.

В этой лаборатории работали и Роберт Уилсон — изобретатель всевозможных хитрых устройств, и Арно Пензиас — ученый. Оба они пользовались радиотелескопами и вместе работали над их усовершенствованием. Уилсон и Пензиас интересовались наукой и техникой, фирма AT&T, что понятно, интересовалась телекоммуникациями, поэтому радиоволны в небе представляли интерес для всех без исключения.

Преследуя конкретную радиоастрономическую цель, Уилсон и Пензиас обнаружили одну особенность, которую поначалу сочли просто необъяснимой помехой. Это был однородный фоновый шум, похожий на шум ненастроенного радиоприемника. Он не исходил от Солнца и не имел отношения к недавним ядерным испытаниям. Девять месяцев ученые пытались понять, что происходит, опробовав за это время все мыслимые и немыслимые объяснения (включая предположение о том, что антенны загрязнены голубиным пометом). Они проверили все, что пришло в голову, отчистили антенну от помета (или «белого диэлектрического вещества», как именовал его Пензиас) и даже перестреляли всех голубей в округе, но шум не уходил.

Уилсон рассказывал мне, что свое открытие они совершили в очень подходящее время. Сами они ничего не знали о Большом взрыве, но Роберт Дик и Джим Пиблз из Принстонского университета знали. Тамошние физики поняли, что одним из следствий теории Большого взрыва должно быть реликтовое микроволновое излучение. Они как раз готовили эксперимент, который должен был бы измерить это излучение, когда обнаружили, что дело уже сделано учеными из Лаборатории Белла, которые пока сами не поняли, что открыли. К счастью для Пензиаса и Уилсона, астроном из Массачусетского технологического института Берни Берк знал и о принстонских исследованиях, и об открытии Пензиаса и Уилсона. Он и довел дело до результата — «состыковал» все заинтересованные стороны.

Вообще, вся эта история — прекрасный пример науки в действии. Исследования проводились с конкретной научной целью, которая могла принести и какие-то дополнительные бонусы — и технические, и научные. Астрономы не искали того, что нашли,

но обладали высочайшей технической и научной квалификацией. Обнаружив что-то неожиданное, они и не подумали просто отбросить неудобные данные. Их исследование привело к открытию, имевшему огромные последствия, а успеха они достигли потому, что кроме собственной локальной цели держали в голове и всю научную картину мира. Так случайное открытие ученых навсегда изменило космологическую науку.

Реликтовое космическое излучение оказалось полезнейшим инструментом — оно не только подтвердило теорию Большого взрыва, но и превратило космологию в точную науку. Космическое микроволновое фоновое излучение дало нам возможность совершенно по-новому увидеть прошлое Вселенной.

В прошлом астрономы наблюдали объекты в небе, пытались определить их возраст и восстановить их эволюционную историю. Сегодня при помощи реликтового излучения ученые могут заглянуть *непосредственно* в прошлое, в те времена, когда звезды и галактики еще не сформировались. Свет, который они наблюдают, был излучен очень давно — на ранней стадии эволюции Вселенной. Когда кванты микроволнового фона, которые мы регистрируем сегодня, были излучены, размер Вселенной составлял лишь тысячную долю от ее современного размера.

Первоначально во Вселенной были только всевозможные частицы — и заряженные, и незаряженные, но, после того как она достаточно остыла, а на это ушло примерно 400 000 лет, заряженные частицы объединились в нейтральные атомы. После того как это произошло, свет перестал рассеиваться — как говорят физики, произошло отделение излучения от вещества. Таким образом, наблюдаемое сегодня реликтовое излучение доходит до наших наземных и спутниковых телескопов непосредственно из времени, отстоящего от момента рождения Вселенной на 400 000 лет, — доходит неизменным и непрерывным. Фоновое излучение, открытое Пензиасом и Уилсоном, — это то самое излучение, которое присутствовало еще на ранних стадиях эволюции Вселенной, только «разбавленное» и остывшее в процессе ее расширения. Это излучение попало прямо в телескопы, где и было зарегистрировано, без всякого рассеяния на случайных

заряженных частицах. Этот свет открывает для нас широкое окно в прошлое.

Спутник COBE (Cosmic Microwave Background Explorer), запущенный в 1989 г. и проработавший в космосе четыре года, измерил реликтовое излучение с необычайной точностью, и ученые обнаружили, что их измерения согласуются с теоретическими предсказаниями с точностью до одной тысячной. Но COBE измерил и кое-что новое. Безусловно, самым интересным из его результатов стала легкая неоднородность — анизотропия распределения температуры излучения по небесной сфере. Вообще-то Вселенная чрезвычайно однородна, но крохотные отклонения на уровне менее одной десятичной на раннем этапе ее развития позже увеличились и сыграли важную роль при формировании различных структур. Неоднородности возникли на крохотных длинах, но со временем увеличились до размеров, существенных для астрономических измерений и структур. Гравитация собрала воедино более плотные области, где неоднородности были особенно сильны, и сформировала из них массивные структуры, которые мы в настоящее время наблюдаем. Звезды, галактики и скопления галактик являются результатом возникших в начале времен крохотных квантово-механических возмущений и их дальнейшего развития под действием гравитационных сил.

Наблюдение микроволнового фонового излучения продолжает оставаться важнейшим фактором наших представлений об эволюции Вселенной. Его роль как настоящего окна в прошлое невозможно переоценить. Не так давно исследования реликтового излучения вместе с более традиционными методами исследований представили ученым экспериментальные свидетельства новых загадочных явлений — инфляционной модели Вселенной (космической инфляции), а также скрытой массы и темной энергии, о которых мы поговорим в следующей главе.

ЧТО ВЕЛИКО ДЛЯ ТЕБЯ, МАЛО ДЛЯ МЕНЯ

Когда я работала в Массачусетском технологическом институте, наша кафедра испытывала трудности: офисных помещений на третьем этаже, где работали специалисты по физике элементарных частиц, перестало хватать. Поэтому я переехала в свободный кабинет рядом с кабинетом Алана Гута, этажом ниже, где тогда размещались теоретики — астрономы и космологи. Сам Алан начинал как специалист по физике элементарных частиц, но сегодня он известен как один из лучших космологов нашего времени. Я к моменту переезда успела уже познакомиться с некоторыми связями между физикой элементарных частиц и космологией. Но проводить такие исследования намного проще, если сосед разделяет твои интересы и столь же рассеян — так, что в его кабинете ты чувствуешь себя как дома.

Многие специалисты по физике элементарных частиц освоили другие, самые разные области научных исследований. Уолли Гилберт, один из основателей биотехнологической компании Biogen, начинал в физике элементарных частиц, но оставил эту область ради исследований в биологии и химии, достойных Нобелевской премии. Его примеру последовали многие. С другой стороны, многие из тех, кто учился вместе со мной, оставили науку и стали «квантами» Уолл-стрит, где можно играть на будущих измерениях на рынке. Они выбрали прекрасное время для такого перехода, поскольку тогда как раз разрабатывались финансовые инструменты

хеджирования подобных рисков. Если в биологии пригодились способы организации мышления и решения задач, то в мире финансов небесполезными оказались некоторые методы и уравнения.

Но физика элементарных частиц и космология, разумеется, пересекаются гораздо глубже, чем любые другие науки. Подробное исследование Вселенной на различных масштабах вскрыло множество неразрывных связей между элементарными частицами на самых маленьких масштабах и самой Вселенной на самом большом. В конце концов, Вселенная по определению уникальна и охватывает все сущее. Специалисты по физике элементарных частиц смотрят вглубь и задаются вопросом о том, какой тип фундаментальной материи лежит в основе всякой материи, а космологи смотрят в небо и пытаются понять, как возникло и развивалось все то, что там есть. Загадки Вселенной — то самое, из чего она в основном и состоит — одинаково интересуют и космологов, и специалистов по физике элементарных частиц.

В той и другой области исследований изучаются базовые структуры и используются фундаментальные физические законы. Ученым необходимо принимать во внимание результаты друг друга. Состав Вселенной, изучаемый в физике элементарных частиц, является важным предметом исследования и для космологов. Более того, законы природы, включающие в себя и общую теорию относительности, и физику элементарных частиц, описывают эволюцию Вселенной, как, собственно, и должно быть, если обе теории верны и применимы к одному и тому же космосу. В то же время известные черты эволюции Вселенной накладывают определенные ограничения на свойства, которые может иметь материя, не вступая при этом в противоречие с данными наблюдений. В определенном смысле Вселенную можно назвать первым и самым мощным в истории ускорителем частиц. Энергии и температуры на ранних стадиях ее эволюции были чрезвычайно высоки, и те высокие энергии, которые мы сегодня стремимся получить в ускорителях, призваны воспроизвести именно эти условия, но в земных лабораториях.

Возросшее в последнее время внимание к этому пересечению интересов уже вызвало к жизни множество плодотворных иссле-

дований и серьезных открытий; можно надеяться, что процесс конвергенции будет продолжаться. В этой главе рассматриваются некоторые крупные вопросы космологии, которые сейчас исследуют и сами космологи, и специалисты по физике элементарных частиц. Мы рассмотрим такие явления, как космическая инфляция, скрытая масса (темная материя) и темная энергия.

КОСМИЧЕСКАЯ ИНФЛЯЦИЯ

Мы не можем пока сказать, что происходило в самом начале эволюции Вселенной, потому что у нас нет непротиворечивой теории, которая включала бы в себя и квантовую механику, и гравитацию. Тем не менее мы можем утверждать с определенной долей уверенности, что в некоторый момент в самом начале (возможно, всего лишь через 10^{-39} сек после рождения Вселенной) произошло явление, известное как *космическая инфляция*.

В 1980 г. Алан Гут первым предложил эту модель, согласно которой в самом начале развития Вселенная взорвалась. Интересно, что первоначально он пытался решить для физики элементарных частиц проблему, связанную с космологическими последствиями теорий Великого объединения*. Он в то время занимался частицами, поэтому использовал методы, основанные на теории поля — теории, которая совмещает в себе специальную теорию относительности и квантовую механику. Однако дело кончилось тем, что он выдвинул совершенно новую теорию, которая резко изменила наш подход к космологии. Как и когда произошла инфляция, ученые спорят до сих пор. Но Вселенная, претерпевшая такое взрывное расширение, должна была оставить тому четкие свидетельства, и значительная часть этих свидетельств уже обнаружена.

В стандартном сценарии Большого взрыва Вселенная после рождения росла спокойно и равномерно: к примеру, с увеличением времени жизни вчетверо она должна была удвоиться в размерах. Но в инфляционную эпоху молодая Вселенная пережила период не-

* Ранее модель (почти) экспоненциально расширяющейся Вселенной была предложена в работах А. Старобинского для решения проблемы начальной сингулярности в теории горячего Большого взрыва. — *Прим. науч. консульт.*

вероятно стремительного расширения и росла экспоненциально. Это значит, что за фиксированное время размер Вселенной удвоился, затем снова удвоился за то же время — и так не менее 90 раз подряд, пока инфляционная эпоха не закончилась и Вселенная не стала такой однородной, какой мы видим ее сегодня. Такое экспоненциальное расширение означает, к примеру, что за то время, пока возраст Вселенной увеличился в 60 раз, ее размеры выросли более чем в триллион триллионов триллионов (10^{36}) раз; без инфляции же они выросли бы за то же самое время всего лишь в восемь раз. В определенном смысле инфляция стала началом развития от малого к большому. Первоначальное громадное инфляционное расширение должно было «развести» субстанцию из вещества и излучения Вселенной до практически нулевой концентрации. Поэтому все, что мы сегодня наблюдаем во Вселенной, должно было возникнуть сразу после инфляции, когда энергия, питавшая инфляционный взрыв, превратилась в вещество и излучение. Лишь в этот момент времени начался Большой взрыв в его традиционном понимании — и Вселенная начала дальнейшее неспешное расширение в ту громадную структуру, которую мы видим сегодня.

Можно говорить об инфляционном расширении как о «взрыве-предвестнике» того дальнейшего развития Вселенной, которое шло по стандартному сценарию Большого взрыва. На самом деле это не начало — мы не знаем, что происходило, когда основную роль играла квантовая гравитация, — но это тот момент эволюции Вселенной, вслед за которым началась стадия Большого взрыва с охлаждением материи, а затем и формированием из нее крупных космических объектов.

Отчасти именно инфляции мы обязаны тем, что во Вселенной существуют самые разные объекты, а не сплошное «ничто». Часть энергии громадной плотности, накопленной во время инфляционного расширения, превратилась (согласно формуле $E = mc^2$) в вещество, из которого, собственно, и сформировалось все, что мы сегодня видим вокруг. Физики хотели бы все же узнать, почему во Вселенной больше вещества, чем антивещества. Но каков бы ни был ответ на этот вопрос, нынешнее вещество согласно теории Большого взрыва начало эволюционировать сразу же после окончания космической инфляции.

Инфляционная модель решала важные проблемы традиционной теории Большого взрыва, но мало кто из ученых поверил в предложенные сценарии возникновения инфляции. Поскольку создать достоверную модель было чрезвычайно трудно, многие физики (включая и тех, кто работал в то время в Гарварде, где я училась) сомневались в том, что эта странная идея может оказаться верной. С другой стороны, Андрей Линде, физик русского происхождения из Стэнфордского университета и один из первых, кто начал работы по инфляции, считал, что эта гипотеза должна быть верна просто потому, что никто не нашел никакого иного решения загадок, связанных с размером, формой и однородностью Вселенной, — загадок, на которые с легкостью отвечала инфляционная теория.

Инфляция, кстати говоря, может служить интересным примером связи между истиной и красотой — или отсутствия такой связи. С одной стороны, экспоненциальное расширение Вселенной красиво и легко объясняет многие явления, связанные с начальным этапом ее существования, а с другой — поиски теории, которая естественным образом объясняла бы экспоненциальное начальное расширение, приводит, как правило, к созданию не слишком красивых моделей.

В последнее время, однако, большинство физиков склоняется к тому, чтобы принять инфляционную модель, хотя обоснования ее корректности по-прежнему многих не устраивают. Наблюдения последних нескольких лет подтвердили космологическую картину Большого взрыва, предваряемого инфляцией. Сегодня многие физики уверены, что и развитие по схеме Большого взрыва, и инфляция имели место, поскольку предсказания, сделанные на основе этих теорий, оправдываются с впечатляющей точностью. Вопрос о том, какая модель лежит в основе инфляции, по-прежнему остается открытым, но сама по себе экспоненциальная инфляция в настоящее время подтверждается достаточным количеством свидетельств.

Одно из свидетельств в пользу космологической инфляции должно иметь отношение к отклонениям от равномерного распределения реликтового излучения по небесной сфере, о котором упо-

миналось в предыдущей главе. Фоновое излучение сообщает нам далеко не только о том, что Большой взрыв на самом деле имел место. Прелесть ситуации в том, что, поскольку это излучение, по существу, представляет собой мгновенный снимок состояния Вселенной на раннем этапе развития — до того, как успели сформироваться звезды, — оно позволяет нам заглянуть в прошлое и увидеть начало структурирования в тот момент, когда Вселенная еще была однородной. Измерения реликтового излучения позволили выявить крохотные отклонения от идеальной равномерности. Инфляционная модель предсказывает такие неоднородности, поскольку из-за квантово-механических флуктуаций инфляция в разных областях Вселенной прекратилась в разное время, отчего и возникли крохотные отклонения от идеальной однородности.

Спутник под названием WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), названный в честь одного из инициаторов проекта Принстонского физика Дэвида Уилкинсона и нацеленный на поиск анизотропии микроволнового фона, провел точные измерения, позволившие отличить инфляционные предсказания от прочих возможных вариантов. Несмотря на то что инфляция протекала давным-давно и к тому же при невероятно высоких температурах, инфляционная теория точно предсказывает статистические закономерности распределения температурных вариаций, которые должны проявляться в реликтовом излучении сегодня. Эта обсерватория измерила небольшие неоднородности температуры и плотности энергии с большей точностью и более высоким угловым разрешением, чем прежде, и распределение этих параметров вполне совпало с инфляционными ожиданиями.

Главным подтверждением инфляционной теории, полученным от WMAP, стало измерение кривизны Вселенной, а точнее — ее удивительной прямизны. Эйнштейн учил, что наше пространство может быть искривлено (на рис. 73 можно увидеть примеры искривленных двумерных поверхностей). Степень кривизны зависит от плотности энергии во Вселенной. В те времена, когда была впервые предложена инфляционная теория, было уже известно, что Вселенная на самом деле искривлена намного меньше, чем можно было ожидать, но измерения в то время были не-

достаточно точными и проверить инфляционное предсказание (инфляционная теория утверждает: Вселенная расширилась настолько, что любое искривление растянулось практически в нуль) было невозможно. На сегодняшний день измерения реликтового излучения показали, что Вселенная на самом деле плоская с точностью до одного процента, — и понять это без дополнительных физических объяснений очень трудно.

