
R&C
Dynamics

THE CHARM OF PHYSICS

SHELDON L. GLASHOW

AIP

The American Institute of Physics

Шелдон Ли Глэшоу

ОЧАРОВАНИЕ ФИЗИКИ

Перевод с английского Н. А. Зубченко

R&C Dynamics
РХД
Москва

2002

УДК 530
Г 59

Интернет-магазин
MATHEMATICS
http://shop.rcd.ru

• физика
• математика
• биология
• техника

РФФИ

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту №02-02-30035.

Глэшоу Ш. Л.
Очарование физики. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002, 336 стр.

Ученый, преподаватель и великолепный рассказчик, Шелдон Ли Глэшоу, предлагает вам совершить увлекательное путешествие по современной физике.

Благодаря своеобразному стилю книги, тонкому юмору и блестящему изложению автор приводит своих читателей из самых отдаленных уголков Вселенной в самые сокровенные глубины атома и показывает, как, в конечном итоге, они сливаются воедино.

Лауреат Нобелевской премии, выдающийся физик-теоретик, один из создателей теории электрослабых взаимодействий, Шелдон Глэшоу в этой книге предстает как истинный любитель «хороших каламбуров, благородных вин, красивых женщин и быстрых автомобилей», как его однажды описала «Нью-Йорк Таймс».

Для широкого круга читателей.

ISBN 5-93972-151-6

© НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002

http://rcd.ru

Оглавление

От редакции 7
Об авторе 8
Предисловие 9

Жизнь физика **15**
Физика элементарных частиц и я 15
Университетский изгнанник в Калифорнии 22
Тайны материи 29

Мир науки **39**
Взгляд на Вселенную 39
Жизнь в логарифмическом масштабе времени 56
Игра чисел 71
Добро пожаловать в систему радиовещания Вселенной 75
Одиноки ли мы во Вселенной? 92
Большая картина 113

Работа теоретика: элементарные частицы **129**
Что такое элементарная частица? 129
В поисках кварка 148
Кварки с цветом и ароматом 163
Создание и открытие очарованного кварка 187
Антинейтрино и геология 191

Физика элементарных частиц как бесполезная трата времени и денег 194
Есть ли будущее у физики элементарных частиц? 202
Большое и малое 216

Работа теоретика: великое объединение **227**
В направлении единой теории: нити в гобелене 227
Объединенная теория взаимодействий элементарных частиц . 239
Великое объединение 265
На пути к объединенной теории поля 274
Запутавшийся в суперструнах 278
Великое объединение и будущее физики 284

Физик и общество **293**
SSC: машина девяностых 293
Передавая факел 315
Обучая наименьший общий знаменатель 318
Наука и насилие 321
Благодарности 324
Предметный указатель 327

От редакции

Перевод этой книги на русский язык выполнен благодаря любезному разрешению автора, который также оказал огромную помощь своими ценными замечаниями и объяснениями некоторых сложных моментов книги. Переводчик выражает благодарность автору за понимание и плодотворное сотрудничество.

Переводчик также выражает благодарность кандидату физико-математических наук С. Г. Новокшенову за научные консультации, которые оказались жизненно необходимы при переводе книги.

Об авторе

Один из самых плодотворных теоретиков нашего века, Шелдон Ли Глэшоу в 1979 году стал одним из лауреатов Нобелевской премии по физике за достижения в установлении ключевой концепции современной физики — теории электрослабых взаимодействий, концепции, которая успешно объединила элекромагнитные и слабые взаимодействия.

Затем он ввел идею о четвертом кварке, который окрестили «очарованием» и существование которого впоследствии подтвердилось на опыте. Профессор Глэшоу также знаменит своим вкладом в поиск Теории великого объединения, связывающей все силы природы с сильным взаимодействием.

Глэшоу — автор более двухсот публикаций, а в 1988 году вышла его книга «Взаимодействия: путешествие через разум физика, занимающегося частицами», написанная вместе с Беном Бова. Профессор Глэшоу, часто пишущий научно-популярные статьи, в настоящее время является редактором по физике нового научно-математического журнала для студентов «Квант».

Доктор Глэшоу родился в Нью-Йорке; его родители иммигрировали из царской России в начале двадцатого века. Он закончил знаменитую среднюю школу естественных наук в Бронксе и продолжил образование в Корнелле, а докторскую диссертацию защитил в Гарварде.

В середине шестидесятых годов Глэшоу вернулся в Гарвард, чтобы стать профессором физики после преподавания и участия в исследованиях в институте им. Нильса Бора в CERN, в Калтехе, Стэнфорде и Беркли. Будучи рационализатором, сейчас он руководит Хиггинской и Меллонской кафедрами в Гарварде.

Профессор Глэшоу был избран в Национальную академию наук и Американскую академию искусств и наук, а также получил множество других наград, включая премию Оппенгеймера и пять почетных докторских степеней в США, Франции и Израиле.

Предисловие

В детском возрасте я был очарован механизмами некоторых приборов, например, часов или радиоприемников, и просто не мог не разбирать их, стремясь узнать, как же они работают. Моим собственным детям такое стремление к разрушению не свойственно: вряд ли они когда-нибудь станут учеными. Вторая мировая война заставила меня выбрать науку своей профессией. Когда мне было десять лет, мой старший брат (который впоследствии стал десантником и служил в Африке и в Европе, потом был дантистом, а сейчас он — пенсионер) объяснил мне, почему самолеты, которые летают на малой высоте, сбросив бомбы, вынуждены совершать маневры уклонения — что стало для меня введением в классическую механику. Несколько лет спустя две бомбы были сброшены на Японию. У меня не было возможности разобрать бомбу, но я просто должен был попытаться понять упоминавшиеся в новостях нейтроны, энергии связи и цепные реакции. Статьи в *Astounding Science Fiction* ввели меня в теорию относительности и квантовую теорию.

После войны отец устроил для меня небольшую химическую лабораторию в подвале нашего дома в Манхэттене. Я уже перерос общую химию и был увлечен (кто знает, почему?) химией селена. Мой «исследовательский проект» — по замене серы селеном при выращивании рассады томатов в воде — привел к тому, что я стал финалистом конкурса «Поиск научных талантов им. Вестингауза». Я начал готовиться к профессии физика, поступив в Корнеллский университет, после чего отправился в Гарвард писать диссертацию. Краткая автобиография, которую я совсем недавно написал для Ежегодника «Гарвард – Радклифф», рассказывает о том, что произошло потом:

Приехав в 1954 году в Гарвард, я, к своему ужасу, обнаружил, что у скромных аспирантов там нет ничего наподобие корнеллской «Комнаты игр», где можно оторваться. Вместо этого меня очень скоро поселили в закутке без окон, в одном из крошечных помещений, в промозглом подвальном этаже Лимановской лаборатории. Здесь с помощью войска древних и шумных механических калькуляторов, набора обтрепанных и никчемных старых книжек и получаемого время от времени одобрительно-добродушного кивка от руководителя моих исследований

Юлиана Швингера я должен был сделать монументальный вклад в Науку — в количестве шести экземпляров: отпечатанных, набранных, переплетенных, причем на стопроцентно (или больше того!) тряпичной бумаге. Моя ручная пиявка доставляла мне весьма ограниченное утешение[1].

Четыре года спустя я сбежал, чтобы насладиться двухгодичным оплаченным отпуском в Европе, который был любезно предоставлен Национальным научным фондом. (Примечание. Быть может, каникулы длились не полных два года. В течение этих лет я проделал работу, за которую через два десятка лет получил Нобелевскую премию.) Моя диссертация была надлежащим образом похоронена в гарвардских архивах, а моя пиявка — под Всемирным древом[2]. Пока я был за границей, Мюррей Гелл-Манн, родившийся за пределами США гуру элементарных частиц, по ошибке принял меня за вундеркинда из Восточной Германии и заманил в Калтех на то, что превратилось в 66 месяцев изгнания в чужой стране. Я открыл для себя смог, был оштрафован за переход улицы в неположенном месте, играл в го, занимался альпинизмом, преподавал в Стэнфорде и Беркли и пережил Движение в поддержку непристойной речи[3].

Обеспечив себя постоянной работой в университете, в 1966 году я с триумфом вернулся в Гарвард, получив всего лишь тридцатипроцентное снижение зарплаты. Теперь, наконец, я мог делать с другими то, что Гарвард сделал со мной! В Кембридже по-прежнему не было сносной общей комнаты, да и вряд ли она вообще когда-то появится, учитывая сегодняшние запреты на курение. Так что все это опять-таки возвращает к работе над одной проблемой, которая всегда очаровывала меня, которая прошла через умы многих поколений ученых, которую мне передал Швингер и которую я должен передать своим студентам, чтобы обратиться к ним в неподражаемой манере физика — «Что все это значит?».

В этом насмешливом эссе неявно присутствует тема данного труда: физика может быть как навязчивой идеей, так и простой забавой. Как замечательно, что нам платят за то, что мы настолько обожаем делать!

---

[1]Автор вместе со своими приятелями приобрел в аптеке пиявку, которую они кормили сырой печенью и которая стала для них домашним животным. Через несколько недель пиявка умерла. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

[2]После смерти пиявку ожидали пышные похороны под скульптурой Уолтера Гропиуса, находившейся во дворе Гарвардской школы аспирантов и называвшейся Всемирным древом. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

[3]Движение в поддержку непристойной речи было кратковременной (и достаточно незрелой) попыткой студентов, требовавших свободы ругани... в Калифорнийском университете в 1960-х гг. Оно стало первой ласточкой многочисленных студенческих демонстраций в США и Западной Европе. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

Сколько перемен произошло с начала моей карьеры! Люди на Луне, карманные калькуляторы, видеомагнитофоны — все лицо науки изменилось с появлением новых передовых дисциплин, вроде рекомбинационной генетики и тектоники плит. Однако наиболее радикальные преобразования произошли в физике частиц и космологии, которые являют собой противоположные концы размерной шкалы. Когда я начал свою учебу, ученые не имели твердого представления о том, как зародилась Вселенная или что такое элементарная частица, хотя за последние годы были разработаны две «стандартные модели»: одна представляет космологию Большого взрыва, другая — физику частиц через квантовую хромодинамику и модель слабого и электромагнитного взаимодействий. Теории макро- и микроуровней совместимы; как первую, так и вторую поддерживает впечатляющий объем эмпирических свидетельств, да и данных, которые противоречили бы одной из них, пока обнаружено не было. При совместном рассмотрении эти две структуры образуют начало формальной теории, которая лежит в основе всего, что есть, было и будет. Это почти религия, со своей собственной Книгой Бытия (...и, 15 миллиардов лет назад, стал свет!) и своей собственной Троицей (протон: неделимый, но состоящий из трех кварков). Однако мы ее еще не создали. Самые трудноразрешимые вопросы остаются без ответа.

Каким образом звезды сгруппировались в галактики, которые, в свою очередь, объединяются в скопления и даже в скопления скоплений, окруженные огромными сферическими пустотами, напоминающими мыльную пену в стоке кухонной раковины? Мы не знаем, из чего состоит сама материя Вселенной, так как звезды, облака газа и пыль не могут объяснить ее массу. Хотя большая часть материи неразличима для нашего глаза, мы знаем о ее гравитационных эффектах. Исходя из набора 17-и элементарных частиц, астрономы (несомненно, неохотно) привели нас к заключению, что Вселенная состоит преимущественно из чего-то сверхъестественного и неземного, которое почти точно не относится «ни к чему из вышеописанного».

Мы не знаем, почему частицы существуют, почему они имеют конкретную массу или почему они подвержены действию определенных сил. Наша стандартная модель ничего не выдумывает: она сообщает, что в данном контексте ответов нет. Более того, наша «великая объединенная теория» не является ни великой (время жизни протона неправильно), ни объединенной (гравитация остается за ее пределами); да и теорией, как таковой, она тоже не является (она не решает ни одну из выше описанных загадок).

Квантовая теория поля, союз квантовой механики и специальной относительности, в том виде, в каком ее представили Дирак, Швингер, Фейнман, Томонага и другие, превосходно служила нам в течение бо-

лее 40 лет и помогла создать стандартную модель физики частиц. Однако и она зашла в тупик: она просто не в состоянии описать гравитацию, а потому не способна объяснить самые ранние моменты создания Вселенной. Квантовая теория поля также не сумела ответить ни на один из современных вопросов, связанных с частицами. Нет никакого сомнения, что нам нужно сделать гигантский шаг в направлении более мощной концептуальной основы. Теория суперструн представляет собой претенциозную и модную попытку преодолеть все препятствия, допуская, что элементарные частицы на самом деле являются не точечными структурами, а крошечными петлями струн. В контексте суперструн совершенно естественно возникает квантовая теория гравитации. Быть может, однажды какая-то теория сможет ответить на знаменитый вопрос Изидора Раби: «Кто заказал мюон?». Пока что теория суперструн подобную возможность не предоставила; она лишь завела целое поколение блестящих аспирантов в десятимерную математическую трясину, сложность которой непрерывно возрастает.

В 1989 году на закрытом собрании Международной летней школы субъядерной физики в Эрике Антонино Цикики, ее основатель и директор, спросил одного из своих более молодых ораторов-теоретиков: «Может ли какой-либо эксперимент или даже воображаемый эксперимент определить истинность ваших слов?». Ответ был отрицательным. Вопрос Цикики имеет первостепенную важность в этом веке, когда под маской физики может скрываться математика. Юлиан Швингер верит в объединенную теорию всего, но (подобно мне) чувствует, что проявлять высокомерие, утверждая, что она у нас есть, еще слишком рано.

Физики, работающие в области частиц, и космологи, которые трудятся на противоположном конце космической лестницы, — последние пророки, предсказывающие научную революцию. Мы надеемся найти данные, которые докажут несостоятельность той теоретической системы взглядов, которую мы с таким трудом создали. Мы с нетерпением ждем наступления времени, когда собранные здесь эссе устареют, потому что наши последователи сформулируют более хорошую теорию того, как все это работает и что все это значит. Будущее будет полно шокирующих экспериментальных сюрпризов, которые заставят нас исправить и усовершенствовать свои стандартные модели и в большей степени приблизиться к Единому и Истинному Синтезу.

Жизнь физика

Физика элементарных частиц и я

Мои родители, Льюис Глэшоу и Белла Глэшоу, урожденная Рубин, иммигрировали в Нью-Йорк из Бобруйска в начале этого века. В Соединенных Штатах они обрели свободу и возможности, в которых евреям отказывали в Царской России. После многих лет упорного труда мой отец стал преуспевающим водопроводчиком, и его семья получила возможность наслаждаться удобствами, которые имеет средний класс. Тогда как у моих родителей не было ни времени, ни денег, чтобы самим получить университетское образование, они неуклонно стремились дать его своим детям. В поддержке и любви нас учили радостям знания и хорошо выполненной работы. Я сожалею лишь о том, что ни матери, ни отцу не довелось дожить до того дня, когда они своими глазами смогли бы увидеть, как я получаю Нобелевскую премию.