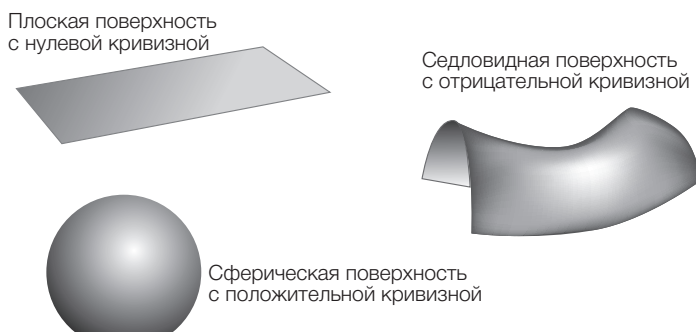


РИС. 73. Нулевая, положительная и отрицательная кривизна двумерных поверхностей. Вселенная тоже может быть искривлена, но в четырехмерном пространстве-времени, что трудно изобразить на бумаге

Отсутствие у Вселенной заметной кривизны стало громадной победой инфляционной космологии. Если бы дело обстояло иначе, инфляционную теорию можно было бы исключить. Данные WMAP стали и большой научной победой. Когда теоретики впервые предложили точно измерить микроволновой фон и поближе познакомиться, таким образом, с геометрией Вселенной, все сочли, что это, конечно, очень интересно и заинтересует научное сообщество, но слишком сложно технически, чтобы проект можно было осуществить в обозримом будущем. Однако вопреки ожиданиям не прошло и десяти лет, как космологи провели необходимые измерения и снабдили научный мир ценнейшими данными. Мы узнали об эволюции Вселенной множество поразительных фактов. WMAP и сегодня продолжает давать новые результаты, проводя на небесной сфере детальные измерения тончайших температурных varia-

ций. Спутник Planck, действующий сегодня, измеряет эти флуктуации еще точнее*. Исследования реликтового излучения оказались бесценным и главным источником сведений об истории ранней Вселенной и, скорее всего, еще долго будут им оставаться.

Недавние подробные исследования космического излучения, пронизывающего пространство с древнейших времен, позволили добиться громадных успехов и в других областях наших знаний о Вселенной и ее эволюции. Данные об излучении сообщили нам много нового о веществе и энергии вокруг нас. Мало того, что мы узнали, в каком состоянии была Вселенная, когда это излучение только начинало свой путь к нам; реликтовое излучение рассказало нам и о том, что встречало в пути. Если бы Вселенная изменилась за последние 13,75 млрд лет или если бы ее энергия отличалась от ожидаемой, то, как учит нас теория относительности, маршрут световых лучей тоже изменился бы, а следовательно, изменились бы и свойства излучения, которое мы сегодня регистрируем. Микроволновое фоновое излучение — чувствительнейший индикатор сегодняшнего энергетического состава Вселенной — обеспечивает нас информацией о том, что в этой Вселенной есть, в том числе о скрытой массе и темной энергии, о которых мы сейчас и поговорим.

СЕРДЦЕ ТЬМЫ

Помимо успешного подтверждения инфляционной теории исследование космического реликтового излучения породило несколько новых серьезных загадок, над которыми уже работают космологи, астрономы и специалисты по физике элементарных частиц. Инфляционная теория говорит нам, что Вселенная должна быть плоской, но не говорит, где скрывается в настоящее время энергия, необходимая для обеспечения ее плоского состояния. Однако при помощи уравнений Эйнштейна мы можем вычислить, какая энергия нужна для того, чтобы Вселенная сегодня была плоской. Оказывается, все известное видимое вещество обеспечивает лишь 4% необходимой энергии.

* WMAP был запущен 30 июня 2001 г. и проработал до августа 2010 г. Обработка его научных данных продолжается. Planck запущен 15 мая 2009 г. — *Прим. пер.*

Дополнительной загадкой, требующей объяснения, стало то, что флуктуации температуры и плотности, первоначально измеренные COBE, оказались такими крошечными. Если бы во Вселенной существовало только видимое вещество, а возмущения были такими крохотными, Вселенная просто не просуществовала бы так долго, чтобы возмущения успели настолько увеличиться и стать базой для формирования ее структуры. Но существование галактик и скоплений галактик вкупе с минимальными масштабами измеренных флуктуаций указывает на существование вещества, непосредственно увидеть которое никому пока не удалось.

На самом деле уже давно, задолго до проведенных COBE измерений реликтового излучения, ученые знали, что должен существовать еще один тип материи, известный как темная материя (или скрытая масса). Другие наблюдения и раньше указывали на существование некоего невидимого вещества. Эта загадочная штука, получившая название скрытой массы, подвержена действию гравитационных сил, но не взаимодействует со светом. Поскольку это вещество не излучает и не поглощает свет, оно невидимое, а вовсе не темное. До сих пор о скрытой массе нам не известно практически ничего — только то, что она гравитирует и слабо взаимодействует с другими элементами и структурами.



РИС. 74. На диаграмме показано относительное содержание видимого вещества, скрытой массы и темной энергии, из которых состоит Вселенная

Более того, гравитационное влияние и измерения указывают на присутствие еще одной сущности, даже более загадочной, чем скрытая масса; эта сущность получила название темной энергии. Она пронизывает Вселенную, но не «слипается», как обычное вещество, и не «растекается» по мере расширения. Она очень похожа на ту энергию, которая в свое время стала причиной инфляции, но ее плотность сегодня намного меньше, чем была тогда.

Можно сказать, что в космологии сейчас наступила эпоха Возрождения: теории и наблюдения достигли такой стадии, когда можно проверять истинность новых гипотез. С другой стороны, мы по-прежнему живем в Темные века. Как показано на диаграмме (см. рис. 74), около 23% энергии Вселенной заключено в темной материи, а еще примерно 73% приходится на таинственную темную энергию.

В последний раз некая сущность в физике получила название «темной» в середине XIX в., когда Урбен Жан Жозеф Леверье из Франции предположил существование невидимой темной планеты, которую назвал Вулканом. Целью его было объяснить странную траекторию движения планеты Меркурий. До этого Леверье, изучив одновременно с англичанином Джоном Адамсом возмущения орбиты Урана, сделал вывод о существовании планеты Нептун, который полностью оправдался. А вот с Меркурием он ошибся. Оказалось, что странности его орбиты объясняются гораздо более сложно, чем просто существованием еще одной планеты, и объяснить их смогла только теория относительности Эйнштейна. Собственно, первым свидетельством в пользу общей теории относительности и стало успешное предсказание с ее помощью поведения орбиты Меркурия.

Может оказаться, что скрытая масса и темная энергия представляют собой следствия известных физических законов и теорий, а может быть, эти недостающие элементы Вселенной тоже являются предвестниками не менее серьезной смены парадигмы. Только время может сказать, каким образом разрешатся проблемы скрытой массы и темной энергии.

Я бы предположила, что скрытая масса, скорее всего, получит более традиционное объяснение, укладывающееся в рамки уже

известных нам на сегодняшний день физических законов. В конце концов, даже если новое вещество ведет себя в соответствии с законами взаимодействий, похожими на те, что мы знаем, то почему все вещество во Вселенной обязано вести себя, как знакомое нам вещество? Или, более конкретно, почему всякое вещество обязано взаимодействовать со светом?

Многие думают по-другому. Они считают существование скрытой массы полной загадкой и задаются вопросом: как может быть, что бо́льшая часть вещества Вселенной — примерно в шесть раз больше того, что мы видим — представляет собой нечто, что невозможно зарегистрировать при помощи традиционных телескопов. Некоторые даже подозревают, что скрытая масса может оказаться какой-то ошибкой. Лично я думаю наоборот (хотя следует признать, что даже среди физиков далеко не все согласны со мной). Было бы куда большей загадкой, если бы во Вселенной не нашлось другого вещества, помимо того, которое мы можем увидеть глазами. Почему человек должен обладать идеальными чувствами, способными непосредственно воспринимать все на свете? Опять же история развития физики на протяжении столетий учит нас, что от человеческого взгляда скрыто очень многое. С этой точки зрения непонятно, почему то, что мы воспринимаем непосредственно, должно составлять хотя бы одну шестую от энергии всего вещества. Мне это кажется совпадением, и мы с коллегами в настоящее время пытаемся в этом совпадении разобраться.

Нам известно, что должно существовать нечто со свойствами скрытой массы. Видеть это мы не можем, но гравитационное воздействие регистрируем исправно, и многочисленные наблюдательные данные о гравитационных эффектах в космосе говорят о том, что скрытая масса существует.

Первое указание на ее существование было получено при измерении скорости вращения звезд в скоплениях галактик. В 1933 г. Фриц Цвикки заметил, что галактики обращаются вокруг общего центра быстрее, чем следовало бы, исходя из видимой массы*.

* Точнее — из массы, вычисляемой на основании разумных предположений о количестве звездной и газопылевой материи в галактиках скопления с учетом ее размеров и светимости. — *Прим. пер.*

Вскоре после этого Ян Оорт обнаружил аналогичное явление и в Млечном Пути. Цвикки на основании собственных данных сделал вывод о существовании темной материи, которую никто не может непосредственно увидеть. Однако ни одно из этих наблюдений не было абсолютно убедительным. Казалось, что куда проще объяснить данные ошибкой наблюдения или пока неизвестной особенностью галактической динамики, чем придумывать исключительно для этого какую-то невидимую субстанцию.

В то время, когда Цвикки проводил свои измерения, у его аппаратуры не хватало разрешения, и он не мог различать отдельные звезды. Гораздо более убедительные доказательства существования скрытой массы были получены Верой Рубин — астрономом-наблюдателем, которая много позже, в конце 1960-х — начале 1970-х гг. провела детальные количественные измерения движения звезд в далеких галактиках. То, что поначалу казалось «скучным» исследованием — наблюдения за движением звезд в галактиках (Вера обратилась к этой теме только потому, что этим в то время почти никто из астрономов не занимался), — оказалось первым серьезным свидетельством существования во Вселенной скрытой массы. Наблюдения Рубин и Кента Форда дали неопровержимые доказательства того, что Цвикки в давние времена пришел к корректному выводу.

Вам может показаться странным, что человек, посмотрев в телескоп, может увидеть нечто «темное» или «скрытое». Дело в том, что астрономы «видят» не скрытую массу, а ее гравитационное действие на другие объекты. Свойства любой галактики, в частности скорости движения звезд в ней вокруг общего центра, зависят от ее суммарной массы. Если бы во Вселенной не было ничего, кроме видимого вещества, то звезды на дальних пределах галактики и даже далеко за ее пределами должны были бы чувствовать ее гравитационное воздействие в намного меньшей степени. На самом же деле оказалось, что звезды, отстоящие от центра галактики вдесятеро дальше, чем видимый размер светящейся центральной части, обращаются вокруг центра галактики с той же скоростью, что и близкие к центру. А это означает, что плотность массы в галактике практически не уменьшается по мере удаления

от центра — по крайней мере до расстояний вдесятеро больших, чем размер светящейся части.

Астрономы делают вывод о том, что галактики состоят преимущественно из невидимой — «темной» — материи. Светящееся вещество, которое мы наблюдаем, составляет немалую их часть, но большая часть галактики невидима, по крайней мере в обычном смысле этого слова.

Сегодня у нас имеется немало и других косвенных доказательств существования скрытой массы. Пожалуй, самые непосредственные из них основаны на явлении линзирования (рис. 75). Линзирование — явление, возникающее при прохождении света мимо массивного объекта. Даже если сам этот объект не излучает света, то гравитационное воздействие он оказывает. Его гравитация может искривить траекторию прохождения света, излученного обычным, нетемным объектом, расположенным позади него (с нашей точки зрения). Поскольку свет искривляется в разные стороны в зависимости от того, с какой стороны от объекта он проходит, и поскольку мы автоматически считаем траекторию света прямолинейной, линзирование может породить на небе множественные изображения одного и того же яркого объекта. Эти множественные изображения, в свою очередь, позволяют нам «увидеть» темный объект или по крайней мере сделать выводы о его существовании и свойствах, вычислив силу тяготения, необходимую для такого изгибания наблюдаемого света.



РИС. 75. Свет, проходя мимо массивного объекта, может отклоняться от прямого пути, что с точки зрения наблюдателя создает на небе множественные изображения его источника

Возможно, самое сильное доказательство того, что все эти явления объясняются скрытой массой, а не, скажем, модифицированной теорией гравитации, можно видеть в так называемом кластере «Пуля», который представляет собой результат столкновения двух скоплений галактик (рис. 76). По ходу столкновения видно, что скопления содержат звезды, газ и скрытую массу (темная материя). Горячий газ в скоплениях взаимодействует настолько активно, что остатки газа сконцентрировались в центральной зоне столкновения. Темная материя, с другой стороны, не взаимодействует или по крайней мере взаимодействует слабо. Измерения эффектов линзирования показали, что темная материя действительно отделилась от горячего газа в соответствии с моделью, в которой существует слабо взаимодействующая темная материя и активно взаимодействующая обычная материя.



РИС. 76. Кластер «Пуля» (внешне действительно напоминающий летящую пулю) свидетельствует о том, что скопления галактик содержат темную материю и что их динамику вряд ли удастся объяснить при помощи модифицированной теории гравитации. Дело в том, что здесь мы видим разделение между активно взаимодействующим обычным веществом, которое при столкновении двух скоплений собирается в центре, и слабо взаимодействующим темным веществом, которое можно «увидеть» по гравитационному линзированию и которое, очевидно, просто проходит чужое скопление насквозь

Еще одно свидетельство существования скрытой массы исходит от реликтового излучения, о котором мы уже говорили. В отличие от линзирования, измерения этого излучения ничего не говорят нам о распределении скрытой массы. Зато реликтовое излучение сообщает нам суммарное энергетическое содержание скрытой массы: какую именно часть космического «пирога» она составляет по энергетическому показателю.

Измерения реликтового излучения много сообщают нам о ранней Вселенной и снабжают подробной информацией о ее свойствах. Эти исследования говорят в пользу существования не только скрытой массы, но и темной энергии. Согласно уравнениям общей теории относительности Эйнштейна Вселенная может быть «плоской» только в том случае, если она обладает нужным количеством энергии. Материи, даже с учетом всей скрытой массы, просто не хватит, чтобы объяснить ничтожную степень кривизны, измеренную WMAP и приборами на аэростатах. Должна существовать еще какая-то энергия. Темная энергия — единственный способ объяснить «плоскую» Вселенную без доступной измерениям кривизны трехмерного пространства и согласовать теорию с имеющимися на сегодняшний день экспериментальными данными.

Темная энергия, на которую приходится основная часть — приблизительно 70% — всей существующей во Вселенной энергии, ставит перед учеными еще больше проблем, чем скрытая масса. Доказательством, убедившим физическое сообщество в существовании такой энергии, стало открытие того факта, что расширение Вселенной в настоящее время ускоряется — примерно так же, как это происходило в начале времен, в инфляционный период, но гораздо медленнее. В конце 1990-х гг. две независимые команды ученых, работавшие на космическом телескопе «Хаббл» над проектами по космологии сверхновых звезд (Supernova Cosmology Project) и по сверхновым звездам с большими красными смещениями (High-z Supernova Team), удивили ученый мир открытием: скорость расширения Вселенной более не уменьшается, а наоборот, увеличивается.

До измерений сверхновых было получено несколько намеков на существование загадочной недостающей энергии, но доказа-

тельства были слишком слабыми. Однако в 1990-е гг. тщательные измерения показали, что отдаленные сверхновые звезды светят более тускло, чем ожидалось. Конкретный тип сверхновых отличается достаточно одинаковой и, главное, предсказуемой интенсивностью излучения, поэтому объяснить необычный фактор можно было только чем-то новым. И этим новым стало, судя по всему, ускоренное расширение Вселенной, то есть сейчас считается, что Вселенная расширяется со все большей скоростью.

Ускорение, о котором идет речь, не могло возникнуть из-за обычного вещества, гравитационное притяжение которого, наоборот, должно было бы замедлять расширение Вселенной. Единственным объяснением может быть Вселенная, расширяющаяся инфляционно, но с гораздо меньшей энергией, чем во время уже пережитой когда-то фазы космологической инфляции. Причиной ускорения может быть только какая-то сущность, играющая роль введенной Эйнштейном космологической константы, или, как ее называли теперь, темная энергия.

В отличие от вещества, темная энергия оказывает на окружающее отрицательное давление. Обычное положительное давление побуждает вещество сжиматься, тогда как отрицательное давление вызывает все более быстрое расширение. Самый очевидный кандидат на роль источника отрицательного давления — космологическая постоянная Эйнштейна, представляющая энергию и давление, которые пронизывают Вселенную, но не связаны с веществом. Темная энергия — это более общий термин, которым мы в настоящее время пользуемся; тем самым мы допускаем, что соотношение между энергией и давлением, выраженное космологической константой, является не точным, а лишь приближенным.

Сегодня считается, что темная энергия — основной компонент энергии Вселенной. Это тем более замечательно, что плотность темной энергии, оказывается, чрезвычайно мала. Темная энергия доминирует во Вселенной на протяжении лишь нескольких последних миллиардов лет. До этого в эволюции Вселенной главную роль играли сначала излучение, затем вещество. Но плотность излучения и вещества снижается по мере их распределения по объему все расширяющейся Вселенной. С другой стороны, плотность темной

энергии остается постоянной, несмотря на расширение. За то время, пока Вселенная достигла своего нынешнего возраста, плотность энергии в виде излучения и материи уменьшилась настолько, что на передний план вышла темная энергия, которая не «растекается» по растущему объему и не снижает своей плотности. Несмотря на невероятно низкую плотность темной энергии, когда-нибудь она обязательно должна была перехватить лидерство. И вот после 10 млрд лет все более медленного расширения Вселенная наконец почувствовала влияние темной энергии и начала увеличивать скорость расширения. Со временем во Вселенной не останется ничего, кроме энергии вакуума, а ее расширение достигнет соответствующей скорости (рис. 77). Возможно, эта «кроткая» энергия и не будет определять развитие Земли, но Вселенную она, скорее всего, действительно получит в свое распоряжение.