Когда я родился в 1932 году в Манхэттене, моим братьям Самюэлю и Жулю было 18 и 14 лет. Один выбрал профессию дантиста, другой — врача, что весьма порадовало моих родителей. Я же с ранних лет знал, что стану ученым. Быть может, это дело рук моего брата Сэма. Он заинтересовал меня законами, которым подчиняются падающие тела, когда мне было 10 лет, и помог моему отцу оснастить для меня в подвале химическую лабораторию, когда мне было 15. Я наловчился синтезировать селеновые галогениды. Никогда больше я не стал бы проводить такие опасные исследования. Мои родители всегда поощряли мои научные склонности за исключением, быть может, одного случая, когда мне посоветовали стать врачом, а наукой заниматься в свободное время.

Среди моих приятелей в средней школе естественных наук в Бронксе были Гари Фейнберг и Стивен Вайнберг. Мы подстрекали друг друга к изучению физики во время регулярных поездок туда-обратно в нью-йоркском метро. Другой мой одноклассник, Дэн Гринбергер, учил меня исчислению в школьной столовой. Математика, которую тогда преподавали в средней школе, заканчивалась стереометрией. В Корнеллском университете мне опять посчастливилось присоединиться к группе талантливых ребят. Я учился вместе с математиком Дэниелом Клейтманом, своим старым одноклассником Стивеном Вайнбергом и многими другими, которые впоследствии стали выдающимися учеными. В течение всего своего формального периода обучения я получил от сверстни-

ков не меньше знаний, чем от учителей. То же самое происходит сейчас и с нашими аспирантами.

Я приехал в Гарвард осенью 1954 года, чтобы написать диссертацию по физике. Дэнни Клейтман, Дейв Фолк и я составляли корнеллский контингент. Из пресловутой когорты корнеллцев были и Стив Вайнберг, Лоренс Миттаг и Тима Эренрайх. Стив выбрал для продолжения учебы Принстон, который меня отверг; Лоренс выбрал Йель и теперь обучает инженеров в Бостонском университете; Тима же (миссис Генри Эренрайх) являет собой частичку истории физики конденсированного состояния в Гарварде. Во время своего первого года в Гарварде я принял участие в работе над статьей по ядерной физике совместно с Уолтером Селовом, который тогда был младшим преподавателем факультета. Эта работа стала моей единственной вылазкой в эту древнюю и экзотическую дисциплину. В наши дни студенты Гарварда из секты ядерщиков должны одновременно регистрироваться в качестве студентов МТИ или, что еще лучше, совсем переключаться на тот институт.

Обычно я выбирал множество курсов, обращая особое внимание на вдохновенные и вдохновляющие лекции Юлиана Швингера, будущего руководителя моей диссертации. Покойный Джон Сакураи, не по годам развитой студент последнего курса, был моим одногруппником, как и Ву — прославленное присутствие физики частиц. Среди других курсов была знаменитая теория групп Джона Ван Флека. За многие годы она развилась в совершенно неузнаваемый, но абсолютно необходимый курс в теории групп для физики частиц, который сейчас преподает Говард Джорджи. Также я вытерпел первый курс, который преподавал Пол Мартин — относительность: специальная, общая и непостижимая.

Кроме того, мы должны были удовлетворить требованиям по изучению двух иностранных языков и, что для меня было третьим иностранным языком, по лабораторной работе. С французским языком проблем не было, но экзамен по русскому я сдал только благодаря хитрости. Теперь на нашем факультете не существует обязательного изучения иностранного языка. Физикой во всем мире занимаются на пиджин-инглиш[1]. Быть может, полезно было бы ввести университетскую версию курса по написанию пояснительных записок, который существует в колледжах.

Поскольку я уже испытал все радости и печали от бросания свинцовых брусков на хрупкие счетные трубки Гейгера в Корнелле, я не горел желанием проходить еще один лабораторный курс. Я использовал свою свободу выбора и решил сдавать дополнительный устный экзамен по методам экспериментальной физики. Моими экзаменаторами были Кен Байнбридж и Керри Стрит. Экзамен я выдержал. За прошедшие несколь-

[1]Смешанный англо-китайский язык; иногда обозначает плохой английский язык. — *Прим. пер.*

ко десятилетий, насколько мне известно, больше никто не выбирал такой путь, чтобы избежать лабораторного курса.

Настало время определиться с руководителем моей диссертации. К профессору Швингеру одновременно подошли человек десять: Клейтман, Фолк, Маршал Бейкер, Чарли Соммерфилд, Гарольд Вейтцнер, Рей Сойер, Чарли Уорнер, Боб Уорнок, я и, быть может, кто-то еще. Учитель дал нам задачу на вычисление функции распространения электрона в калибровке Кулона. Работая в сотрудничестве, мы появились через несколько дней, всей толпой, с решением, так что стратегия Швингера провалилась; ему пришлось придумывать задачу для каждого из нас.

Чарли Соммерфилд получил задачу о том, как магнитное поле воздействует на электрон. Он должен был показать, что первоначальное вычисление до четвертого порядка Карплуса и Кролла никуда не годится. В конечном итоге он стал первым, кому удалось вычислить аномальный магнитный момент до шестого порядка. Сейчас, работая в Йеле, он оставляет вопрос его вычисления с еще более высокой точностью другим.

Дэнни Клейтман, насколько мне помнится, получил задачу, связанную со свойствами электрона в электрическом поле. В конце концов, он написал докторскую диссертацию частично под руководством Швингера и частично под руководством Роя Глаубера. Одним из достижений Дэнни стал вывод аналога массовой формулы Гелл-Манна – Окубо в модели глобальной симметрии Швингера. Формула не работает, да и от глобальной симметрии нет никакого толку. С тех пор Дэнни стал великим математиком и, кроме того, моим свояком.

Я должен был работать над возможным синтезом слабых и электромагнитных взаимодействий с помощью недавно изобретенных калибровочных теорий Янга – Миллса, или неабелевых калибровочных теорий. Задача была несколько преждевременной. Экспериментаторы еще не определили VA-форму слабых взаимодействий[1]. Старая догма (STP), основанная на глупой теории и трех неправильных экспериментах, только что уступила место векторно-тензорной форме (VT-форме). От одного ложного эксперимента все еще не отказались, поэтому нарушение четности еще не было обнаружено.

За время моего пребывания в Гарварде мне особенно запомнилось сотрудничество с Уолли Гилбертом, Чаком Земахом, Кеном Джонсоном, Ирвином Шапиро, Джорджем Сударшаном и Абе Клейном. От Абе мне нужно было, чтобы он прочитал мне курс по теории поля. «Младшие преподаватели не обязаны преподавать», — это или что-то в этом роде сказал мне Клейн. Ирвин был первым студентом Роя Глаубера. Он со-

[1] VA-модель — модель взаимодействия векторных и аксиальных токов. — *Прим. пер.*

держал что-то вроде салона на Шепард Стрит и давал много больших вечеров. Чак вложил свою лепту в последнюю и неопубликованную часть великого опуса Швингера: ТКП, теория квантовых полей. К сожалению, мне так и не удалось ее понять. В третий год учебы в аспирантуре мы с Чаком вместе снимали квартиру в Брайтоне. Мы устроили, по крайней мере, одну славную вечеринку. Я задремал ранним вечером, а несколько дней спустя обнаружил, что Рой Глаубер засунул в мою флейту сосиску. Уолли Гилберт в Гарварде заканчивал диссертацию под руководством Салама в Имперском колледже. Она была связана, насколько я помню, с обратными дисперсионными соотношениями. Он, безусловно, был самым большим математиком из всех знакомых мне физиков. Все это происходило до того, как к нам пришел Артур Джаффе. Каким замечательным был переход Гилберта к практической биологии и каким успешным он оказался!

К весне 1958 года я собрал приличную диссертацию и получил от Национального научного фонда постдокторскую стипендию. Я решил провести один год в Москве, в институте им. Лебедева, и поработать под руководством Игоря Тамма. Это было легче сказать, чем сделать. Я защищал свою докторскую диссертацию в июле в университете Висконсина. В комиссию входили Швингер, Мартин и Франк Янг. Защита частично состояла из спора Швингера и Янга. Я неявно принял, что нейтрино, связанный с электроном, и нейтрино, связанный с мюоном, — это две разные частицы по трем причинам. Во-первых, с позиций калибровочной теории, универсальность слабых взаимодействий требовала существования отдельных нейтрино. Во-вторых, Гари Фейнберг, мой старый школьный приятель, который тогда, как и сейчас, работал в Колумбии, показал, что гипотезы промежуточного векторного мезона, в теории с одним типом нейтрино, привели к неприемлемой скорости для $\mu \to e\gamma$. И, что самое важное, гипотеза существования двух типов нейтрино была неотъемлемой частью учения Швингера. После того как Швингер убедил Янга, что мое допущение имеет физический смысл и способно давать предсказания, меня оправдали, так чтобы комиссия смогла решить мою судьбу. Три года спустя, в Брукхейвенской национальной лаборатории, Ледерман, Шварц и Стейнбергер доказали истинность схемы Швингера с двумя типами нейтрино.

Поскольку моя виза для поездки в Россию все еще не была готова, я принял приглашение вместе с Дэнни Клейтманом немного поработать в институте им. Нильса Бора. Это немного вылилось в весьма продуктивную двухгодичную работу в Копенгагене и в Европейском исследовательском консорциуме CERN. Визу для поездки в Россию я так никогда и не получил, несмотря на частые заверения со стороны нескольких русских консулов, что она будет готова «завтра».

Не стану останавливаться на своей ссылке из Гарварда, которая длилась семь с половиной лет. Если позволит читатель, перепрыгну лучше сразу на январь 1966 года, когда я переехал из Беркли в Гарвард, чтобы продолжить свое плодотворное сотрудничество с Сидни Коулменом, своим первым, лучшим и несколько неофициальным студентом. К тому времени мы уже успешно исследовали электромагнитные свойства барионов в модели унитарной симметрии Гелл-Манна. Кроме того, мы упустили открытие массовой формулы Гелл-Манна – Окубо и тока Кабиббо. Период с 1966 по 1970 был ужасно скучным. Несмотря на то, что в 1967 году Стив Вайнберг блестяще синтезировал Копенгагенскую $SU(2) \times U(1)$-модель слабого и электромагнитного взаимодействий с механизмом Хиггса – Киббла спонтанного нарушения симметрии, похоже, что никто этого не заметил или никому до этого не было дела.

В 1970 году к нам присоединились два блестящих доктора наук Джон Илиопулос и Лучано Майани. Вместе мы открыли механизм GIM (Glashow – Iliopoulos – Maiani), который является важной составляющей современной теории слабого и электромагнитного взаимодействий. Однако предсказанное нами существование новой разновидности материи — очарования — приняли не все. Тогда я взял отпуск, чтобы стать приходящим профессором в университете Эйкс-Марселя, вместе с Джоном и моим студентом Эндрю Йао, который сейчас является известным ученым в области вычислительной техники. Мы сумели устранить некоторые, но не все, бесконечности, портившие модели слабого и электромагнитного взаимодействий. Мы были в Марселе, когда Тини Велтман сообщил нам о знаменательном достижении своего молодого студента Герардуса т' Хоофта: доказательстве перенормируемости спонтанно нарушенной теории электрослабых взаимодействий. Темп открытий начал расти, поэтому я поспешил вернуться в Гарвард. В сентябре 1971 года во время чистки кукурузы, которую должны были приготовить к обеду в доме Клейтонов, я познакомился со своей будущей женой. Джоан и жена Дэнни, Шэрон, — две из четырех знаменитых сестер Александера. Тем временем, экспериментаторы во всем мире наперегонки стремились открыть предсказанные нейтральные токи, и Гарвард заполучил пять весьма обещающих молодых физиков, которые работали в теории частиц: Говарда Джорджи, Алваро де-Рухула, Хелен Квинн, Тома Аппелквиста и не по годам развитого аспиранта Дэвида Политцера.

В 1973 году группа ученых из CERN[1] открыла нейтральные токи, быстро подтвержденные в лаборатории им. Ферми группой, которой руководил наш Карло Руббиа. Более того, группа Карло выдала убе-

[1]Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire (фр.) — Европейский центр ядерных исследований. — *Прим. пер.*

дительные свидетельства существования новой формы материи, которая мучительно походила на предсказанные нами очарованные частицы. Сложившаяся в то время ситуация была пересмотрена в виде пьесы, представленной в лаборатории им. Джефферсона 3 декабря 1973 года. Алваро де-Рухула был председателем (экспериментатором), Хелен Квинн — оратором (консервативным теоретиком), Говард Джорджи — говорящим компьютером, а я играл роль создателя модели.

Рой Вайнштейн, который впоследствии стал деканом факультета естественных наук в Хьюстоне, пригласил меня выступить на ежегодном заседании по экспериментальной мезонной спектроскопии в Нортистерне в апреле 1974 года. Моя лекция называлась «Очарование: изобретение ждет открытия». Я сказал, что съем свою шляпу, если до следующего подобного заседания очарованные частицы не будут открыты. Более того, заявил я, открытие будет сделано либо в физике нейтрино, либо в e^+e^--физике. Естественно, J/ψ-частицу открыли во время ноябрьской революции 1974 года в Стэнфорде и в Брукхейвене одновременно. Группа гарвардских теоретиков была убеждена, что было открыто очарование. Действительно, Аппелквист и Политцер, в сущности, предсказали появление чармониевого резонанса в e^+e^--аннигиляции. Однако это не убедило остальной мир. Насколько мне известно, лишь группа Сахарова в Советском Союзе, группа Джона Илиопулоса во Франции и ребята из Корнелла разделили нашу уверенность и энтузиазм. Скептиков не убедило даже наблюдение Ником Самиосом в марте 1975 года очарованного бариона, созданного нейтрино. На самом деле, в начале 1976 года группа ученых Стэнфордского центра линейного ускорения частиц (SLAC) опубликовала статью, в которой описывалось поражение, которое они потерпели, когда попытались найти очарование. К счастью, я сумел убедить Герсона Гольдхабера вернуться и взглянуть еще раз. Он послушался моего совета, и к весне 1976 года очарованные частицы наконец-то были обнаружены в огромных количествах на SPEAR со всеми свойствами, которых от них ожидали. На заседании 1976 года конференции по экспериментальной мезонной спектроскопии шляпу мне есть не пришлось. Вместо этого всем участникам раздали маленькие и вонючие леденцы в виде шляп.