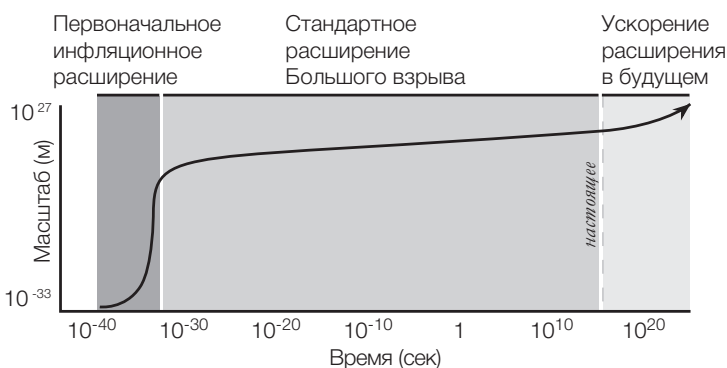


РИС. 77. Вселенная в разное время своего существования расширялась по-разному. В инфляционной фазе она расширялась экспоненциально. После окончания инфляции началось расширение, соответствующее традиционной теории Большого взрыва. Теперь темная энергия заставляет скорость расширения вновь увеличиваться

ДАЛЬНЕЙШИЕ ЗАГАДКИ

Темная энергия и скрытая масса говорят о том, что мы не так уж преуспели в разгадке эволюции Вселенной, несмотря на невероятное совпадение космологической теории и ее прогнозов с экс-

периментальными данными. Большую часть Вселенной составляет нечто такое, о сущности и составе чего мы не можем ничего сказать. Лет через 20, может быть, наше сегодняшнее невежество будет вызывать лишь улыбку.

И это не единственная загадка, связанная с энергией Вселенной. Величина темной энергии, в частности, на самом деле представляет собой всего лишь «хвост» куда более значительной загадки: почему энергия, которая пронизывает всю Вселенную, так мала? Если бы ее суммарная величина была больше, она гораздо раньше по ходу эволюции Вселенной взяла бы верх над веществом и излучением, и структура Вселенной (и, естественно, жизнь в ней) не успела бы сформироваться. Кроме того, никто не знает, откуда раньше взялась огромная плотность той же энергии, запустившая и питавшая инфляционные процессы. Но самая крупная проблема, связанная с энергией Вселенной, — это проблема космологической постоянной.

Если исходить из квантовой механики, объем темной энергии должен был бы составлять куда большую величину и в инфляционный период, и сегодня. Квантовая механика учит нас, что вакуум — состояние, в котором нет постоянных частиц — на самом деле заполнен эфемерными частицами, которые то возникают, то исчезают вновь. Эти короткоживущие частицы могут обладать любой энергией — иногда настолько большой, что гравитационными эффектами от присутствия такой частицы уже нельзя пренебречь. Высокоэнергетические частицы придают вакууму необычайно большую энергию — намного большую, чем позволяет долгая эволюция Вселенной. Чтобы Вселенная выглядела именно так, как сейчас, объем энергии вакуума должен быть фантастически — на 120 порядков (!) — меньше, чем можно было бы ожидать исходя из законов квантовой механики.

Существует и еще один вопрос, связанный с этой задачей. Случайно ли мы живем именно в такое время, когда плотности энергии, связанной с веществом, скрытой массой и темной энергией, сравнимы между собой? Конечно, сейчас темная энергия преобладает над веществом, но менее чем втрое. Имея в виду, что все три вида энергии имеют принципиально разное проис-

хождение и любой из них мог бы взять верх над остальными, тот факт, что их плотности близки, представляется чрезвычайно загадочным. Странность такого совпадения особенно заметна потому, что так дело обстоит только в наше время (грубо говоря). Ранее во Вселенной темная энергия играла заметно меньшую роль в общем балансе, а материя — большую. Спустя какое-то время энергия будет играть намного более серьезную роль. Только сегодня все три компонента — обычное вещество, скрытая масса и темная энергия — сравнимы между собой.

Вопросы о том, почему плотность энергии настолько мала и почему разные источники энергии вносят сегодня почти равный вклад в общий баланс, не получили пока никакого ответа. Более того, некоторые физики считают, что настоящего ответа на них не существует. Они уверены, что мы живем во Вселенной с таким маловероятным объемом энергии вакуума просто потому, что любой больший объем не позволил бы во Вселенной сформироваться галактикам и другим структурам, а соответственно, и нам тоже. Нас бы не существовало, и некому было бы задавать вопросы об объеме энергии в какой-то иной вселенной с иной величиной космологической постоянной. Эти физики считают, что вселенных множество и в каждой из них свой объем темной энергии. Но из всего множества вселенных только в тех, где могли возникнуть структуры, мог зародиться разум. Объем энергии в нашей Вселенной до смешного мал, но мы могли возникнуть и существовать только в таком мире. Это все тот же *антропный принцип*, который мы обсуждали в главе 18, и я уже тогда сказала, что меня он не убеждает. Тем не менее ни я и никто другой не может предложить лучшего ответа. Объяснение малой плотности темной энергии — возможно, самая главная на сегодняшний день загадка физики элементарных частиц и космологии.

Помимо загадок, связанных с энергией, у нас есть и космологическая загадка, связанная с веществом. Почему во Вселенной вообще имеется материя? Согласно нашим уравнениям вещество и антивещество равноправны. Сталкиваясь друг с другом, они аннигилируют и исчезают. По идее, после остывания Вселенной не должно было остаться ни вещества, ни антивещества.

Если скрытая масса не очень охотно вступает во взаимодействие и потому никуда не исчезает, то обычное вещество достаточно активно участвует в сильном взаимодействии. Без экзотических дополнений к Стандартной модели почти все наше обычное вещество к моменту остывания Вселенной до нынешней температуры должно было бы исчезнуть. Единственная причина, по которой вещество могло сохраниться, — это явное преобладание вещества над антивеществом. Но простейшие версии наших теорий не предусматривают ни преобладания, ни какого бы то ни было преимущества. Необходимо установить причины, по которым протоны, существуя, не могут отыскать вокруг антипротоны, с которыми можно было бы аннигилировать. Где-то в систему должна быть встроена асимметрия между веществом и антивеществом.

Да, количество оставшегося вещества в несколько раз меньше, чем скрытой массы, но все же именно на видимое вещество приходится заметная доля массы Вселенной, не говоря уже о том, что оно есть источник всего, что мы все знаем и любим. Как и когда возникла асимметрия между веществом и антивеществом — еще один серьезный вопрос, с которым специалистам по физике элементарных частиц и космологам очень хотелось бы разобраться.

Вопрос о том, что представляет собой скрытая масса, тоже, естественно, сохраняет принципиальную важность. Возможно, когда-нибудь мы обнаружим, что фундаментальная модель связывает плотность скрытой массы с плотностью обычного вещества, на что, вероятно, намекают недавние исследования. Во всяком случае, мы надеемся, что вскоре эксперименты помогут нам больше узнать о скрытой массе. Об этих-то экспериментах мы сейчас и поговорим.

ГОСТИ С ТЕМНОЙ СТОРОНЫ

Когда главный инженер проекта БАКа Лин Эванс в январе 2010 г. выступал на калифорнийской конференции по БАКу и скрытой массе, завершил он свое выступление шутливой провокацией. Посетовав, что последние пару десятков лет «вы, теоретики, вслепую блуждали в темноте», он заявил: «Теперь я понимаю, зачем потратил 15 лет на строительство БАКа». Говоря все это, Лин, естественно, имел в виду дикую нехватку достоверных данных о высокоэнергетических процессах, от которой в предыдущие годы страдали все физики без исключения. При этом в его словах можно было усмотреть и намек на то, что сделанные на БАКе открытия, возможно, прольют свет на темную материю.

Между физикой элементарных частиц и космологией существует множество связей, но одно из самых интересных предположений гласит, что скрытая масса — это таинственное вещество — может возникать на энергиях, доступных для БАКа. Интересно, что если существуют стабильные частицы с массой масштаба слабого взаимодействия, то количество энергии в таких частицах (родились они во времена молодости Вселенной и дожили до наших дней) примерно соответствовало бы тому, что ученые ожидают от скрытой массы. Результаты вычислений количества скрытой массы, оставшейся от изначально горячей — но остывающей — Вселенной, показывают, что дело, возможно, обстоит именно так. Это означает, что не только сама скрытая масса может обнаружиться у нас прямо под носом, но и указания на ее природу тоже

находятся где-то совсем рядом. Если скрытая масса в самом деле состоит из частиц с массой масштаба слабого взаимодействия, то не исключено, что БАК не только позволит нам ответить на вопросы о физике этой частицы, но и даст указания на то, что находится в огромной Вселенной и как все началось; без этих вопросов космология немыслима.

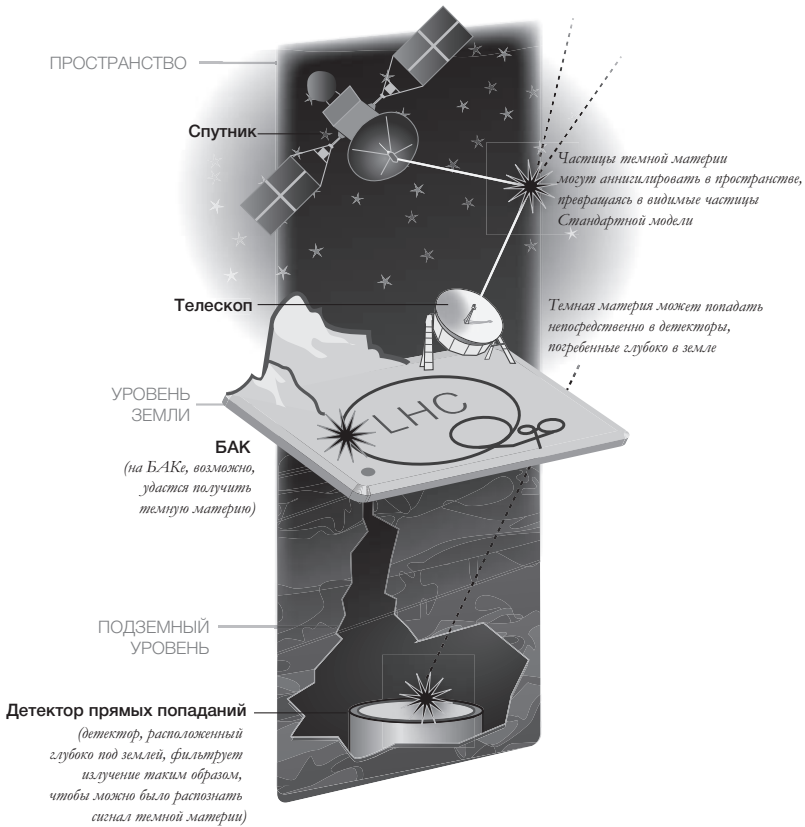


РИС. 78. Поиск скрытой массы идет в трех направлениях. Подземные детекторы пытаются непосредственно засечь столкновения частиц темной материи с ядрами-мишенями. Возможно, на БАКе удастся получить частицы скрытой массы, которые оставят след в его экспериментальных установках. А спутники и телескопы, может быть, засекут в космосе свидетельства аннигиляции частиц скрытой массы с образованием видимого вещества

Но эксперименты на БАКе — не единственный способ поиска скрытой массы. Факт состоит в том, что физика в настоящее время вступила в потенциально очень интересную эру новых данных, причем не только в области физики элементарных частиц, но и в области астрономии и космологии. В этой главе объясняется, как именно в ближайшее десятилетие будет идти поиск скрытой массы; речь пойдет о трех направлениях поиска. Сначала предстоит выяснить, почему самыми вероятными кандидатами на роль скрытой массы являются частицы с массой масштаба слабого взаимодействия; после этого надо подумать, как получить на БАКе эти частицы и опознать их, если эта гипотеза верна. Затем мы рассмотрим, как приборы, специально разработанные для поиска частиц темной материи, пытаются отследить их прибытие на Землю и зарегистрировать их слабые, но потенциально различимые взаимодействия. Наконец, мы рассмотрим способы, при помощи которых телескопы и детекторы на земле и в космосе ищут в небе следы аннигиляции частиц темной материи. Все три способа поиска скрытой массы показаны на рис. 78.

ПРОЗРАЧНОЕ ВЕЩЕСТВО

Нам известна плотность скрытой массы, известно, что она холодная (то есть движется медленно по отношению к скорости света), что взаимодействует в лучшем случае чрезвычайно слабо и наверняка не дает никакого значимого взаимодействия со светом. И это практически все, что мы знаем. Темная материя прозрачна. Мы не знаем ее массы, не знаем, вступает ли она в какие-то взаимодействия помимо гравитационных, не знаем, как она возникла. Нам известна ее средняя плотность: может быть, в объеме нашей Галактики на каждый кубический сантиметр приходится по одной массе протона, а может, компактные объекты с массой, соответствующей тысяче триллионов протонных масс, равномерно распределены по Вселенной — по одному на каждый кубический километр. Средняя плотность вещества в том и другом случае окажется одинаковой, да и вещества для инициации формирования структур хватит в любом случае.

Таким образом, мы знаем, что скрытая масса существует, но не имеем представления о ее природе. Это могли бы быть, к примеру, маленькие черные дыры или объекты из других измерений. Скорее всего, это просто новая элементарная частица, которая не вступает в обычные взаимодействия, характерные для частиц Стандартной модели: к примеру, стабильное нейтральное проявление новой физической теории масштаба слабого взаимодействия, которая, возможно, будет скоро открыта. Даже если дело обстоит именно так, нам все же хотелось бы знать, каковы свойства частицы, составляющей темную материю: какова ее масса, как она взаимодействует и не является ли она частью некоего неизвестного пока класса частиц.

Одна из причин, по которым сегодня так популярна интерпретация скрытой массы как элементарной частицы, заключается в том, что в пользу этой гипотезы говорят уже упоминавшиеся факты — обилие скрытой массы во Вселенной и значительная доля приходящейся на нее энергии. Удивительно также, что для стабильной частицы с массой, примерно соответствующей масштабу слабого взаимодействия, который предстоит исследовать БАКу (опять же через формулу $E = mc^2$) *реликтовая плотность* на сегодня, то есть доля энергии, которая должна была бы приходиться во Вселенной на эти частицы по расчету, примерно соответствует тому, что должно быть для темной материи.

Логика здесь примерно следующая. По мере развития Вселенной температура в ней падала. Тяжелые частицы, которых в горячей Вселенной было множество, в более поздней и более холодной Вселенной оказались сильно рассеяны, потому что при более низких температурах на их создание просто не хватает энергии. Как только температура упала в достаточной мере, тяжелые частицы постепенно аннигилировали с тяжелыми античастицами, так что исчезали и те и другие, а вот процесс рождения тех и других почти прекратился. Из-за аннигиляции по мере остывания Вселенной численная плотность тяжелых частиц падала очень быстро.

Разумеется, чтобы аннигилировать, частицы и античастицы должны сначала встретиться*, но с уменьшением их числа и ро-

* Некоторые частицы темной материи совпадают со своими античастицами. В этом случае они должны встретиться с другими такими же частицами. — *Прим. авт.*

стом рассеяния вероятность такой встречи тоже многократно уменьшилась. Вследствие этого частицы на поздней стадии эволюции Вселенной аннигилировали намного менее эффективно.

В результате на сегодняшний день во Вселенной могло остаться значительно больше стабильных частиц с массой масштаба слабого взаимодействия, чем позволило бы предположить наивное применение законов термодинамики; в какой-то момент частицы и античастицы настолько разбрелись по пространству, что просто не могут встретиться и уничтожить друг друга. Сколько таких частиц осталось на сегодняшний день, зависит от массы и характера взаимодействий предполагаемого кандидата на роль скрытой массы. Физики умеют вычислять реликтовую плотность при известных характеристиках. Загадочный и замечательный факт состоит в том, что для стабильных частиц с массой масштаба слабого взаимодействия реликтовая плотность как раз и получается примерно такой, чтобы эти частицы могли играть роль скрытой массы.

Конечно, поскольку мы не знаем ни точной массы частицы, ни точных параметров ее взаимодействий (не говоря уже о модели, к которой она может принадлежать), мы пока не можем сказать, насколько точно сойдутся у нас численные данные. Но счастливое, хотя и приблизительное, численное соответствие между двумя явлениями, которые на первый взгляд представляются совершенно независимыми, интригует и вполне может оказаться свидетельством того, что именно физика слабых взаимодействий способна объяснить наличие во Вселенной скрытой массы.

Такой тип кандидатов на роль скрытой массы получил известность как *WIMP* (*Weakly Interacting Massive Particle* — слабо взаимодействующая массивная частица). Слово «слабый» здесь выступает в роли описательного термина, а не отсылки к слабому взаимодействию: любая *WIMP*-частица вступает во взаимодействие еще менее охотно, чем нейтрино. Без дополнительных данных о темной материи и ее свойствах — данных, которые, возможно, удастся получить на БАКе — мы не сможем установить, действительно ли скрытая масса представляет собой *WIMP*. Именно для этого, кстати говоря, и нужны экспериментальные исследования.

СКРЫТАЯ МАССА И БАК

Интригующая возможность получить образец темной материи — одна из главных причин, по которым космологов интересует физика масштаба слабого взаимодействия и перспективы БАКа. Энергии, которые будут достигнуты на БАКе, как раз подходят для поиска WIMP. Если скрытая масса в самом деле состоит из частиц, связанных с масштабом слабого взаимодействия, как позволяют предположить расчеты, не исключено, что эти частицы действительно удастся получить на Женевском коллайдере.