На сцене появилась теория сильных взаимодействий — квантовая хромодинамика. Это опять-таки была неабелева калибровочная теория, но она оперировала скрытой переменной, которую назвали цветом. У теории было множество корней, и открыли ее несколько ученых. Несомненно, что кварки Гелл-Манна были ее существенной частью. Но не менее важны были и наблюдения Далитца и Морпурго успеха кварковой модели при условии, что кварки ведут себя подобно бозонам. Намбу и Гринберг предложили понятие скрытой цветовой степени свободы.

Одним из решающих этапов стало открытие асимптотической свободы неабелевых калибровочных теорий. Именно она стала ключом к пониманию успеха кварковой партонной модели глубоконеупругого лептонного рассеяния и узкой наблюдаемой ширины J/ψ-частицы. Асимптотическая свобода была открыта Дэвидом Политцером в Гарварде и одновременно принстонской группой физиков.

Квантовая хромодинамика и теория электрослабых взаимодействий составляют то, что сейчас известно под названием стандартной теории физики элементарных частиц. Судя по всему, она предлагает полное и правильное описание феноменологии частиц через 17 произвольных параметров. Свободных концов нет: не наблюдалось ни одного явления, которое не соответствовало бы этой теории.

По крайней мере, таковых явлений не наблюдалось до марта 1984 года. CERN является мировым центром физики высоких энергий по простой причине: в течение более чем десяти лет он давал миру высокие энергии. Удача улыбнулась им в 1983 году, когда Карло Руббиа, со своей командой из 137 человек, открыл в CERN промежуточные $W^{\pm}$- и Z^0-бозоны, которые так давно искали. Кажется, что и эти частицы ведут себя также, как предсказывает теория. Однако самые последние данные, полученные в CERN, говорят об открытой аномалии. Наконец-то появилось что-то, что, судя по всему, невозможно объяснить на основе стандартной модели. Снова могут появиться сюрпризы, которые всегда были неотъемлемой частью игры частиц. Так давайте же будем на это надеяться.

Примечание автора: Увы, случиться этому было не суждено. Более точные данные и более внимательная интерпретация не выявили никаких расхождений с теорией. Стандартная модель остается последней. Скоро мы увидим, что нам смогут сказать более крупные ускорители, которые сейчас начинают работать.

В 1927 году один из моих гарвардских предшественников Перси Бриджмен написал: «Каким бы ни было чье-либо мнение относительно простоты законов или материальной структуры природы, нельзя спорить с тем, что обладатели хоть какого-то убеждения имеют реальное преимущество в погоне за физическим открытием. Несомненно, что многие простые связи еще только предстоит открыть, и тот, кто твердо убежден в существовании этих связей, обнаружит их гораздо скорее, чем тот, кто не совсем уверен в их существовании».

Университетский изгнанник в Калифорнии

Нет никаких сомнений в том, что я истинный нью-йоркец. Однако в течение уже почти 30 лет, за исключением короткого периода, я живу в Массачусетсе, и, наконец-то, стал бостонцем до такой степени, что однажды даже пировал в знаменитом Паркман-хаузе во время правления великого Кевина Уайта[1]. Если быть более точным, то я обитаю в гордом и непокорном соседе Бостона — Бруклине.

Ужасно, но в течение пяти с половиной лет я был предметом американских репрессий: я был вынужден вести суровую жизнь холостяка в университетском изгнании в отдаленных землях нации — в Калифорнии. Я голодал в Пасадене (где рестораны наглухо закрыты в День Благодарения); я подвергался землетрясениям в Пало-Алто и Движению в поддержку непристойной речи в Беркли. Жить, еле сводя концы с концами в земле садящегося солнца и силиконовых богинь, было рискованно, и я удрал при первой же возможности вернуться в слякоть в январе 1966 года туда, где мое жалование было урезано всего лишь на 30 процентов. Все это теперь уже история, но и у моего темного облака все же есть серебряная каемочка. Немногие прожили так долго в столь странной земле и вернулись оттуда практически невредимыми. Я стал экспертом в области привычек Запада, истинной калифорнийской Маргарет Мид[2], первым экзобиологом с обучением по месту работы.

До моего приезда в Калифорнию там было сделано множество открытий: искусственные элементы, циклотроны, золотые прииски и Тихий океан — лишь несколько тому примеров. Так позвольте же мне вернуться к гораздо более поздним событиям в истории своей собственной дисциплины, физики элементарных частиц.

Многие калифорнийцы — потомки басков, которых привезли в Калифорнию пасти овец. Ричард Фейнман, который сам не является пастухом-баском, родом из Фар-Рокуэй, который находится не так уж

---

[1]Кевин Уайт был мэром Бостона в 1968–1983 гг. Паркман-хауз исторически принадлежит Бостону и использовался Уайтом во времена его правления для достаточно расточительных приемов. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

[2]Мид Маргарет (16 декабря 1901, Филадельфия — 15 ноября 1979, Нью-Йорк) — американский этнолог, культуролог, общественный деятель. — *Прим. пер.*

далеко от Шипшед-Бэй. Поэтому именно Фейнману впервые удалось вычислить лэмбовский сдвиг, только ответ он получил неправильный[1]. Правильный результат получил руководитель моей диссертации, Юлиан Швингер, который лишь впоследствии перебрался в Калифорнию, но, судя по последним слухам, не для того, чтобы пасти овец. Диаграммы Фейнмана, ключ к его вычислительным навыкам, стали оплотом декоративного искусства. Они являют собой превосходный пример того, что мы, физики, называем «спин-оф»[2] — вклады в высокую технологию, которые сделаны по воле счастливого случая и неизбежно сопутствуют абстрактной мысли; оправдание свободного времени класса теоретиков, которое в конечном счете приносит доллары и центы, — истинный секрет американского «ноу-хау». Тефлон, Tang[3] и искусственная содовая — это опять-таки убедительные примеры спин-офа, дары чистой науки грязным грешникам. Кто бы отказал нам в каких-то там 5 миллиардах долларов, чтобы мы могли построить Сверхпроводящий суперколлайдер (SSC) и продолжить свою великую традицию[4]?

Доналд Глазер — еще один калифорниец, которому улыбнулась удача. Давным-давно, размышляя над любопытным поведением своего N-го пива, он изобрел пузырьковую камеру — знаменитый и опасный инструмент, который привел к открытию сотен новых и ненужных элементарных частиц. Из-за этого возникла серьезная дилемма: «Являются ли все эти частицы в равной степени, а следовательно не слишком, элементарными?» Именно так на это отреагировал Джеффри Чу, руководитель прославленной школы Максимальной Аналитичности и защитник Ядерной Демократии. Единственной альтернативой были кварки, которые все это время не мог правильно объяснить даже Мюррей Гелл-Манн. В конце концов, победу одержали кварки, которые даже умудрились очиститься от своего более радикального дополнения, Фронта Освобождения Кварка, и привести в исполнение успешную программу утвердительного действия в отношении цвета. Все это звучит как история со счастливым концом, но не забывайте и о следующем: Ядерная Демократия мертва, мертва так же, как мертво ядерное семейство, а бурный рост популяции элементарных частиц ничуть не уменьшается. И все это происходит из-за пузырьковой камеры Дэна. Мораль: Никогда не делай сегодня то, что, быть может, никогда не сделают завтра.

---

[1]Автор использует игру слов: фамилия ученого, открывшего этот сдвиг, — Lamb, а в английском языке слово «lamb» означает «ягненок». — *Прим. пер.*

[2]Побочный продукт (англ.) — *Прим. пер.*

[3]Торговое название порошка, который при добавлении воды превращается в апельсиновый напиток (что-то вроде известных всем Yupi, Invite, Zuko). Считается, что его изобрели для астронавтов. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

[4]*Примечание автора*: С тех пор цена SSC поднялась до 10 миллиардов долларов.