Однако даже в этом случае нет никакой гарантии, что частицы темной материи будут обнаружены. В конце концов, темная материя почти не вступает во взаимодействие с частицами Стандартной модели, а потому получить ее непосредственно в коллайдере или обнаружить при помощи детектора наверняка не удастся. Даже если нужная частица будет получена, она пролетит через детектор насквозь и не оставит никаких следов. Тем не менее отчаиваться рано, даже если частица скрытой массы улизнет от нас. Любое решение проблемы иерархии будет связано с другими частицами, большинство из которых взаимодействуют гораздо активнее. Некоторые из них, возможно, удастся получить не один раз, а при их распаде, опять же возможно, получится частица темной материи, которая затем улетит, унося с собой часть импульса и энергии.

Лучше всего из моделей слабого масштаба, о которых идет речь и которые могут естественным образом содержать достойного кандидата на роль темной материи, изучены на данный момент суперсимметричные модели. Если суперсимметрия действительно применима к нашему миру, то вполне возможно, что именно легчайшая суперсимметричная частица LSP и составляет темную материю. Эта легчайшая частица, несущая нулевой электрический заряд, взаимодействует слишком слабо и возникает сама по себе слишком редко, чтобы ее можно было обнаружить. Однако глюино, суперсимметричные партнеры переносчиков сильного взаимодействия глюонов, и скварки, суперсимметричные партнеры кварков, по идее должны возникать, если они в принципе суще-

ствуют и находятся в подходящем диапазоне масс. Как уже обсуждалось в главе 17, обе эти суперсимметричные частицы в конце концов должны распадаться с образованием LSP. Так что, несмотря на то что частицы темной материи не получится создать непосредственно, они должны все же возникать при распаде других, более часто встречающихся частиц с достаточной частотой, чтобы их можно было обнаружить.

Другие гипотезы о темной материи в слабом масштабе, имеющие проверяемые следствия, придется разрабатывать примерно так же. Масса частицы, составляющей темную материю, так или иначе должна лежать в диапазоне слабого взаимодействия, изучением которого займется БАК. Эти частицы не удастся получить непосредственно из-за их слабой активности, но многие модели предусматривают существование других частиц, которые должны распадаться, образуя именно темные частицы. В этом случае нам, возможно, удастся убедиться в существовании частицы темной материи, а также узнать ее массу по недостающему импульсу.

Обнаружение темной материи на БАКе было бы, безусловно, серьезным достижением. Ученые смогли бы подробно исследовать хотя бы некоторые из ее свойств. Однако для того, чтобы по-настоящему убедиться в том, что обнаруженная частица в самом деле составляет темную материю, потребуются дополнительные доказательства, которые нам, может быть, помогут получить наземные и космические детекторы.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НЕПОСРЕДСТВЕННОМУ ОБНАРУЖЕНИЮ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Перспектива получить темную материю в коллайдере, несомненно, вызывает сильнейший интерес. Но следует заметить, что большинство космологических экспериментов проходит не в ускорителях. Ответы на космологические вопросы и информацию, которая помогает хотя бы чуть лучше разобраться в ситуации, чаще всего получают в ходе специальных экспериментов на Земле и в космосе, посвященных астрономическим вопросам и поиску темной материи.

Конечно, темная материя почти не взаимодействует с обычным веществом, поэтому поиски, ведущиеся в настоящее время, основаны на достаточно вольном предположении о том, что темная материя, несмотря на почти полную невидимость, тем не менее взаимодействует — слабо, но реально — с известным нам веществом (из которого мы, кстати говоря, можем построить детекторы). И это не просто попытка принять желаемое за действительное. Это предположение основано на некоторых расчетах, связанных с реликтовым излучением (о них уже упоминалось ранее); эти расчеты показывают, что если темная материя связана с моделями, предложенными для решения проблемы иерархии, то плотность оставшихся частиц вполне соответствует результатам наблюдения за темной материей. Многие WIMP-кандидаты на роль темной материи, предложенные на основании этих расчетов, взаимодействуют с частицами Стандартной модели с частотой, которую, вполне возможно, удастся обнаружить при помощи современных детекторов.

Но даже в этом случае, поскольку темная материя чрезвычайно неохотно вступает во взаимодействие, для ее поиска потребуются либо громадные детекторы на Земле, либо очень чувствительные детекторы (на Земле или в космосе), которые будут искать продукты, возникающие при встрече и аннигиляции темной материи, а также при рождении новых частиц и античастиц. Вероятность выиграть в лотерею, купив всего один билетик, очень мала, но если приобрести больше половины всех имеющихся билетиков, то у игрока будут очень неплохие шансы. Точно так же очень большой детектор, судя по всему, имеет шанс обнаружить темную материю, хотя вероятность того, что темное вещество взаимодействует с каждым конкретным ядром в детекторе, чрезвычайно мала.

Сложнее всего детектору будет зарегистрировать нейтральные — незаряженные — частицы темной материи, а затем отличить их от космических лучей или другого фонового излучения. Частицы, не несущие на себе заряда, не взаимодействуют с детектором традиционными способами. Чтобы частица темной материи оставила след в детекторе, нужно, чтобы она столкнулась с атомными ядрами в детекторе и хотя бы чуть-чуть поменяла

их энергию. Поскольку это будет единственным наблюдаемым следствием такого пролета, детекторы темной материи поневоле должны будут регистрировать крохотные количества тепловой энергии или энергии отдачи, переданной детектору. Чтобы зафиксировать и измерить эту энергию, детекторы должны быть либо очень холодными, либо очень чувствительными.

Очень холодные устройства, известные как криогенные детекторы, регистрируют небольшое количество тепла, которое выделяется при входе частицы темной материи в аппарат. Небольшое количество тепла, полученное и без того горячим детектором, было бы слишком трудно заметить, но специально разработанные холодные детекторы на это способны. Криогенные детекторы изготавливают с применением кристаллического поглотителя, такого как германий. Среди экспериментальных установок такого рода можно назвать CDMS (Cryogenic Dark Matter Search — криогенный детектор темной материи), CRESST и EDELWEISS.

К другому классу детекторов непосредственного действия относятся детекторы на инертных газах в жидком состоянии. Темная материя непосредственно не взаимодействует со светом, но энергия, получаемая атомом ксенона или аргона при столкновении с ним частицы темной материи, может вызвать характерную вспышку. Эксперименты с ксеноном включают XENON100 и LUX, среди экспериментальных установок с другими благородными жидкостями можно назвать ZEPLIN и ArDM.

В теоретическом и экспериментальном физических сообществах каждый желает знать, какие новые результаты ожидаются от этих экспериментов. Мне повезло побывать на конференции по темной материи в Санта-Барбаре, организованной в декабре 2009 г. двумя учеными — Дагом Финкбейнером и Нилом Вейнером; в то время CDMS, один из наиболее чувствительных экспериментов по регистрации темного вещества, как раз должен был выдать новые результаты. Даг и Нил — молодые друзья-ровесники, одновременно получившие магистерские степени в Беркли; мало того, они к тому же оба прекрасно разбираются в экспериментах по темной материи и в том, каких результатов от них можно ожидать. Нил занимался в основном физикой элементарных ча-

стиц, а Даг — астрофизикой, но тема темной материи объединила их обоих. На конференции им удалось собрать теоретиков и экспериментаторов — ведущих специалистов по этому вопросу.

Самая интересная лекция состоялась как раз в то утро, когда я туда приехала. Гарри Нелсон, профессор Университета Калифорнии в Санта-Барбаре, рассказывал о прошлогодних результатах CDMS. Вы, возможно, удивитесь, что рассказ о довольно старых уже результатах привлек столько внимания. Причина проста: все присутствующие знали, что всего через три дня будут опубликованы новые данные по этому эксперименту. Ходили активные слухи о том, что ученые CDMS получили реальные и весьма убедительные свидетельства открытия, так что всем хотелось лучше понять суть эксперимента. Много лет теоретики слушали разговоры о детекторах темной материи и соответствующих экспериментах, но, как правило, обращали внимание только на результат, а не на технические подробности самого эксперимента. Но теперь, когда до открытия темной материи, казалось, было рукой подать, теоретикам хотелось узнать побольше. Через несколько дней результаты действительно были опубликованы и разочаровали аудиторию с ее сильно преувеличенными ожиданиями. Но в день лекции всем было ужасно интересно. Гарри хватило терпения завершить свой обзор, несмотря на постоянные отвлекающие вопросы о новых результатах.

Поскольку лекция проходила в формате двухчасовой неформальной презентации, присутствующие могли прерывать лектора в любой момент, если это было необходимо для лучшего понимания. Гарри прекрасно объяснил все, что могло заинтересовать аудиторию, состоявшую преимущественно из специалистов по физике элементарных частиц, — ведь сам он по образованию тоже был таким специалистом, а не астрономом, и говорил с нами на одном языке.

Надо сказать, что в сложнейших экспериментах, связанных с поисками темной материи, дьявол, как всегда, кроется в деталях. Гарри дал нам это понять совершенно определенно. Эксперимент CDMS основан на продвинутой технологии низкоэнергетической физики — той самой, что традиционно называют физикой кон-

денсированных состояний или физикой твердого тела. Гарри рассказал, что сам до вступления в коллаборацию ни за что бы не поверил, что такие тонкие измерения вообще возможны, и пошутил, что его коллегам-экспериментаторам следует радоваться, что первоначальное решение об эксперименте зависело не от него.

CDMS работает совершенно иначе, нежели сцинтилляционные детекторы на ксеноне и иодиде натрия. Он содержит кусочки германия или кремния размером с хоккейную шайбу, увенчанные точнейшим устройством регистрации, роль которого выполняет фоновый датчик. Детектор работает при очень низкой температуре — где-то на самой границе сверхпроводимости. Даже небольшого количества тепла, приносимого фонами (фоны — акустические квазичастицы, переносящие энергию через германий или кремний, примерно как фотоны переносят энергию света), может оказаться достаточно, чтобы вывести детектор из состояния сверхпроводимости и зарегистрировать событие, потенциально связанное с темным веществом, при помощи устройства под названием *SQUID* (*Superconducting Quantum Interference Device* — сверхпроводящее устройство квантовой интерференции). Эти устройства чрезвычайно чувствительны и очень хорошо измеряют переданную энергию.

Но зарегистрировать событие недостаточно. Экспериментаторам необходимо убедиться, что детектор «увидел» действительно темную материю, а не просто фоновое излучение. Проблема состоит в том, что излучает все вокруг. Мы сами излучаем. Компьютер, на котором я печатаю эту книгу, излучает. Книга (бумажная или электронная), которую вы читаете, излучает. Пота с одного единственного пальца экспериментатора достаточно, чтобы забить помехами любой сигнал от темной материи. И это без учета всевозможных естественных и рукотворных радиоактивных веществ. Окружающая среда и воздух, как и сам материал детектора, являются источниками излучения. В детектор могут попасть космические лучи. Медленные нейтроны в грунте запросто могут изобразить из себя темную материю. Мюоны космических лучей могут попасть в породу и породить веер частиц, в том числе и нейтронов, которые тоже могут выглядеть, как темная материя. В об-

щем, фоновых электромагнитных событий в детекторе происходит в 1000 раз больше, чем предсказанных сигнальных событий, даже при достаточно оптимистичных предположениях о массе и силе взаимодействия частиц темной материи.

Так что главное занятие экспериментаторов, занятых поиском темной материи, — *экранирование и дискриминация*. (Это астрофизический термин. В физике элементарных частиц это называют более наукообразно — *идентификация частиц*, хотя я не уверена, что в наши дни это звучит намного лучше.) Экспериментаторы стремятся как можно лучше экранировать свое устройство, чтобы отсеять излучение и отличить потенциальные события, связанные с темным веществом, от совершенно неинтересного радиационного рассеяния в детекторе. Отчасти экранирование обеспечивается тем, что подобные установки размещают в шахтах глубоко под землей. Идея в том, что космические лучи, прежде чем добраться до детектора, имеют хорошие шансы взаимодействовать с чем-нибудь в грунте. С другой стороны, темная материя, которая взаимодействует гораздо менее охотно, доберется до детектора без помех.

К счастью для ученых, шахт и тоннелей существует вполне достаточно. Эксперимент DAMA, а также эксперименты под названиями XENON10, XENON100 (более крупная версия) и CRESST (детектор с использованием вольфрама) проводятся в лаборатории GranSasso, расположенной в Италии в тоннеле на глубине около 3000 м под землей. Другую установку на базе ксенона, получившую название LUX, предполагается разместить на глубине 1500 м в бывшей золотоносной шахте Хоумстейк в штате Южная Дакота. Этот эксперимент пройдет в той самой пещере, где Рэй Дэвис открыл нейтрино, возникающие в ходе ядерных реакций в глубинах Солнца. Эксперимент CDMS располагается в суданской шахте на глубине около 750 м.

И все же многих сотен метров грунта над шахтами и тоннелями недостаточно, чтобы гарантировать отсутствие лишнего излучения вокруг детектора. Ученым приходится дополнительно экранировать свои установки различными способами. Детектор CDMS заключен в кожух из полиэтилена, который светится при попа-

дании в него извне чего-то более активно взаимодействующего, чем темная материя. Еще интереснее кожух из свинца, взятого с затонувшего в XVIII в. французского галеона. У старого свинца, пролежавшего несколько столетий в воде, было достаточно времени, чтобы избавиться от собственной радиоактивности. Это плотный поглотитель, идеальный для экранирования детектора от внешнего излучения.

Несмотря на все меры предосторожности и барьеры, до детекторов добирается немало квантов электромагнитного излучения. Чтобы отличить это излучение от потенциальных кандидатов на роль темной материи, требуется дальнейшая дискриминация. Взаимодействия частиц темной материи напоминают ядерные реакции, возникающие при попадании нейтрона в мишень. Поэтому напротив регистратора фононов располагается более традиционный детектор элементарных частиц, который измеряет ионизацию, возникающую при пролете предполагаемой частицы темной материи сквозь германий или кремний. Вместе два измеренных параметра (ионизация и энергия фонона) позволяют отличить ядерные процессы — подходящие события, которые могут указывать на присутствие темной материи — от событий, вызванных электронами и представляющих собой результат действия радиоактивности.

Среди других интересных особенностей установки CDMS — точное определение координат и времени события. Непосредственно его координаты определяются только в двух направлениях, но момент прохождения фононов дает положение и по третьей координате. Так что экспериментаторы могут точно определить, где произошло событие, и исключить фоновые события на поверхности. Еще одна особенность — то, что установка сегментирована на отдельные стопки детекторов размером с хоккейную шайбу. Истинное событие произойдет лишь в одном из этих детекторов, излучение же от местного источника может затронуть несколько детекторов сразу. Все это дает CDMS и следующей, еще лучше проработанной установке, неплохие шансы обнаружить темную материю.

Тем не менее, как бы впечатляюще ни выглядел эксперимент CDMS, он вовсе не является единственным детектором темной ма-

терии, да и криогенные устройства — не единственный тип таких детекторов. Через несколько дней после лекции Гарри о своих экспериментах XENON10 и XENON100, а также о других экспериментах с благородными жидкостями рассказала и Елена Апрель, одна из пионеров работы с ксеноном. Поскольку вскоре эти установки должны стать самыми чувствительными детекторами темной материи, аудитория слушала очень внимательно.

В ксеноновых установках события, связанные с темным веществом, регистрируются за счет сцинтилляций. Жидкий ксенон представляет собой плотную гомогенную жидкость, обладает высокой атомной массой (что повышает вероятность взаимодействия с темным веществом), хорошо вспыхивает, легко ионизируется при получении энергии, так что описанные выше два типа сигналов можно эффективно отличать от электромагнитных событий, и к тому же относительно дешевле по сравнению с другими пригодными для этой цели материалами (хотя за десять лет его цена увеличилась вшестеро). Эксперименты подобного типа с благородными газами стали намного масштабнее и эффективнее, к тому же их возможности далеко не исчерпаны. Когда вещества больше, вероятность желаемого события выше; кроме того, при помощи внешней части детектора можно более эффективно экранировать его внутреннюю часть, что помогает обеспечить значимость результата.

Измерив ионизацию и мощность первоначальной вспышки, экспериментаторы получают возможность отсеять фоновое излучение. В эксперименте XENON100 для измерения осцилляций используются особые фототрубки, созданные для работы в низкотемпературной среде детектора под высоким давлением. Аргонные детекторы в будущем могли бы обеспечить еще более точную информацию о сцинтилляциях, поскольку в них устанавливается точная форма вспышки как функция времени, и это также поможет в дальнейшем отделить зерна от плевел.

Сегодня дело обстоит довольно странным образом (хотя положение может измениться в самом ближайшем будущем): дело в том, что один из сцинтилляционных экспериментов — DAMA в лаборатории Gran Sasso в Италии — зарегистрировал сигнал.

В приборе DAMA, в отличие от описанных только что экспериментов, не предусмотрено внутреннего различия сигнала и фона. Считается, что сигнал от событий с участием темной материи можно распознать исключительно по его временной форме, если применить для этого характерную зависимость, связанную с движением Земли по околосолнечной орбите.

Скорость прилетающих извне частиц темной материи имеет значение, потому что именно от нее зависит, сколько энергии выделяется в детекторе. Если энергия слишком мала, эксперимент окажется не очень чувствительным и может просто не заметить появления частицы. Если энергия выше, вероятность того, что установка зарегистрирует событие, также повышается. Из-за движения Земли по орбите скорость темной материи по отношению к нам (а следовательно, и энергия, переданная детектору) зависит от времени года, и в некоторые сезоны (летом) сигнал увидеть проще, чем в другие (зимой). Эксперимент DAMA ищет регулярные сезонные колебания в частоте событий, которые согласуются с прогнозами, и его данные говорят о том, что такой сигнал обнаружен (на рис. 79 показаны данные DAMA).