Понятно, что Луис Альварес скоро устал от множества новых частиц, которые он постоянно открывал в своих пузырьковых камерах. «Увидел одну, значит увидел все», — сказал он. Благодаря своей на вид испанской фамилии, он отправился в Египет, чтобы изобрести АП-сканер: автоматизированную пирамидологию. Рискуя жизнью и используя самые мощные космические лучи, он искал тайные комнаты в великой пирамиде Хеопса и мечтал о несказанных богатствах фараонов, которые он может заполучить. Поиски оказались тщетными, и Альварес вернулся в Калифорнию, разоренный и озлобленный. Вместе со своим сыном он решил раскрыть секрет вымирания динозавров и предсказал, совершенно бесспорно, что то же самое произойдет и с нами. В точности через 13 миллионов лет (и это, кстати, объясняет врачам и сочинителям песен мистический, но весьма обоснованный страх, который вызывает число 13, или тристадекафобию); в точности через 13 миллионов лет ужасная, но невидимая супруга Солнца, Немезида, вернется, чтобы пожать свой разрушительный урожай и положить конец тому миру, который мы знаем. Глупые астрономы даже сейчас ищут в небесах Немезиду. Когда они ее найдут, быть может, они предскажут точный день, час и минуту неизбежной кончины нашего вида. Все надежды и стремления людей в отношении будущего погибли, потому что Альварес имел удовольствие сказать то, что он сказал.

Кендалл, Фридман и Тейлор, трудясь в Стэнфордском центре линейного ускорения частиц — маленькой лаборатории всего около двух миль длиной, где дробят атомы, — терпеливо повторяли опыты Эрнеста Резерфорда, поставленные 56 лет назад, но при несколько более высокой энергии. Подобно тому, как их предшественник обнаружил ядро атома, они нашли свидетельство существования точечных частиц внутри самого протона, точечных частиц, которые они назвали партонами. Конечно же, они ошиблись. Их точечные частицы были ничем иным как кварками, которые несколько лет назад предсказал, но забросил Гелл-Манн. Несмотря на эту ошибку, Кендалл и Фридман сбежали из ссылки, но Дик Тейлор, как ни жаль, все еще томится в золотом штате[1].

И неизбежно мы приходим ко клану великого Гольдхабера, американского ответа швейцарским Бернулли, и калифорнийскому Герсону, в частности. Стояла холодная зима 1976, и большинство жителей экономили и копили деньги на фейерверки, чтобы отпраздновать наше Двухсотлетие. Гольдхаберы были слишком заняты, чтобы интересоваться решающей битвой, которая происходила между очарованным кварком и Злой Ведьмой с Запада. Ведьма зашла так далеко, что начала отрицать право первородства очарования, поместив официальное заявление

[1]*Примечание автора*: Кендалл, Фридман и Тейлор за открытие кварков в 1990 году получили Нобелевскую премию по физике.

в *Physical Review Letters*. Герсон, несмотря на то, что находился в Беркли, был нашим самым ценным шпионом, работающим на обе стороны. Мы провели последнюю тайную встречу в апреле в Висконсине. Конференция по экспериментальной мезонной спектроскопии была назначена на июнь. Если очарование не было бы найдено к тому времени, меня бы заставили проглотить свою шляпу. Времени оставалось мало. Однако наш отчаянный план ожидал успех, и очарование открыли вовремя. Злая Ведьма с Запада была не только побеждена, но и обращена и назвала Герсона Калифорнийским Ученым Года. Ему также вручили высшую награду Калифорнийского университета — оранжевую круглую парковочную наклейку[1].

Несмотря на все эти великие открытия, неудивительно, что некоторые опыты, особенно в Калифорнии, проводятся не слишком хорошо. Я написал небольшое стихотворение, несколько неприятное, которое прославляет некоторые из этих результатов, а именно: поиски дробных или магнитных зарядов, а также открытие дистанционного наблюдения и аномалонов. Стихотворение заканчивается на созерцательной ноте. Но сначала небольшая предыстория.

Джеймс Клерк Максвелл не верил в существование фундаментальных частиц, которые переносят заряд, будь он электрическим или магнитным. Тем не менее, признавая очевидную симметричность, существующую между электричеством и магнетизмом, как в старой поговорке: «Почему кошка, если ее потереть о стекло, превращается в подобие компаса?», он направляет нас на путь, который неумолимо приводит к великому и грандиозному современному объединению и к микроволновым печам. В 1896 году прославленный ирландский физик Джордж Джонстон Стоней, воодушевленный своим повторным открытием колеса, которое принесло в Ирландию Промышленную революцию, назвал элементарный носитель электрического заряда в честь своей молодой подруги Амбер[2]. Будучи когда-то названным, электрон наблюдался в лаборатории лишь год спустя. Максвелл пришел бы в ярость, если бы уже почти два десятилетия не лежал в могиле.

Это приводит нас к Полю Адриену Морису Дираку, которого однажды единогласно назвали Величайшим Живым Физиком в мире и чей

[1]В Калифорнийском университете в Беркли из-за недостатка места весьма сложно припарковать машину. В зависимости от своей значимости любой человек получает разрешение на парковку в определенных местах. В 60–70-х гг. вторым по значимости был голубой треугольник, прикрепленный к лобовому стеклу машины (который был у меня). Этот знак позволял парковать машину почти в любом месте. Но самым важным знаком являлся оранжевый круг, который позволяет парковать машину вообще в любом месте. Обычно оранжевый круг вручают только лауреатам Нобелевской премии. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

[2]«Amber»в переводе с греческого означает «электрон». — *Прим. пер.*

знаменитый учебник по квантовой механике отвергло престижное издательство *Cambridge University Press*. В отместку за подобное пренебрежение Дирак послал свою книгу конкуренту этого издательства *Oxford Press* и ушел работать в университет штата Флорида в Таллагассе. Между тем, он осознал, что электромагнитная симметрия требует, чтобы Максвелл не был прав даже наполовину. Существование электрона требует существования магнитных зарядов.

Все предсказания Дирака оказались истинными. По этой причине экспериментаторы открывают магнитные монополи каждые несколько лет только для того, чтобы потом отказаться от них по техническим причинам. Мой коллега Эд Парселл — единственный физик-экспериментатор, который искал магнитные монополи, но не нашел ни одного. За это он получил столь желанную Нобелевскую премию по физике.

Кварки имеют дробные электрические заряды, которые не должны быть видимыми. Тем не менее, многие экспериментаторы ищут эти дробные заряды. Они надеются спровоцировать еще одну революцию в физике. Видимые дробные заряды и магнитные монополи Дирака весьма любопытно связаны между собой: либо первые, либо вторые, в принципе, могут существовать. Первые или вторые, но не те и другие одновременно. Таким образом, замечателен тот факт, что обе эти взаимоисключающие категории были описаны учеными, работающими в одной и той же лаборатории в Калифорнии.

Что касается мнимых наблюдений дробных зарядов, то, быть может, чем меньше о них говорить, тем — лучше. Эти эксперименты проводились десять лет назад; их никто не подтвердил, но и никто от них не отказался. Один из кандидатов в магнитные монополи появился в 1982 году в День Святого Валентина. Год спустя я послал исследователю Бласу Кабрере следующую телеграмму:

Красные розы, зеленая трава:

Пришло время для монополя два.

Ответа я еще не получил.