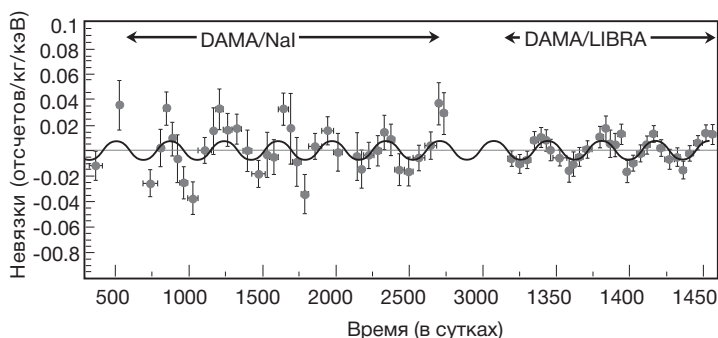


РИС. 79. Данные эксперимента DAMA показывают модуляцию сигнала во времени

Никто пока не может сказать наверняка, является ли сигнал DAMA признаком темной материи или объясняется каким-то непониманием работы детектора или недооценкой внешних влияний. Ученые настроены скептически, потому что ни один из остальных экспери-

ментов пока ничего не обнаружил. Отсутствие подтверждений плохо согласуется с прогнозами большинства моделей скрытой массы.

Пока ничего не понятно, но именно такого рода вещи делают науку интересной. Результат заставляет задуматься о том, что скрытую массу могут составлять несколько различных типов вещества; кроме того, темная материя может обладать какими-то свойствами, которые облегчают ее обнаружение именно в эксперименте DAMA*. Такие результаты заставляют нас лучше изучать собственные установки и разбираться во всех их особенностях, только тогда мы сможем отфильтровать случайные сигналы и сказать, что данные эксперимента означают именно то, что утверждают экспериментаторы.

Ученые по всему миру работают над повышением чувствительности своих установок, чтобы можно было либо исключить, либо подтвердить открытие темной материи детектором DAMA. А может быть, им удастся независимо открыть другой тип темной материи. Все согласились бы с тем, что темная материя наконец открыта, если бы хотя бы один эксперимент подтвердил данные DAMA, но пока ничего подобного не произошло. Тем не менее есть шанс, что ответы на эти вопросы будут получены в самом ближайшем будущем. Даже если к моменту, когда вы будете читать эту книгу, изложенные выше результаты уже устареют, характер и методики экспериментов по-прежнему будут актуальны.

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКА ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

Эксперименты на БАКе и наземных криогенных детекторах или на ксеноне и аргоне — два способа определить природу темной материи. Третий и последний способ — определить ее путем *непрямых наблюдений* темной материи в небе и на земле.

Темная материя во Вселенной очень разрежена, но иногда она все же аннигилирует сама по себе или с участием соответствующей античастицы. Это происходит недостаточно часто, чтобы

* Аномальные события были зарегистрированы экспериментами COGENT, CRESST и усовершенствованным CDMSII. К сожалению, в рамках наиболее мотивированных и разработанных моделей темной материи эти аномалии противоречат результатам других экспериментов — и друг другу, в частности. — *Прим. науч. консульт.*

заметно изменить среднюю плотность темной материи, но даже этих нечастых событий может оказаться достаточно, чтобы породить измеримый сигнал. Дело в том, что при аннигиляции частиц темной материи рождаются новые частицы, которые уносят прочь их энергию. В некоторых случаях, в зависимости от природы темной материи, при ее аннигиляции могут родиться обнаружимые частицы и античастицы Стандартной модели, такие как электроны и позитроны или пары фотонов. Тогда астрофизические детекторы, способные регистрировать античастицы или фотоны, возможно, «увидят» и признаки этих аннигиляций.

Инструменты, занятые сейчас поиском продуктов аннигиляции темной материи, первоначально предназначались совсем не для этой цели. Они были задуманы как телескопы или детекторы (космические или наземные) для регистрации света или частиц; ученые просто хотели лучше понять, что находится там, в небе. Увидев, что именно излучают звезды, галактики и всевозможные экзотические объекты в них, астрономы могут многое узнать о химическом составе астрономических объектов, выяснить свойства и природу звезд.

Философ Огюст Конт в 1835 г. ошибочно сказал о звездах: «Мы никогда и никакими средствами не сможем исследовать их химический состав». Ему казалось, что это знание навсегда останется за пределами человеческих возможностей. Тем не менее после этих слов прошло не так уж много времени, когда в результате открытия и интерпретации спектра Солнца — излученного или поглощенного света — мы узнали о составе нашего светила, и ошибка Конта была раз и навсегда доказана.

Сегодняшние эксперименты продолжают ту же миссию, пытаясь определить состав других небесных тел. Современные телескопы очень чувствительны, и буквально с каждым месяцем мы узнаем об окружающем мире все больше и больше.

К счастью, наблюдения за светом и частицами, которыми уже занимаются самые разные приборы и установки, тоже могут пролить свет на природу скрытой массы. Поскольку античастицы во Вселенной встречаются относительно редко, а распределение энергии фотонов может обладать вполне определенными опознава-

емыми свойствами, подобные наблюдения со временем, возможно, удастся связать с темной материей. Пространственное распределение этих частиц, возможно, также позволит отличить продукты аннигиляции от более распространенных астрофизических фонов.

Система HESS (High Energy Stereoscopic System), расположенная в Намибии, и система VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescopic Array) в штате Аризона представляют собой объединение множества наземных телескопов, занятых поисками фотонов высоких энергий из центра нашей Галактики. А следующее поколение очень высокоэнергетических гамма-обсерваторий — СТА (Cherenkov Telescope Array) — обещает еще более высокую чувствительность. Космический гамма-телескоп Ферми, ранее известный как GLAST, каждые 95 минут огибает Землю по орбите высотой 550 км на спутнике, запущенном в 2008 г. Преимущество наземных детекторов фотонов в том, что они собирают свет с громадной территории, тогда как чувствительнейшие инструменты телескопа Ферми дают много лучшее энергетическое разрешение и точнее определяют направление; они чувствительны к более низкоэнергетическим фотонам и имеют в 200 раз более широкое поле зрения.

Любой из перечисленных инструментов может регистрировать фотоны — как образовавшиеся при аннигиляции темной материи, так и излученные электронами и позитронами, родившимися в результате этой аннигиляции. Увидев те или другие, мы наверняка многое узнаем о характере и свойствах темной материи.

Другие детекторы занимаются в первую очередь поисками позитронов — античастиц электронов. Физики, участвующие в российско-итальянском спутниковом эксперименте PAMELA, уже сообщили о своих находках, и они совсем не похожи на то, что прогнозировалось заранее (см. результаты эксперимента PAMELA на рис. 80). Название в данном случае представляет собой аббревиатуру не слишком понятной фразы Pay load for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*. Мы пока не знаем, чему мы обязаны «лишними» событиями, которые зарегистрировал этот аппарат, — темной материи или неверной оценке астрономи-

* Что означает примерно следующее: полезный груз для исследования материи и антиматерии и астрофизики легких ядер. — *Прим. пер.*

ческих объектов, таких как пульсары. В любом случае результаты привлекли внимание и астрофизиков, и специалистов по физике элементарных частиц.

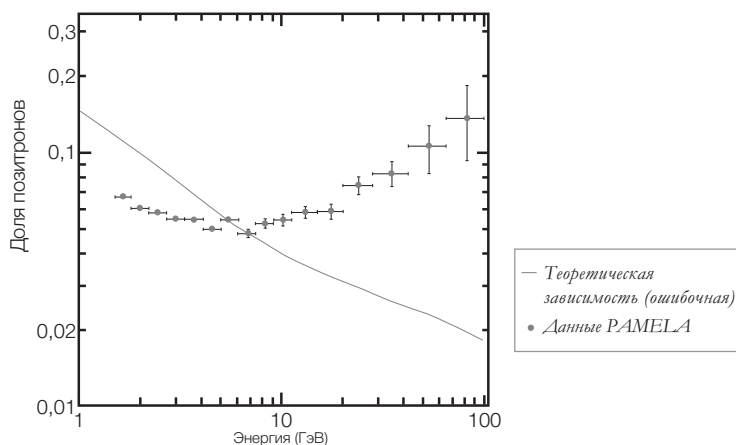


РИС. 80. Данные с прибора PAMELA показывают, как плохо экспериментальные данные (кресты) о доле позитронов в зависимости от энергии согласуются с теоретическими прогнозами (пунктирная кривая)

Темная материя может также аннигилировать с образованием протонов и антипротонов. Более того, многие модели предсказывают, что если уж частицы темной материи находят друг друга и аннигилируют, так чаще всего и происходит. Однако большое количество антипротонов, возникающих в Галактике в других известных астрофизических процессах, может маскировать сигналы от аннигиляции темной материи. И все же у нас, возможно, есть шанс увидеть темную материю при помощи антидейтронов — очень слабо связанных состояний антипротона и антинейтрона, — которые также могут возникать при аннигиляции темной материи. Альфа-магнитный спектрометр AMS-02, находящийся в настоящее время на Международной космической станции, а также специальные спутниковые системы, такие как GAPS (General Antiparticle Spectrometer), возможно, когда-нибудь «засекут» антидейтроны и откроют тем самым темную материю.

Наконец, ключом к непрямому обнаружению темной материи могут оказаться незаряженные частицы под названием нейтрино, участвующие только в слабом взаимодействии. Возможно, темная материя попадает в ловушку и оказывается запертой в центре Солнца или Земли. В таком случае единственным сигналом, который смог бы выбраться оттуда, являются именно нейтрино, так как в отличие от других частиц они не взаимодействуют по пути с веществом. Поисками этих высокоэнергетических нейтрино заняты детекторы Baikal, AMANDA, Ice Cube и ANTARES.

Если нам удастся зафиксировать хотя бы один из перечисленных сигналов — и даже если не удастся! — после этих экспериментов мы будем больше знать о природе темной материи, типичных для нее взаимодействиях и о ее массе. Пока же физики думают о том, какой сигнал следует ждать по прогнозам каждой из основных гипотез о темной материи. И, разумеется, мы задаемся вопросом о том, что могут означать уже полученные данные. Темная материя так слабо взаимодействует с материей обычной, что обнаружить ее будет очень непросто. Но можно надеяться, что установка разных, но действующих одновременно детекторов темной материи в ближайшем будущем непременно позволит нам добиться успеха; добавив к этому результаты экспериментов на БАКе, мы сможем лучше понять, что скрывает в себе Вселенная.

Часть VI

ПОДВЕДЕМ ИТОГИ

ДУМАТЬ ГЛОБАЛЬНО, ДЕЙСТВОВАТЬ ЛОКАЛЬНО

Цель этой книги — помочь читателю увидеть хотя бы краешком глаза, как человеческий разум пытается исследовать и внешние пределы пространства, и внутреннюю структуру вещества. Одним из лучших специалистов в обеих областях знания был покойный профессор Гарварда, физик Сидни Коулман. Студенты рассказывали, что, когда Сидни, получив докторскую степень, подавал документы на должность научного сотрудника в университете, почти во всех рекомендательных письмах говорилось, что это лучший физик после Ричарда Фейнмана. В последнем письме сам Ричард Фейнман писал, что Сидни — лучший физик современности. Себя он из рассмотрения исключил.

На юбилейной конференции, посвященной 60-летию Сидни, выступили многие выдающиеся физики его поколения. Говард Джорджи, коллега Сидни по работе в Гарварде и прекрасный специалист по физике элементарных частиц, заметил, что в докладах выступающих физиков-теоретиков его поразила одна деталь: то, как по-разному они все думают.

Это правда. У каждого из ученых имелся собственный подход к науке и каждый из них благодаря присущим только ему навыкам и умениям внес в науку очень существенный вклад. Одни из них воспринимали мир преимущественно визуально, другие были чистыми аналитиками, некоторые просто обладали чудесной способностью впитывать и оценивать информацию.

А. С. Пушкин был прав, когда писал: «Вдохновение нужно в геометрии не меньше, чем в поэзии». Без творческого подхода невозможны ни физика элементарных частиц, ни космология, ни математика, ни другие науки — точно так же, как невозможны искусство и науки гуманитарные. Наука олицетворяет собой богатство мысли, которое способно подстегнуть творческий процесс при множестве внешних ограничений. Среди логических правил и выводов очень легко забыть о вдохновении и воображении. Но и математика, и технологии появились благодаря людям творческим, умеющим мыслить нетривиально.

В последние несколько лет мне везло на встречи и общение с творческими людьми самых разных профессий и было очень интересно замечать у них общие черты. На первый взгляд ученые, писатели, художники и музыканты кажутся совершенно разными людьми, но по природе таланта и темпераменту у них много сходного. В завершение своего рассказа о науке и научном мышлении я хочу назвать некоторые качества, которые лично мне представляются у творческих людей самыми удивительными.

ВЫДАЮЩИЙСЯ ТАЛАНТ

Ни ученые, ни художники, скорее всего, не думают о творчестве как таковом, когда создают что-то значительное. Мало кто из добившихся успеха может утром сесть за стол и решить: «Займусь-ка я сегодня творчеством». Нет, эти люди всегда сосредоточены на проблеме. И когда я говорю «сосредоточены», я имею в виду сосредоточены полностью, вне зависимости от желания.

Мы, как правило, видим лишь конечный результат творчества и не знаем, какой громадной преданности делу, каких технических умений, какой изобретательности потребовало его создание. Посмотрев фильм «Человек на проволоке» (2008), рассказывающий о проходе канатоходца Филиппа Пети в 1974 г. по тросу, натянутому на высоте 400 м между башнями-близнецами Всемирного торгового центра (в свое время это событие привлекло внимание не только большинства ньюйоркцев, но и множества людей по всему миру), я оценила присущий этому человеку дух авантюризма

и игры, а также его мастерство. Но оказалось, что Филипп не просто натянул трос как попало между двумя стенами. Хореограф Элизабет Стреб показала мне дюймовой толщины папку с рисунками и вычислениями, сделанными перед установкой тросового крепления в ее студии. Только тогда я поняла, чего стоило артисту подобное выступление, какую подготовку ему пришлось провести. Филипп Пети называл себя в шутку «инженером-самоучкой». Он вступал на канат только после того, как тщательно изучал механические свойства использованных в своей конструкции материалов. Разумеется, без практической проверки Филипп не мог быть абсолютно уверен, что все принял во внимание, но он старался учесть все возможное.

Если вам трудно поверить в такую погруженность в дело, оглянитесь вокруг. Люди очень часто уходят в свое занятие — каким бы оно ни было — с головой. Ваш сосед разгадывает кроссворды, ваши друзья увлеченно смотрят по телевизору спортивные передачи, кто-то в подzemке так увлекся книгой, что пропустил свою станцию, не говоря уже о тех бесчисленных часах, которые вы сами, возможно, проводите за видеоиграми.

Ученым, поглощенным исследованиями, просто повезло: они зарабатывают на жизнь именно тем, что им нравится делать, или по крайней мере тем, что они не в состоянии оставить недоделанным. Профессионалы такого рода, как правило, полагают (хотя это, возможно, лишь иллюзия): то, что они делают, важно и сохранится надолго. Так, ученым нравится думать, что все мы заняты великой миссией познания истины. Может быть, у нас и не найдется времени на разгадывание кроссворда, но мы всегда готовы тратить его на исследовательский проект, особенно крупный и серьезный. Мы погружаемся в работу примерно так же, как другие в игру или фильм. Но ученый, как правило, продолжает думать о своем проекте даже за рулем и перед сном в постели. Безусловно, способность сохранять сосредоточенность на проекте в течение дней, месяцев или лет связана с уверенностью в его важности, даже если поначалу всего несколько человек в мире смогут осмыслить полученный результат и даже если гипотеза, над которой работает ученый, в конце концов будет опровергнута.

В последнее время стало модным сомневаться во врожденных творческих способностях и таланте и приписывать успех исключительно раннему вхождению в тему и практике. Дэвид Брукс в своей колонке в *The New York Times* так резюмировал содержание нескольких недавних книг на эту тему: «Мы сегодня уверены, что есть кое-что, объединяющее Моцарта и Тайгера Вудса, — умение сосредоточиться на цели и родители, жаждавшие развить способности сыновей». Еще один пример, приведенный в колонке, — Пикассо. Отец Пикассо был художником и преподавателем живописи, и сын, будучи с детства погружен в художественную среду, уже ребенком блестяще рисовал. У Билла Гейтса в детстве тоже были исключительные возможности. В книге «Гении и аутсайдеры: Почему одним все, а другим ничего?»* Малкольм Гладуэлл рассказывает, что средняя школа в Сиэтле, где учился Гейтс, одной из первых организовала у себя компьютерный клуб и что в Университете Вашингтона Гейтс мог пользоваться компьютерами практически без ограничений. Далее Гладуэлл делает вывод о том, что своим успехом Гейтс был обязан скорее возможностям, чем собственному таланту и целеустремленности.

В самом деле, сосредоточенность и практика на раннем этапе (когда теория идеально встраивается в сознание, а методы и техники осваиваются без труда) сыграли огромную роль в жизни многих творческих личностей. Если вам необходимо решить сложную проблему, то на освоение азов, как правило, времени тратить не хочется. Если какие-то навыки (или математические методы, или знания) становятся «второй натурой», задействовать их намного легче. Подобные «встроенные» умения часто действуют на уровне подсознания, в фоновом режиме, пока не передают в сознание уже сформированную идею. Известны случаи, когда человек решал сложную проблему во сне. Ларри Пейдж рассказывал мне, что идея Google пришла к нему во сне, но лишь после того, как он несколько месяцев думал исключительно о создании идеального поисковика. Озарение часто приписывают некой «интуиции», не понимая, что оно стало лишь результатом длительных размышлений и подробного изучения проблемы.

* Гладуэлл М. Гении и аутсайдеры: Почему одним все, а другим ничего? — М.: Юнайтед Пресс, 2010.

Так что Брукс и Гладуэлл, несомненно, в чем-то правы. Мастерство и талант, конечно, имеют значение, но на них далеко не уедешь, если не добавить сосредоточенность и навыки, приобретенные за счет преданности идее и бесконечной практики. Однако возможности в раннем возрасте и систематическая подготовка — тоже далеко не все. Те, кто говорит об этом, забывают, что способность сосредоточиться на чем-то одном и практиковаться без усталости — само по себе редкое умение. Больше всего пользы от учения и многократного повторения, естественно, получают те исключительные люди, кто способен учиться на собственном опыте и удерживать в голове все полученные уроки. Упорство — вот ключ к сосредоточенности и усердию, которые в конце концов обязательно принесут свои плоды как в научных исследованиях, так и в любой другой творческой области.

Название первого аромата, созданного Келвином Кляйном, — *Obsession* («Одержимость») — не случайно: он добился успеха, потому что (по его собственным словам) был одержим. Даже если профессиональные гольфисты, отрабатывая удар, повторяют его бесчисленное количество раз, я никогда не поверю, что любой человек способен тысячу раз ударить по мячу, не потеряв сосредоточенности и не испытывая ни скуки, ни разочарования. Мой друг-скалолаз Кай Цинн, работающий на сложнейших маршрутах, запоминает подробности маршрута гораздо лучше, чем я. Это, в свою очередь, дает ему стимул продолжать занятия. Мне станет скучно, я выберу маршрут попроще и останусь очень посредственной скалолазкой, тогда как Кай, умеющий учиться на повторении одного и того же, будет постоянно повышать свою квалификацию. Натуралист, математик и писатель XVIII в. Жорж-Луи Леклерк так охарактеризовал эту способность: «Гений есть не что иное, как дар огромного терпения». Хотя я бы добавила, что гений — это еще и нетерпимость к застою, к отсутствию развития.

МАСШТАБИРОВАНИЕ ЧЕПУХИ

Научные исследования невозможны без практики, без технической подготовки и упорства. Но этого мало. Аутисты — не говоря

уже о некоторых научных сотрудниках и многих чиновниках — нередко демонстрируют прекрасную техническую осведомленность, но им откровенно не хватает творческого подхода и воображения. В наши дни достаточно сходить в кинотеатр, чтобы убедиться, что одного только упорства и технических достижений без воображения и креативности недостаточно. Бесконечные сцены, в которых одни нарисованные чудовища сражаются с другими нарисованными чудовищами, сами по себе, конечно, выглядят внушительно, но такому сюжету, как правило, не хватает энергии, чтобы полностью захватить многих зрителей. По крайней мере я часто засыпаю в кинозале, несмотря на все световые и звуковые эффекты.

Для меня самые захватывающие фильмы — те, что обращаются к серьезным вопросам и реальным идеям, но передают их через простые примеры, которые каждый человек может понять и оценить. Фильм «Касабланка» рассказывает о патриотизме и любви, о войне и верности, но хотя Рик и говорит Ильзе, что «не нужно много ума, чтобы понять: проблемы трех маленьких людей в этом безумном мире ничего не стоят», именно эти трое повинны в том, что фильм меня захватил (плюс, конечно, работа Петера Лорре и Клода Рейнса).

В науке тоже правильные вопросы часто ставит тот, кто удерживает в уме одновременно и глобальное, и частное. Существуют великие проблемы, решить которые мечтает каждый, и существуют маленькие вопросы, которые кажутся несложными. Поставить перед собой крупную проблему, как правило, недостаточно, потому что к реальному продвижению обычно приводит решение небольших вопросов. В одной песчинке действительно можно увидеть целый мир.

Важная способность любого творческого человека — это умение правильно поставить вопрос. Творческие люди стремятся распознать перспективный, интересный и, самое главное, реальный путь к истине и в конце концов верно сформулировать вопросы. В науке лучший подход — это сосредоточенность на небольшой проблеме и при этом учет глобальных вопросов. Иногда крохотная проблема или противоречие становятся ключом к большому открытию.

Революционные идеи Дарвина отчасти выросли из повседневных наблюдений за птицами и растениями. Вычисление прецессии перигелия орбиты Меркурия не было результатом ошибки измерений, а указывало на ограниченность действия законов физики Ньютона. Этот результат стал одним из свидетельств в пользу теории гравитации Эйнштейна. Несовпадения, которые кому-то покажутся слишком мелкими и незначительными, на самом деле могут показать путь к новым концепциям, но лишь тем, кто сумеет взглянуть на проблему под правильным углом.

Эйнштейн поначалу вообще не собирался заниматься гравитацией. Он пытался разобраться в следствиях недавно разработанной теории электромагнетизма. Ученый сосредоточился на странных или даже противоречивых аспектах симметрии, как все тогда думали, пространства и времени, а закончил тем, что революционным образом изменил наше мировоззрение. Эйнштейн считал, что во всем должен быть смысл; ему хватило настойчивости, чтобы догадаться в конце концов, в чем этот смысл может заключаться.

Или взглянем на современные научные исследования. Вопрос о том, почему некоторые взаимодействия не могут происходить согласно суперсимметричным теориям, кому-то может показаться пустяком. В 1980-е гг. моего коллегу Дэвида Каплана засмеяли, когда он попытался в Европе поговорить о подобных проблемах. Но оказалось, что этот вопрос — богатый источник новых данных как о суперсимметрии, так и о ее нарушениях; на его базе возникли новые гипотезы, которые сегодня готовятся проверять экспериментаторы на БАКе.

Я твердо верю в то, что Вселенная непротиворечива и что любое отклонение подразумевает какую-то интересную, но пока не открытую особенность. После того как я заявила об этом на одной презентации, какой-то блогер написал, что я идеалистка. На самом же деле для многих ученых убежденность в непротиворечивости Вселенной — одна из основных, вероятно, движущих сил при выборе тем и вопросов для изучения.

Кроме того, многие известные мне творческие люди обладают способностью удерживать в сознании одновременно значительное число вопросов и идей. Любой может заглянуть в Google и выяс-

нить что-то об интересующем его предмете, но, если вы не умеете компоновать факты и идеи нестандартным образом, вам вряд ли удастся обнаружить что-нибудь новое. Именно при столкновении разнонаправленных идей нередко рождаются новые научные гипотезы и произведения искусства.

Многие предпочитают работать линейно. Но это означает, что на первом же непреодолимом препятствии, при первых же сомнениях в верности выбранного пути путешествие заканчивается. Подобно многим писателям и художникам, ученые продвигаются вперед скачкообразно. Как правило, это нелинейный процесс. Некоторые детали головоломки удастся понять, другие приходится временно отодвигать в сторону и оставлять на потом. Мало кому удастся до конца разобраться в теории после одного-единственного прочтения. Приходится считать, что когда-нибудь мы до конца во всем разберемся, что мы можем себе позволить пока пропустить кое-какие неясности, а потом, добравшись до конца, к ним вернуться. Приходится погружаться в тему с головой, чтобы продолжать работу над ней — и над понятными кусками, и над непонятными.

Известно, что Томас Эдисон однажды заметил: «Гений — это один процент вдохновения и 99 процентов пота». А по словам Луи Пастера, «в области исследований счастье улыбается только натруженному уму». Именно поэтому увлеченные исследователи иногда находят ответ на свои вопросы. Но случается, что ответы эти находятся совсем не там, где предполагалось. Александр Флеминг не искал лекарство от инфекционных болезней. Он просто заметил, что грибок уничтожает колонии бактерий *Staphylococci*, изучением которых он в то время занимался, и распознал потенциальное терапевтическое значение этого факта, хотя понадобилось еще десять лет и труд множества других людей, прежде чем пенициллин стал мощным лекарством, по-своему изменившим мир.

Нередко при определенной широте базы рассматриваемых вопросов возникают и побочные достижения. Работая над суперсимметрией, мы с Раманом Сандрамом получили в конце концов свернутое дополнительное измерение, позволяющее решить проблему иерархии. Потом мы еще раз внимательно посмотрели

на уравнения, перенесли их на более широкий контекст и обнаружили, что бесконечное свернутое пространственное измерение может существовать, не порождая никаких противоречий с известными наблюдаемыми фактами или законами природы. Мы занимались физикой элементарных частиц — совершенно другой темой. Но одновременно мы старались удерживать в сознании и общую картину мира. Мы не забывали про глобальные вопросы о природе пространства даже тогда, когда наше внимание было поглощено частными моментами, такими как иерархия масштабов масс в Стандартной модели.

Важно, что ни Раман, ни я не были специалистами по теории относительности, так что к своим исследованиям мы подошли без всякой предвзятости. Ни нам и никому другому в голову бы не пришло, что теория гравитации Эйнштейна допускает существование невидимого бесконечного измерения, пока уравнения не показали нам, что это возможно. Мы упрямо разбирались в следствиях наших уравнений, не зная, что в кругах ученых, занятых теорией относительности, бесконечное дополнительное измерение считалось невозможным.

Тем не менее мы далеко не сразу уверились в том, что правы. Ни Раман, ни я не собирались слепо хвататься за радикальную идею. Выходить за пределы привычных пространства и времени имело смысл только после того, как мы и многие другие физики убедились, что традиционные идеи здесь не годятся. Хотя дополнительное измерение — достаточно свежая гипотеза, теория относительности Эйнштейна продолжает действовать. Поэтому мы могли воспользоваться готовыми уравнениями и математическим аппаратом, чтобы понять, как поведет себя наша гипотетическая вселенная.

Позже другие использовали результаты этого исследования и приняли модель с дополнительными измерениями за отправной пункт в собственных поисках новых физических идей, которые, возможно, будут применимы в какой-нибудь вселенной без дополнительных измерений. Подойдя к этой проблеме буквально, физики увидели в ней возможности, которых прежде никто не замечал. Такой подход помог ученым выйти за рамки трехмерности.

Всякому, кто вторгается на новые территории, приходится мириться с массой неопределенностей — от них невозможно избавиться, пока проблема не будет решена полностью. Даже если вы начинаете с прочного фундамента существующих знаний, то, изучая новые явления, вы рано или поздно столкнетесь с неизвестностью и неопределенностью, хотя, конечно, рискуете вы при этом куда меньше, чем канатоходец. Не только космонавты, но и ученые, и художники дерзко стремятся «туда, где никто еще не бывал». Но их дерзость не слепа и не случайна, и они не пренебрегают достижениями предшественников, даже если речь идет о совершенно новых идеях и безумных экспериментах, которые, кажется, и реализовать-то невозможно. Исследователи стремятся быть готовыми ко всему. Именно для этого нужны правила, уравнения и представления о непротиворечивости. Это страховка, которая защищает нас во время путешествия по неизвестным землям.

По словам моего коллеги Марка Камионковски, «хорошо быть амбициозным и смотреть в будущее». Но главное все-таки — ставить реалистичные цели. Один студент, достигший больших успехов в изучении бизнес-менеджмента, заметил, что базой недавнего успешного экономического роста, раздувшегося затем в экономический пузырь, в значительной мере была именно креативность. Но, заметил он также, недостаток сдерживающих факторов привел к тому, что пузырь лопнул.

В качестве примера противоречивых намерений, которые внушают человеку уверенность и осторожность, можно привести даже самые важные открытия прошлого. Научный журналист Гэри Таубс однажды сказал мне, что ученые — одновременно самые уверенные и самые неуверенные люди на свете. Именно это противоречие гонит их все время вперед: с одной стороны, каждый из них уверен в том, что движется вперед, а с другой — самым жестким образом проверяет любые свои выводы. Творческий человек должен верить, что он может добиться многого, и при этом постоянно помнить о тех, у которых ничего не получилось.

Выдвигая смелые, подчас даже авантюрные идеи, ученые иногда очень неохотно представляют их миру. Известнейшие ученые

Исаак Ньютон и Чарльз Дарвин много лет не решались поделиться с окружающими своими революционными идеями. Исследования Дарвина растянулись на десятилетия, и книга «Происхождение видов» вышла лишь после громадного количества наблюдений. Ньютоновы «Начала» представили теорию всемирного тяготения, на разработку которой у автора ушло больше десяти лет. Ньютон не публиковал трактат, пока не получил достаточных доказательств того, что тела произвольной геометрической формы (не только точечные) тоже притягиваются с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Именно в процессе доказательства этого закона Ньютон разработал методы дифференциального и интегрального исчисления.

Иногда требуется заново сформулировать проблему, чтобы увидеть ее в новом свете и заново определить границы, а затем найти решение там, где на первый взгляд никакого решения и быть не может. Для успеха начатой работы нередко очень важны упорство и вера — не в бога, а в то, что решение все-таки существует. Истинные ученые — и вообще творческие люди — никогда не останавливаются, оказавшись в тупике. Если проблема не решается одним способом, они пробуют решить ее иначе. Если впереди непреодолимое препятствие, они роют тоннель, ищут другое направление или поднимаются в воздух и составляют карту местности. Именно здесь вступает в игру воображение. Чтобы продолжать, мы должны верить в то, что ответ реально существует, а мир изначально логичен, и эту логику мы в конце концов обязательно обнаружим. Посмотрев на проблему под верным углом, можно заметить связи, которые в противном случае обязательно пропустишь.

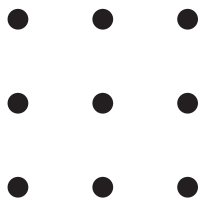


РИС. 81. Задача: не отрывая карандаша от бумаги, соединить девять точек четырьмя отрезками прямой

В качестве иллюстрации можно привести известную задачу, в которой требуется, не отрывая карандаша от бумаги, соединить девять точек четырьмя отрезками прямой (рис. 81). Если держаться в пределах образованного точками квадрата, решения у задачи не существует, но ведь никто не задавал вам такого ограничения! Стоит выйти за пределы квадрата, и решение появляется (рис. 82). В этот момент вам, возможно, придет в голову, что проблему можно переформулировать еще несколькими способами. Если точки будут большими, можно ограничиться тремя линиями. Если сложить бумагу (или воспользоваться очень широким пером, как предложила создателю задачи одна маленькая девочка), хватит и одной линии.

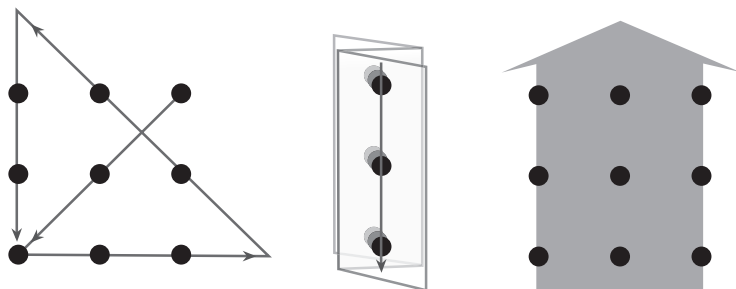


РИС. 82. Возможные креативные решения задачи о девяти точках включают вариант выхода за пределы квадрата, складывание бумаги так, чтобы точки сошлись на одной прямой, и использование широкого пера или грифеля

Эти решения — не обман и не нарушение правил. Правда, они были бы обманом, если бы в задаче имелись дополнительные ограничения. К сожалению, система образования зачастую загоняет мышление в жесткие рамки, когда человек сам отсекает «лишние» возможности. В книге «Кварк и ягуар» (The Quark and the Jaguar) Мюррей Гелл-Манн цитирует «историю про барометр» профессора физики Вашингтонского университета Александра Каландры. Суть истории такова: преподаватель, сомневаясь в оценке, задал студенту вопрос о том, как можно измерить высоту здания при помощи барометра. Студент ответил, что можно привязать барометр

к веревке и спустить с крыши на землю, а затем измерить длину веревки. Когда преподаватель возразил, что решение должно быть основано на законах физики, экзаменуемый предложил измерить время падения барометра с крыши или длину тени от барометра и от здания в заданное время дня. Студент предложил также один нефизический способ: пойти к коменданту и предложить ему барометр в обмен на информацию о высоте здания. Возможно, это были не те ответы, которые хотел услышать преподаватель. Но студент верно — и остроумно — подметил, что личные ограничения преподавателя не входят в условия задачи.

Когда в 1990-е гг. я вместе с другими физиками начала думать о дополнительных пространственных измерениях, мы не просто стали мыслить шире, мы буквально вышли за пределы знакомого трехмерного пространства. Мы размышляли о мире, в котором сама сцена, на которой мы решали свои проблемы, неожиданно оказалась больше, чем мы думали. Представив себе такой мир, мы сумели отыскать в нем потенциальные решения проблем, которые годами беспокоили специалистов по физике элементарных частиц.

Надо заметить, что научные достижения возникают не в вакууме. Они всегда опираются на идеи предшественников. Хорошие ученые прислушиваются друг к другу. Иногда для получения верного вопроса или ответа достаточно просто внимательно выслушать, понаблюдать или прочесть чью-то статью. Мы часто сотрудничаем, привлекая в проект ученых разных специальностей; кроме того, это помогает сохранить объективность.