Некоторые теоретики, известные как новорожденные космологи, несколько прояснили данный предмет, выдав два альтернативных сценария. (Сценарий, кстати говоря, — это то, как вы называете теорию, если таковых у вас больше одной.) Согласно одному сценарию Вселенная была создана битком набитой магнитными монополями. Их было так много, что миллионы лет назад Вселенная прекратила свое существование. Согласно второму, вероятно, более правдоподобному, сценарию, во всей видимой Вселенной существует лишь один магнитный монополь — наверное, он перешел в нее через аппарат Кабреры в 1982 году в День Святого Валентина.

Третий замечательный результат появился недалеко от Пало-Алто, в SRI[1], который был известен как Стэнфордский исследовательский институт, пока его цели не разошлись с целями университета. Когда я учился в средней школе, я был фанатом Дж. Б. Райна и его демонстраций экстрасенсорного восприятия, которые он проводил в Дьюкском университете. Тогда как его эксперименты были неубедительными, эксперименты Путоффа и Тарга в SRI оказались достаточно убедительными, чтобы опубликовать их в «Трудах IEEE[2]». Способность человека к дистанционному наблюдению позволяет несведущему индивидууму, помещенному в закрытую комнату, описать наблюдения своего коллеги, который находится на отдаленном расстоянии. Мой коллега Пол Горовиц, в сотрудничестве с Амейзингом Рэнди, составил специальную программу проведения экспериментов для подтверждения данного эффекта. Ученые из SRI сочли, что в ней нет необходимости.

Наконец-то я добрался до экзотической дисциплины ядерной физики, раздела физики, которым не слишком активно занимаются в Гарвардском университете. Мало кто из моих коллег понимал, что существует ровно $3 \times 7 \times 19$ известных видов ядер атомов, которые живут, по крайней мере, в течение года. Даже в МТИ интерес к ядерной физике, судя по всему, идет на убыль, так как они даже не подавали дорогостоящую заявку на самый последний ядерный ускоритель. Одной из причин этого плачевного отсутствия интереса в фундаментальной науке является факт, что самой последней полудюжине синтетических химических элементов, весьма отличных от плутония или кюрия, не присвоили даже имен, только числа. «Не сворачивай, не вращай и не уродуй меня!» — кричат их пренебрегаемые ядра. Именно в этом контексте калифорнийские ученые-ядерщики из Калифорнии сделали шаг вперед, чтобы заполнить весьма нужный пробел в литературе. Они обнаружили новый эффект, в действительности, новую форму ядерной материи, которой невозможно дать ни одно рациональное объяснение: *аномалон*. И опять, как и в случае с дробным зарядом, кандидатом в монополи и дистанционным наблюдением, анамолон является исключительно калифорнийским опытом. И, подобно множеству мнимых великих калифорнийских вин, он проходит не слишком удачно.

Последний эксперимент, который я рассмотрю, — это экспериментальное наблюдение дзета-частицы, о котором сообщили на Международной конференции по физике высоких энергий, которая состоялась в Лейпциге летом 1984 года. Результаты были получены с помощью детектора с хрустальным шаром, действующего в немецком электронно-

[1]Stanford Research Institute. — *Прим. пер.*

[2]IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров по электротехнике и электронике). — *Прим. пер.*

синхротронном центре в Гамбурге. Детектор с хрустальным шаром был создан калифорнийцами в Калифорнии. Мы с директором лаборатории согласились в том, что открытие дзета-частицы, окажись оно истинным, стало бы самым знаменательным событием в физике частиц за последнее десятилетие[1].

Теперь стихотворение:

Свободному морскому ушку

Модель хромодинамики, модель взаимодействия,
Стандартная и точная, устроит даже вас.
И хоть вы нам талдычили, что нет очарования,
Вы поняли, что движется не Солнце, а Земля.
И все ж вы так стремитесь создать объединение,
Что вам явилось дробного заряда видение.
Когда вы кашу заварили и в ванной зрите океан,
Не забывайте свой прекрасный с монополем роман.
Олимпиада ваша была не так плоха,
Пускай она вернется на круги своя.
Пусть будет даже теннис для спорящих сторон,
А по дорожке мчится сам аномалон.
Но фильмы Голливудские не делаются слаще,
Глядишь ты их по телеку или с больших дистанций.
Так пристегните же ремни, ибо вы опять
Нам в Лейпциге сказали, что мы желали знать:
Что вы соорудили волшебный шар хрустальный,
Который для немцев, наверное, банальный.
И вот все боятся, что дзета-частица
Прикончит теорию, что веселится.
Но я поклянусь вам, что дзета лишь снится
Тем, кто очень скоро испишет страницы
Признанием в том, что миру поведал
О вещи, которой не знал и не ведал.

[1] *Примечание автора*: Вскоре после написания этой главы от мнимого открытия дзета-частицы отказались.

Тайны материи (с Питером Коста)

Перед вами отредактированная версия разговора Глэшоу и Питера Коста, директора Гарвардской службы новостей и общественных дел.

Пока мы не начали говорить о физике, мне хотелось бы обсудить с Вами некоторые личные вопросы, которые Вы затронули в недавно написанной Вами автобиографии. Шумы. *В этой книге Вы рассказываете о своем превращении из «зануды», — по-моему, именно так Вы назвали себя, — посещавшего среднюю школу Бронкса в Нью-Йорке, в лауреата Нобелевской премии. На протяжении всей книги Вы благодарите своего отца, который был водопроводчиком и ремесленником, за то, что он вселил в Вас любопытство по отношению к тому, как все работает, которое до сих пор живет в Вас. Как Вам удается поддерживать огонь любопытства после стольких лет научных исследований?*

ГЛЭШОУ: Это сложный вопрос. Вы упомянули о «занудах». Да, в наше время «зануд» можно счесть вымирающим видом, и я самый большой их защитник. Я охочусь за «занудами», потому что, в конечном счете, из них получаются весьма многообещающие аспиранты.

Насчет того, почему мне до сих пор интересно? Я стал заниматься физикой, потому что считал ее гораздо интереснее всего остального. Я не отличался спортивными достижениями... поэтому я взялся за физику, так как она казалась мне весьма забавной. Она по-прежнему остается для меня именно такой. Она очень увлекательна, и к ней невозможно не пристраститься.

Я полагаю, что сейчас я не так сообразителен, как раньше, но все эти вопросы интересуют меня, по крайней мере, ничуть не меньше. И это всегда одни и те же вопросы: Зачем все это? Из чего все это сделано? Как все это работает? Эти вопросы по-прежнему очаровывают меня.

В детстве, когда Ваш взгляд падал, скажем, на радиоприемник, Вам не хотелось его разобрать?

ГЛЭШОУ: Конечно, хотелось. Я разбирал часы, я разбирал радиоприемники. Но мне никогда не удавалось собрать их обратно. Всегда оставалось что-то, что не подходило никуда, и вновь собранный механизм

уже не работал. Именно поэтому я не стал физиком-экспериментатором. У меня была просто восхитительная электрическая железная дорога модели 1930-х годов, которую я умудрился разобрать и которую мне так и не удалось собрать обратно. Моя экспериментальная жизнь полна трагедий.

Поэтому Вы продолжили разбирать вещи, пока не достигли субатомного уровня, так сказать.

ГЛЭШОУ: Так сказать.

В своей книге Вы объясняете сложность субатомных частиц: бозонов и кварков, — но, кроме этого, Вы приводите нас в ужас историей о Вашем отце, который упал в цистерну с расплавленным свинцом и при этом выжил. Расскажите нам об этом подробнее.