Каждый ученый хочет первым сделать важное открытие; тем не менее мы умеем учиться друг у друга и делиться друг с другом результатами своей работы; умеем мы и работать над одной общей темой. Иногда случайная фраза, сказанная кем-то из коллег, становится ключом к интересной проблеме или решению. У каждого ученого, конечно, бывают свои озарения, но мы часто обмениваемся мыслями, вместе прорабатываем следствия и вносим поправки — или начинаем все сначала, если оказывается, что первоначальная идея не работает. Мы постоянно придумываем новые гипотезы, одни сохраняем про запас, другие отбрасываем.

Это наш хлеб. Именно так мы работаем, именно так продвигаемся вперед. Это не плохо. Это прогресс.

Одна из важнейших задач, которые я выполняю при работе с аспирантами, заключается в том, чтобы внимательно следить, не мелькнет ли в их рассуждениях какая-нибудь свежая перспективная идея, даже если сами они пока не могут как следует ее сформулировать; стоит прислушиваться также к критике моих построений. Возможно, такой взаимный обмен — лучший способ научить творчеству (или, по крайней мере, поддержать его).

Конкуренция тоже играет важную роль в научном процессе — впрочем, как и в большинстве других занятий. При обсуждении креативности художник Джефф Кунс рассказал нам, что в юности его сестра занималась живописью и в какой-то момент он вдруг понял, что способен рисовать лучше. Один молодой продюсер объяснил, что конкуренция стимулирует его и его коллег и заставляет заимствовать у других лучшие идеи и методы, а значит, и развивать собственные. Известный повар Дэвид Чан выразил аналогичную мысль чуть более откровенно. При посещении нового ресторана у него иногда возникает мысль: «Это здорово! Почему я об этом не подумал?»

Ньютон тянул с публикацией до завершения исследований. Но при этом он, вполне вероятно, внимательно следил за своим конкурентом Робертом Гуком, который тоже знал об обратной пропорциональности квадрату расстояния, но математического аппарата для доказательства этого закона у него не было. Тем не менее работа Гука, вероятно, подтолкнула Ньютона к публикации результатов. Дарвин тоже принял окончательное решение о публикации, узнав о том, что над аналогичными эволюционными идеями работает некий Альфред Рассел Уоллес и, если он еще немного потянет с публикацией, слава первооткрывателя достанется конкуренту. И Дарвин, и Ньютон хотели полностью прояснить для себя свои теории, прежде чем публиковать их, и работали над ними до полной уверенности — или по крайней мере пока их не стали догонять конкуренты.

Вселенная то и дело дает нам понять, что она умнее нас. Уравнения или наблюдения подсказывают новые идеи, которые

еще недавно никому не приходили в голову и для подтверждения которых в будущем потребуются оригинальные, креативные эксперименты. Без неопровержимых экспериментальных свидетельств ни один ученый не придумал бы квантовую механику; я подозреваю, что точную структуру ДНК и мириады явлений, в сумме образующих жизнь, практически невозможно было бы угадать, если бы мы не столкнулись лицом к лицу с «подсказками».

Научные исследования — органичный процесс. Мы вовсе не обязательно знаем, к чему идем, но эксперименты и теории служат нам на этом пути ценными проводниками. Подготовка и мастерство, сосредоточенность и упорство, умение задавать нужные вопросы и доверять собственному воображению — вот качества, которые помогают нам в поиске истины. Полезны также широта взглядов, общение с коллегами, желание превзойти предшественников или коллег и вера в то, что ответы существуют. Какими бы мотивами ни руководствовались ученые, каких бы навыков не потребовали от них новые теории, исследования будут продолжаться и вглубь вещества, и вовне. Мы будем с нетерпением ждать информации об открытии новых законов жизни, которых еще немало скрыто во Вселенной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда я впервые увидела сообщения немецких СМИ о моих исследованиях и о моей книге «Закрученные пассажи», меня удивило постоянное присутствие в текстах словосочетания «край Вселенной». Оказалось, что эта фраза, на первый взгляд случайная, объясняется очень просто: так переводит мою фамилию на немецкий язык компьютер*.

Тем не менее мы действительно стоим в определенном смысле на краю Вселенной — как на малых масштабах, так и на больших. Ученые экспериментально исследовали расстояния, начиная с 10^{-17} см, что соответствует масштабу слабого взаимодействия, до 10^{30} см (размер Вселенной). Мы не можем заранее сказать, на какие масштабы в будущем придется очередной сдвиг парадигмы, но многие ученые сейчас внимательно следят за масштабом слабого взаимодействия, экспериментальное исследование которого начинают с помощью БАКа и других инструментов поиска скрытой массы. В то же время продолжается теоретическая работа по исследованию масштабов энергий — от энергии слабого взаимодействия до энергии Планка и далее к еще более крупным масштабам. Таким образом мы пытаемся заполнить пробелы в наших представлениях о мире. Наивно думать, что мы все уже знаем. Впереди нас почти наверняка ждут новые открытия.

Современная наука во временной перспективе — всего лишь миг по историческим меркам. Но успехи технологий и математики позволили нам за 300 с небольшим лет — начиная с XVII в. — пройти громадный путь и приблизиться к пониманию окружающего мира.

В этой книге рассказывается о том, как специалисты по физике высоких энергий и космологи определяют направление исследо-

* По-немецки Rand означает «край» или «грань», а All — «Вселенная». — *Прим. авт.*

ваний и как сочетание теории и эксперимента помогает пролить свет на некоторые глубокие и фундаментальные вопросы. Теория Большого взрыва описывает нынешнее расширение Вселенной, но оставляет открытыми вопросы о природе темной энергии и скрытой массы. Стандартная модель предсказывает взаимодействия элементарных частиц, но оставляет нерешенным вопрос о том, почему эти частицы обладают именно такими свойствами. Может быть, скрытая масса и бозон Хиггса уже совсем рядом, а может быть, вот-вот будут обнаружены новые симметрии пространства-времени и новые пространственные измерения. Не исключено, что нам повезет и мы сможем ответить на эти вопросы в самом ближайшем будущем. Или не в ближайшем, если нужные частицы окажутся слишком тяжелыми или слабо взаимодействующими. Есть только один способ узнать: нужно поставить вопрос и заняться поисками ответа.

Я привела также рассуждения о некоторых идеях, экспериментально проверить которые чрезвычайно трудно. Они, возможно, когда-нибудь обретут связь с реальностью, но гарантий здесь быть не может: эти идеи вполне могут остаться в рамках философских или даже религиозных концепций. Наука не сможет доказать, что множественных вселенных — или Бога, вообще говоря — не существует, но и подтвердить их существование она вряд ли сможет. Тем не менее некоторые аспекты мультивселенной — к примеру те, при помощи которых можно объяснить иерархию — имеют проверяемые следствия. Найти их и проверить — задача ученых.

Важное место в книге занимают также принципиальные понятия, связанные с научным мышлением, такие как масштаб, неопределенность, творчество и рациональные критические рассуждения. Мы считаем, что наука движется вперед и что сложность явления может выявиться даже раньше, чем будет получено его исчерпывающее объяснение. Вообще, ответы на наши вопросы могут оказаться сложными, но это не значит, что надо отказаться от веры в разум.

Познание природы, жизни и Вселенной ставит перед человеком чрезвычайно сложные задачи. Все мы хотели бы лучше понимать, кто мы такие, откуда пришли и куда идем — хотели бы

сосредоточиться на чем-то более крупном, чем мы сами, и более значительном, чем последние новинки электроники или моды. Несложно понять, почему некоторые обращаются за объяснениями к религии. Если бы не факты и не их интерпретация, помогающая вскрыть неожиданные связи, мы никогда не пришли бы к современной научной картине мира. Наши представления о мире двигают те, кто умеет думать научно. Наша задача — понять как можно больше, а наш инструмент — любопытство, не связанное догмами.

Грань между допустимым сомнением и гордыней ученого некоторым кажется спорной, но в итоге научное критическое мышление — единственный надежный способ получить ответы на вопросы, связанные с устройством Вселенной. Крайние антиинтеллектуальные течения, существующие в некоторых современных религиозных движениях, идут вразрез с традиционным наследием христианства, не говоря уже о прогрессе и науке; к счастью, эти движения представляют далеко не все религиозные и интеллектуальные перспективы. Многие способы мышления — даже религиозные — допускают вопросы к существующей парадигме и эволюцию идей. Для каждого из нас прогресс — это отказ от неверных идей и развитие на базе верных.

На одной из недавних лекций Брюс Альбертс, бывший президент Национальной академии наук США и нынешний главный редактор журнала *Science*, подчеркнул потребность современной науки в творческом подходе, рациональности, открытости и толерантности, изначально присущих ей. Джавахарлал Неру, первый премьер-министр Индии, назвал такое сочетание качеств «характером ученого». Научный образ мышления необходим в современном мире, он помогает разобраться с множеством сложнейших вопросов — социальных, практических и политических. Я хотела бы завершить книгу некоторыми размышлениями о значении науки и научного мышления.

Некоторые сложные проблемы сегодняшнего дня, скорее всего, можно было бы разрешить при помощи сочетания технологий, информации о больших популяциях и грубой вычислительной силы. Но для серьезного продвижения во многих отраслях — как научных, так и прочих — требуются всего лишь интенсивные

размышления небольших групп увлеченных людей, долгое время занятых поисками ответов на сложнейшие вопросы. В этой книге речь идет в основном о природе и ценности фундаментальной науки; нельзя не признать, что чистые исследования нередко — вместе с общим прогрессом науки — приводили к технологическим прорывам, полностью менявшим нашу жизнь. Фундаментальная наука не только учит нас рассуждать о сложнейших проблемах, она также позволяет сегодня создать инструменты, которые в сочетании с научным мышлением завтра помогут найти решение новых проблем.

Вопрос сегодня в том, как в этом контексте найти подход к по-настоящему серьезным проблемам мироздания. Как, используя новые технические возможности, выйти за пределы краткосрочных целей? В мире технологий тоже не обойтись без изобретательности и новых идей. Компания, выпускающая модный гаджет, может быть очень успешной; очень легко увлечься бесконечной погоней за новинками и вниманием публики. Но это отвлекает от реальных и очень важных проблем, которые мы хотели бы решить при помощи новых технологий. iPad — это здорово, но олицетворяемый iPad стиль жизни вряд ли способствует разрешению главных проблем современного мира.

Кевин Келли, один из основателей журнала *Wired*, сказал мне на одной из конференций, посвященных технологиям и прогрессу: «Технологии — величайшая сила во Вселенной». Если это действительно так, то ответственность за величайшую во Вселенной силу ложится на науку, поскольку без фундаментальной науки не было бы и технической революции. Электрон был открыт без всякой практической цели, но электроника кардинально изменила лицо нашего мира. Электричество поначалу тоже рассматривалось как чисто интеллектуальная игрушка, а сегодня Земля опутана целой сетью проводов и кабелей. Квантовая механика — «эзотерическая» теория атома — позволила ученым из Лаборатории Белла придумать транзистор, ставший основой очередной технической революции. При этом никто из пионеров исследования атома не поверил бы, что их работы получают какое бы то ни было практическое применение, не говоря уже о компьютерах и инфор-

мационной революции. Но без фундаментальных научных знаний и научного мышления проникновение в природу реальности, позволившее все это осуществить, было бы невозможно.

Никакие вычислительные мощности и никакие социальные сети не помогли бы Эйнштейну разработать теорию относительности быстрее, чем он это сделал в действительности. В квантовой механике ученым тоже, вероятно, не удалось бы разобраться быстрее. Я не отрицаю, разумеется, что после появления новой идеи или новой интерпретации какого-то явления техника ускоряет продвижение вперед. А решение некоторых проблем попросту невозможно без просеивания и сортировки больших объемов информации. Но главное — это идея. Проникновение в природу реальности, которого позволяет добиться наука, приводит в конечном итоге к прорывам, которые, в свою очередь, непредсказуемым образом изменяют нас самих и общество. Человечество жизненно заинтересовано в том, чтобы научная деятельность продолжалась.

Сегодня уже ясно, что техника — основа человеческой цивилизации. Это правда в том смысле, что большинство нововведений не обходится без технических новинок. Но я бы добавила, что технологии — основа в том смысле, что сама по себе она не является ни истоком, ни целью; скорее, это средство достижения цели, средство связи и объединения. Нам решать, для чего мы хотим ее использовать. А источником необходимых озарений может стать любая форма творческого мышления.

Помимо всего прочего, технологии делают каждого из нас центром собственной вселенной, в чем можно наглядно убедиться, к примеру, на картографическом сервисе MapQuest или метафорически в любой социальной сети. Но проблемы нашего мира гораздо более обширны и глобальны. Технологии могут помочь в их решении, но гораздо полезнее здесь ясное творческое мышление — мышление того рода, которое мы видим в лучших научных работах.

В прошлом внимание США к науке и технологиям — вместе с признанием того факта, что нужно принимать долгосрочные программы и придерживаться их — оказалось успешной стратегией и позволило нам удержаться на переднем крае новых раз-

работок и идей. Сегодня нам, похоже, грозит опасность утратить ценности, которые прежде так замечательно работали нам на благо. Необходимо вернуться к проверенным принципам — ведь мы хотим не просто добиваться краткосрочных успехов, мы хотим представлять себе, каких усилий потребует движение вперед и какие преимущества даст в долгосрочной перспективе.

Рациональный подход к окружающему миру — это прекрасное средство ответить на серьезнейшие современные вызовы. Брюс Альбертс в своей лекции сказал также, что научное мышление позволяет вооружить человека для борьбы с пустыми разглагованиями, упрощенными до предела теленовостями и абсолютно субъективными ток-шоу. Мы не хотим, чтобы люди отказывались от научного метода познания мира — ведь без него очень трудно сформировать осмысленное мнение о множестве сложных систем, с которыми сегодня приходится сталкиваться обществу (среди них финансовая система, окружающая среда, оценка рисков и здравоохранение).

Одним из ключевых элементов продвижения вперед и решения задач — и научных, и любых других — всегда было и всегда будет представление о масштабе. Классификация наблюдаемых фактов и представлений по масштабу очень помогла нам в познании законов природы и вообще окружающего мира, и не важно, что именно выступает в качестве единиц объектов — физические явления, группы населения или временные рамки. О масштабировании необходимо помнить не только ученым, но и политологам, экономистам и политическим лидерам.

Фундамент истинно научного мышления образует множество различных элементов. В этой книге я попыталась передать важность рационального научного мышления и его материалистических предпосылок, а также рассказать о способах, при помощи которых научное мышление экспериментально проверяет идеи и отбрасывает их, если они не подтверждаются. Научное мышление признает, что неопределенность — не обязательно неудача. Оно надлежащим образом оценивает риски и учитывает как краткосрочные, так и долгосрочные последствия. Оно допускает творческий подход к поиску решений. Все это в комплексе может

привести к успеху и продвижению вперед — как в лаборатории или офисе, так и вне их. Научный метод помогает нам расширять пределы познания, но он же может помочь каждому из нас в принятии обычных житейских решений. Обществу необходимо принять научный метод на вооружение и передать его как важный инструмент новым поколениям.

Не следует бояться задавать серьезные вопросы или рассматривать величественные концепции. Один из моих коллег, физик Мэтью Джонсон, воскликнул однажды: «Никогда прежде у нас не было такого богатейшего арсенала идей!» — и был совершенно прав. Но мы пока не знаем верных ответов и с нетерпением ждем экспериментальной проверки. Иногда ответы приходят раньше, чем рассчитывают ученые, — так микроволновое фоновое (реликтовое) излучение рассказало нам о раннем экспоненциальном расширении Вселенной. А иногда происходит наоборот — как в ситуации с БАКом.

Вероятно, скоро мы будем знать больше об устройстве и жизни Вселенной, а также о том, почему вещество обладает именно такими свойствами. Кроме того, мы надеемся больше узнать о тех неуловимых штуках, которые мы называем «темными». Наш «приквел» заканчивается, так что давайте еще раз вспомним ту строку из песни The Beatles, которой сопровождалось вступление к моей предыдущей книге «Закрученные пассажи»: «Должно быть, он красив, ведь его так трудно увидеть». Может быть, новые явления и концепции очень непросто открыть, но наши труды не пропадут напрасно.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этой книге я попыталась затронуть множество тем, и мне повезло: мне помогало множество великодушных и умных людей. Прекрасным стимулом в работе было сознание того, что даже на самом раннем этапе я могу рассчитывать на помощь острых умов. Я особенно благодарна Андреасу Махлу, Любошу Мотлу и Кормаку Маккарти, каждый из которых прочел не один черновик книги и помогал ценными советами на самых разных этапах работы. Я благодарна Кормаку за высокие стандарты, за терпение и веру в «мой проект»; Любошу — за скрупулезность и заботу; Андреасу — за мудрость, энтузиазм и постоянную поддержку.

Поправки, предложения и энтузиазм других людей также были очень важны для меня. Анна Христина Бюхманн внесла своими предложениями существенный вклад в работу, проявив нетривиальность мышления, ум и доброту; Джен Сакс своей мудростью и заботой помогала мне преодолевать моменты нерешительности; Полли Шулман на самом раннем этапе помогла мне определиться с направлением; интерес и острое редакторское перо Брэда Фаркаса помогли перенести мои идеи на бумагу, а острый глаз и ошеломляющее мастерство моего британского редактора Уилла Салкина помогли улучшить некоторые ключевые главы. Я хочу также выразить благодарность Бобу Кану, Кевину Хервигу, Дилани Кахавале, Дэвиду Крону и Джиму Стоуну за вычитку текста и ценные поправки.

Я очень благодарна физикам Фабиоле Джанотти и Тициано Кампорези за знакомство с устройством БАКа и экспериментальных установок ATLAS и CMS; они знают установки как свои пять пальцев. И кто лучше Лина Эванса мог бы вычитать мое описание БАКа и его истории? Хочу также поблагодарить Дага Финкбейнера, Хоуи Хабера, Джона Хата, Тома Имбо, Эми Катц, Мэтью Клебана, Альбиона Лоуренса, Джо Ликкена, Джона Мейсона, Рене

Онга, Брайана Шuve, Роберта Уилсона и Фабио Цвирнера за щедрые замечания и комментарии. Я благодарна и участникам моих гарвардских семинаров для младших курсов 2010 и 2011 гг. за то, что они попытались объяснить мне, как представляют себе БАК.

Отношения религии и науки в определенном смысле были для меня новой неизведанной территорией, где советы и мудрость Оуэна Гингерича, Линды Греджерсон, Сэма Хейзелби и Дейва Тома помогли мне почувствовать себя намного увереннее. Я благодарна также тем, кто помогал мне разобраться в истории науки — Анне Блэр, Софии Талас и Тому Левенсону; с их помощью мой рассказ стал намного более точным.

Затрагивать такие темы, как риск и неопределенность, иногда рискованно (и чревато неопределенностью). Моя благодарность — Ною Фелдману, Джо Фраголе, Виктории Грей, Джо Кроллу, Керту Макмаллену, Джейми Робинсу, Джинни Сук, участникам коллоквиума Гарвардской юридической школы и особенно Джонатану Винеру, которые поделились со мной своим опытом, а также Кассу Санстейну за более ранние беседы. Тема творчества также может быть опасна для неопытного автора, и я благодарна Карен Барбароссе, Полу Грэму, Лайе Халлоран, Гэри Лаудеру, Лиз Лерман, Петеру Мейзу и Элизабет Стреб за то, что они поделились со мной своими взглядами. Особое спасибо Скотту Дерриксону за беседы, которые легли в основу первой главы, и за то, что поправлял меня, когда память мне изменяла. Спасибо организаторам конференции *Techonopoly 2010* за то, что пригласили меня принять участие в открытии — подготовка к конференции помогла мне в работе над заключением. Моя благодарность — всем тем, общение с кем я упомянула в тексте. Спасибо Альфреду Ассину, Родни Бруксу, Дэвиду Фентону, Кевину Макгарви, Сеше Пратапу, Дейне Рэндалл, Энди Синглтону и Кевину Славину за щедрую критику и обмен мыслями, а также Риду Коту за советы.

Я благодарна еще нескольким людям за то, что посоветовали мне взяться за сложное дело написания книги. Спасибо Джону Брокману и Дэну Халперну из издательства Ессо за то, что помогли запустить проект, а также Мэтту Вейланду и его помощнице Шанне Милки за то, что помогли собрать из кусочков единое целое.

Спасибо и другим сотрудникам Ессо за то, что помогли воплотить мой замысел в жизнь, и Эндрю Уайли за организацию последнего этапа. Мне приятно было работать с прекрасной командой иллюстраторов — Томми Макколлом, Анной Бекер и Рихертом Шнорром, — сумевшей передать сложные идеи при помощи ясных и точных картинок.

Наконец, я благодарна своим коллегам-исследователям и другим физикам за все, чему они меня научили. Спасибо моей семье за поддержку моей тяги к рациональности. Спасибо друзьям за терпение и поддержку. И спасибо всем, упомянутым и неупомянутым, кто помог мне в процессе работы над книгой осмыслить и словесно оформить свои идеи.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Адлер Фред 66
Адрон 7
Адронный калориметр (HCAL) 278, 290
Адронный коллайдер см. БАК
Альбертс, Брюс 501
Аль-Кинди 47
Альфа-частица 134, 135
Анархии принцип 383
Андерсон, Карл 136
Антивещество 136, 443, 458, 459
Антикварк 149–151, 297, 313, 358, 359, 361
Антимюон 305
Антинейтрон 136
Антипротон 135, 136, 145, 147, 459, 478
Анти-тау-частица 305, 362
Античастицы 305, 360–364, 367
Антропный принцип 415, 416, 430, 458
Аргон 468
Аркини-Хамед, Нима 391
Армстронг, Карен 74
Асимптотические состояния 327

Б

БАК (Большой адронный коллайдер) 169–302
и черные дыры 214–227
краткая история 194–214
см. также ATLAS; CMS
Бакли, Мэттью 285
Бальдо-Чолин, Массимилла 51
Беллармин, Роберт 58
Белые карлики 223, 224, 247
Берк, Берни 437
Берн, Ронда 31
Бернерс-Ли, Тим 300
Берра, Йоги 296
Бета-распад 154, 307
Бисфенол-А (BPA) 263
Бозон Хиггса (частица Хиггса) 14, 342–370
Большой взрыв 8, 15, 59, 74, 153, 163, 171, 431–439
Бор, Нильс 31, 306
Борн, Бруксли 249
Браге, Тихо 56
Брана 387
Браун, Томас 70
Браут, Роберт 156

Брукс, Джеймс 174

Брукс, Дэвид 486

Бэватрон 135–137

Бэкон, Френсис 46

В

Вагнер, Уолтер 215

Вайнберг, Стивен 50

Валентные кварки 117, 120, 121,
149, 150

Ван дер Мер, Симон 147

Векторное исчисление 46

Векторный бозон 147, 191

Видимый свет 224

Вильчек, Фрэнк 327

Виртуальная частица 118–122, 356,
358, 368

Висенте, Марк 256

Виттен, Эдвард 50

Внутренний триплет БАКа 200

Г

Гамильтон, Уильям Роуэн 44

Гамов, Джордж 116

Гарвей, Уильям 107

Гейзенберг, Вернер 113

Гелиоцентрическая теория 74

Гелл-Манн, Мюррей 117

Геометрическая оптика 44, 46–49

Геометрия свернутого пространства
386, 397–405

Герберт, Джордж 93

Герметичные измерения 293

«Гершель», космический аппарат 8

Гиддингс, Стив 222, 223

Гилберт, Уолли 440

Гладуэлл, Малкольм 486

Глэшоу, Шелдон 124

Глюон 118–122, 133, 142, 143, 149,
150

Госсе, Филипп 74

Гравитационное линзирование
452–454

Гравитон 318, 393, 394, 396, 401–
403, 411

Греггерсон, Линда 66

Гринспен, Алан 250

Гросс, Дэвид 327

Гук, Роберт 496

Гулд, Стивен Джей 85

Гуральник, Джеральд 156

Гут, Алан 440

Гюйгенс, Христиан 47

Д

Деннет, Дэн 93

Дерриксон, Скотт 507

Детектор на сжиженных инертных
газах 468

Джанотти, Фабиола 506

Джонсон, Мэтью 505

Джорджи, Говард 124

Дзанонато, Флавио 51

Дик, Роберт 437

Димопулос, Савас 391

Дипольные магниты 172, 180–184

Дирак, Поль 136

Докинз, Ричард 93

Доро, Микеле 62

Дэвис, Рэй 471

З

- «Закрученные пассажи» (Рэндалл)
11, 310, 414, 499
- Замкнутая струна 387, 388

И

- Излучение Хокинга 220
- Инвариантная масса 139
- Ионизация 472, 473

К

- Калибровочный бозон 147, 155, 173,
303, 314, 315, 317, 343–352
- Калуца, Теодор 386
- Квадрупольные магниты 185, 200,
206, 207, 279
- Квантование 114
- Квантовая теория гравитации 430
- Квантовая теория поля 268, 328
- Квантовая хромодинамика 326
- Квантовая электродинамика 48
- Квантовый вклад 368, 374, 376, 391
- Кватернион 46
- Коническая рефракция 46
- Корпускулярная теория света 47
- Космическая инфляция 165, 439
- Космический гамма-телескоп име-
ни Ферми 477
- Космологическая константа 164
- Косслин, Стивен 35
- Коулз, Катарина 66
- Коулман, Сидни 283
- Красное смещение галактик 432
- Криогенные магниты в БАКе 180–184
- Криогенный детектор 468

Кристаллический вольфрамат свинца
288

- Кристоф, Николас 263
- Ксеноновые эксперименталь-
ные установки (XENON10,
XENON100) 471
- Кунс, Джефф 496
- Кушпен, Паскаль 208

Л

- Лаборатория имени Лоуренса
в Беркли 135
- Лаборатория имени Ферми 181, 191,
200, 212, 275
- Левенсон, Том 58
- Леверье, Урбен Жан Жозеф 449
- Легкие кварки 154, 358
- Легчайшая сумерсимметричная ча-
стица (LSP) 370, 380, 381, 465
- Ледерман, Леон 355
- Лептон 125, 153–156, 276
- Линде, Андрей 444
- Линейный ускоритель 137
- Липперсгей, Ханс 57
- Ллойд, Хэмфри 46

М

- Мальпиги, Марчелло 108
- Маск, Элон 170
- Местлин, Михаэль 91
- Метапрогнозирование 254
- Механизм Хиггса 15, 156–158, 314,
334, 343–353
- Микроволновое фоновое излучение
436
- Морские кварки 150

М-теория 128

см. также Теория струн

Мультиселенная 400, 415, 430, 500

Мюон 153, 155, 281, 283

Мюонный детектор 290–292

Н

Нарушенная симметрия 377

Негравитационные силы 124

Нейтрино 303, 305–315

Нейтрон 37, 112, 116, 136, 137, 154,
306–309

Нейтронная звезда 223, 247

Непрямой поиск темного вещества
475, 479

Ноа, Джоаким 103

Новак, Мартин 43

Нуклеотид 109

Нуклон 116

Нэтчер, Уильям 191

О

Обсерватория колледжа в Дунсинке
(Дублин) 45

Оддон, Пьер 16

Оорт, Ян 451

«Оптика» (Ньютон) 44

Оптическая иллюзия 57

Орбитальный угловой момент 114

П

Паули, Вольфганг 306

Пауэр, Клемент 68

Пион 305

Планк, Макс 251, 329

Планковская длина 105, 126, 127

Планковская масса 366–368, 389

Планковский масштаб 128, 367, 389

Политцер, Дэвид 327

Полупроводниковый стриповый
детектор (SCT) 327

Полчински, Джо 387

Прецизионность 258, 259, 262–265

Протонное море 119

Протонные коллайдеры 143, 151, 174
см. также БАК

Протонный синхротрон (PS) 176,
177

Протонный синхротрон-бустер
(PSB) 176, 177

Реликтовая плотность 161

Реликтовое излучение 15, 153, 163,
437, 438, 444, 454

С

Салам, Абдус 92

Санчес, Луис 215

Свернутое дополнительное измере-
ние 395–405

Сверхпроводимость 182–185, 294,
351, 470

Сверхтекучесть 183

Сектор Хиггса 339, 343, 363–366

Селектрон 376, 377

Сингулярность 248

Система Птолемея 61, 63

Скаляр Хиггса 364, 365

Скварк 374, 377, 379–381, 365

Скопление галактик 423, 428, 439,
448–450, 453

Слабо взаимодействующая массивная
частица (WIMP) 464, 465, 467

Слабое взаимодействие 124
 Слабый калибровочный бозон 147, 156, 173
 Смещенный узел 312
 Спектральные линии 226
 Спонтанное нарушение симметрии 350–353, 368, 381
 Стандартная модель 92, 124, 133, 135, 138, 144, 146, 148, 153–160
 «Степени десяти» (Powers of Ten) 425
 Стохастическое охлаждение 147
 Стреб, Элизабет 28
 Сандрам, Раман 215
 Суперпартнер 376, 377, 386
 Суперсимметрия 357, 365, 370, 372–383
 Сцинтилляционная экспериментальная установка 473

Т

Тау-частица 153, 155, 281, 303–305, 307
 Тегмарк, Макс 430
 Темная энергия 163–165
 Темная материя 160–163
 Теннисон, Альфред 16
 Теория великого объединения (GUT) 124, 125, 195, 367, 410
 Теория разумного замысла 77
 Теория струн 411–418, 430
 Техницвет 372, 383, 384
 Трекер переходного излучения (TRT) 287
 Триггеры 298–300
 Тэватрон 148, 149, 171, 181, 212, 296

У

Углеродный коллиматор 185
 Угловой момент 114
 Уилкинсон, Дэвид 445
 Уилсон, Роберт 507
 Уоллес, Альфред Рассел 496

Ф

Фабриций, Иероним 107
 Фаза впрыска (инъекции) 176, 177
 Фейнман, Ричард 483
 Ферми, Энрико 307
 Фермион 317, 318, 344, 346, 374, 375
 Фийон, Франсуа 208
 Финкбейнер, Даг 468
 Форд, Кент 451
 Фрагола, Джо 507
 Френель, Огюстен-Жан 47
 Фридман, Джером 137

Х

Хаббл, Эдвин 164, 431–435
 Хиггс, Питер 15, 156
 Хиггсино 376, 377
 Хиральность 302
 Хойл, Фред 431
 Хокинг, Стивен 50, 55, 219–221, 246, 248

Ц

Циклотрон 135

Ч

Частицы Калуцы-Клейна 160
 Чемберлен, Оуэн 135
 Черные дыры 215, 217–227

Э

Эйнштейн, Альберт 18, 29, 41, 95,
127–129

Экранирование 351–471

Экспериментальные установки

на БАКе

см. ATLAS; CMS

Эксперименты с неподвижной ми-
шенью и коллайдеры элемен-
тарных частиц 138–141

Экстенсивные системы 106

Электромагнитный калориметр
(ECAL) 278, 288–290

Электрослабая симметрия 354

Электрослабое взаимодействие 144,
147

Эмерджентные явления 81–82

Энглер, Франсуа 156

Эффективная теория 33–44

Я

Янссен, Захарий 62

А

ALICE (A Large Ion Collider
Experiment) 274

AMANDA, детектор 479

AMS-02 (Alpha Magnetic
Spectrometer) 478

ANTARES, детектор 479

ArDM (Argon Dark Matter), детектор
468

ASCOT (Apparatus with Super
Conducting Toroids), аппарат с су-
перпроводящими тороидами 276

ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus),
тороидальный аппарат 170,
173, 175, 177, 198, 210, 271, 272,
274–284, 287, 289, 290, 292–296,
302, 362, 506

В

Biogen, компания 440

b-кварк, «красивый» кварк 155, 274,
303, 309, 311–315, 318, 361, 362

CDMS (Cryogenic Dark Matter
Search), криогенный детектор
темной материи 468

CERN, Европейский центр ядер-
ных исследований 14, 17, 144,
147–149, 151, 172–175, 181, 189,
190–200, 203, 207, 210, 222, 242,
271–272, 280, 300, 403

С

CMS (Compact Muon Solenoid), ком-
пактный мюонный соленоид
197–200, 210–211, 271–301, 362,
370, 381, 506

COBE (Cosmic Microwave Background
Explorer), спутник 439, 448

CRESST (Cryogenic Rare Event
Search with Superconducting
Thermometers), эксперимен-
тальная установка 468, 471

CTA (Cherenkov Telescope Array),
гамма-обсерватории 477

C-кварк, «очарованный» кварк 315, 318

D

DAMA, эксперимент 471, 473–475

DESY (Deutsches Elektronen

Synchrotron), ускорительный центр 181
d-кварк, «нижний» кварк 318

E

EAGLE (Experiment for Accurate Gamma, Lepton and Energy Measurements), эксперимент по точному измерению гамма-квантов, лептонов и энергии 276
EDELWEISS (Expérience pour DEtecter Les Wimps En Site Souterrain), экспериментальная установка 468

G

GAPS (General Antiparticle Spectrometer), спутниковая система 478

H

HESS (High Energy Stereoscopic System), обсерватория 477
High-z Supernova Team, исследовательская группа 454

I

Ice Cube, нейтринная обсерватория 479

L

LEP (Large Electron-Positron Collider), электронно-позитронный коллайдер 144
LUX (Large Underground Xenon Detector), экспериментальная установка 468

P

PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics), спутниковый эксперимент 477

S

SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), Стэнфордский ускорительный центр 137
SppS, протон-антипротонный коллайдер 173
SPS (Super Proton Synchrotron), протонный суперсинхротрон 176
SQUID (Superconducting QUantum Interference Device), сверхпроводящее устройство квантовой интерференции 470
SSC (Superconducting Super Collider), сверхпроводящий суперколлайдер 180
Supernova Cosmology Project, проект по космологии сверхновых звезд 454
s-кварк, «странный» кварк 303, 309, 315, 318

T

t-кварк, «истинный» кварк 141, 148, 232, 313, 318, 348, 359, 367–368

U

u-кварк, «верхний» кварк 318, 348

V

VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescopic Array System), система наземных телескопов 477

W

Wino-частица 373

WMAP (Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe), спутник
445, 446, 454

W-бозон 147, 173, 267, 308, 314–317,
360–361, 376

Z

ZEPLIN, детектор темного вещества
468

Z-бозон 146, 147, 173, 190, 314, 348,
349, 356, 357, 361

Рэндалл Лиза

Достучаться до небес

Научный взгляд
на устройство Вселенной

Руководитель проекта *И. Серёгина*
Корректор *М. Савина*
Компьютерная верстка *А. Фоминов*
Дизайнер обложки *Ю. Буга*

Подписано в печать 01.03.2016. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.
Объем 32,5 печ. л.

ООО «Альпина нон-фикшн»
123060, г. Москва
ул. Расплетина, д. 19, офис 2
Тел. +7 (495) 980-5354
www.nonfiction.ru

Знак информационной продукции
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)