ГЛЭШОУ: Мой отец приехал в США из России в 1905 году. Сначала он брался за любые земляные и строительные работы. Как-то раз он то ли строил дом, то ли проводил там канализацию. Рабочие использовали расплавленный свинец в местах стыка, и он упал в цистерну с этим свинцом. Мне он объяснил, что был защищен тончайшим слоем воздуха, а потому не получил серьезного ожога.

Я был под впечатлением от физики и от неожиданного случая, в результате которого не произошло ничего серьезного.

Ваш отец приехал через остров Эллис во время иммиграционной волны. Что с ним произошло на этом острове? Многие люди, прошедшие через него, получали другие имена.

ГЛЭШОУ: Наша русская фамилия была Глуховские. Ни офицер иммиграционной службы, ни мой отец не считали, что с такой фамилией можно жить в Америке. Они очень дружелюбно побеседовали, немного поразмыслили — совсем по-приятельски, как говорил мой отец, — и придумали эту, столь эксцентричную, фамилию — Глэшоу. Теперь в Соединенных Штатах сотни Глэшоу.

Расскажите нам о той движущей силе, которая заставляет преуспевать и очень часто встречается у детей иммигрантов. У Вас два брата, один из которых врач, а другой — дантист. Они оба весьма преуспевающие люди. Повлияли ли на Вас ожидания успеха или неудачи, когда Вы были ребенком?

ГЛЭШОУ: Моих родителей очень волновала моя учеба в школе, как и меня сейчас волнует, как учатся мои дети. Но я думаю, что это было не столько влияние родителей, сколько наше окружение, состоящее из людей среднего класса, половина из которых были евреями, а вторая половина — ирландцами, поселившимися в Манхэттене. Во всем этом чувствовалось сильное желание преуспеть, вырваться из этого убогого мира, где люди не жили, а существовали. Другие дети тоже преуспевали, многие из них стали врачами, дантистами, юристами

и учеными. Вся окружающая нас обстановка усиливала желание учиться.

Точно так же как сегодня в детях присутствует сильное стремление не выделяться, не стремиться к чему бы то ни было и не быть «занудой», в то время это было не столько желание быть «занудой», сколько желание добиться успеха в учебе.

Образование было средством продвижения наверх.

ГЛЭШОУ: Именно так.

Вы написали, что среди умственных занятий нет более требовательного, чем физика. Так что же в физике такого сложного?

ГЛЭШОУ: Нет, я не хочу сказать, что физика — сложная наука. Я думаю, что современная биология намного сложнее: нужно помнить названия всевозможных чертовских химических соединений. В физике этого не требуется. Самое главное в той физике, которой занимаюсь я, — а это физика элементарных частиц, — то, что мы не знаем правил. Это состязание, игра. Это что-то вроде азартной игры, когда вы ставите свои деньги, согласно тому, как, по-вашему, работает Природа. Затем, если Вам повезет, то Вы докажете свою правоту. Не существует чувства более сильного, чем то, которое испытываешь, выиграв это пари с Природой.

Как-то раз мы с приятелями решили, что должен существовать четвертый тип кварка, и через десять лет он был обнаружен. И это весьма приятно. Такое чувство я испытывал несколько раз за свою жизнь. Это вызов, игра. Это все равно, что пойти посмотреть выступление фокусника и пытаться разгадать, как он делает эти фокусы. Это все равно, что читать детектив и пытаться предвосхитить, чем же все закончится. Все это вместе взятое есть свойственная человеку деятельность, сконцентрированная в одном простом вопросе: как все это работает.

Но Ваш детектив предполагает, что Вам знаком язык очень сложной математики?

ГЛЭШОУ: Он предполагает знание языка не столь сложной математики. Невозможно понять физику, не понимая математики; невозможно понять химию, не понимая физики. Это очень важно, поскольку, как Вам известно, Гарвард делится на три части: социологов, гуманитариев и ученых.

В Гарварде можно общаться с людьми, работающими в других областях науки. Но ученые непременно должны заходить на территорию других, например, гуманитариев, потому что те работают с горизонтальными дисциплинами, где, в некотором смысле, обладают поверхностным знанием широкого разнообразия вещей. Но наша дисциплина является вертикальной, где все последующее зависит от чего-то предыдущего. Им не известна наука. Мы немного понимаем в литературной критике, в истории, в экологии или в социологии. Мы всегда вынуждены что-то

обсуждать или оспаривать на их территории и никогда на нашей, потому что им недостает этих навыков.

Мы действительно живем в двух обществах, хотя, в некотором смысле, это не так. Существует одно общество: образованных людей, которые все понимают, и остальных, которым это не дано. К сожалению, две третьих Гарварда не обладают лучшей частью человеческого знания. *Вероятно, сейчас вполне уместно упомянуть о Вашем требовании от студентов научной грамотности.*

ГЛЭШОУ: Это сущий беспорядок. Но безграмотность присутствует не только в науке; она связана не только с математикой, как вам известно; большинство не имеет представления и об истории. Рискну утверждать, что менее половины населения Соединенных Штатов знает относительный временной порядок Американской и Русской революций. Очень немногие могут найти на карте мира Рим.

В науке дела обстоят и того хуже. Некоторые стараются усовершенствовать научное образование. Ассоциация преподавателей естественных наук очень амбициозно пытается объединить обучение всем естественным наукам в одно целое. Всю науку можно вместить в одно имеющее смысл целое вместо того, чтобы учить ей по кусочкам, там и сям. *Почему существует так много талантливых математиков, имеющих физическое образование, но сравнительно мало физиков, которые изначально обучались математике?*

ГЛЭШОУ: Обычно стремление заниматься абстрактной математикой необратимо. Есть некоторые физики, которые переходят в более абстрактные математические круги. Хорошим примером тому является Эйнштейн. Другой пример — Гейзенберг. Они начинали с практических вопросов. Им достаточно хорошо удается решить эти проблемы, а затем они переходят к другим, более абстрактным. Очень редко случается наоборот. Физики зачастую двигаются в другом направлении. Очень большое количество физиков перешло в биологию. Одним из примеров является Уолтер Гилберт, а кроме него можно насчитать дюжину других ученых, которые начали как физики, а потом перешли в биологию.

Давайте вернемся к вопросу о том, что профессорам университетов нужно не только обучать студентов, но и проводить исследования. Вы преподаете «Основной» курс физики в Гарварде для студентов. Я изучал физику на первом курсе у Вашего друга, Леона Ледермана. Я помню одну из его лекций по сохранению энергии, во время которой мы наблюдали латунную сферу весом в 200 фунтов[1]*, подвешенную на проволоке к потолку аудитории, в которой читалась лекция. Ледерман подошел к одной стене аудитории, очень медлен-*

[1]Приблизительно 90,7 кг. — *Прим. пер.*

но и осторожно прижался к стене спиной и затылком. Затем он попросил ассистента подвинуть к нему эту сферу. Он взял ее в руки, поднес к самому кончику своего носа, очень мягко отпустил ее, так что она выскользнула из его рук. Сфера, естественно, описала гигантскую дугу, двигаясь к дальней стене, затем начала возвращаться обратно и не достала до его носа, казалось, всего несколько микрон. Мы все перевели дыхание и разразились бурными овациями. Ледерман постоянно делал что-то в этом роде.

ГЛЭШОУ: Я всегда удивлялся, откуда у Леона такой смешной нос...

Благодаря чему мы считали физику забавной.

ГЛЭШОУ: Я видел эту демонстрацию на занятии в Корнелле в 1950 году. Я тоже провожу ее время от времени.

Иногда мы просим аспиранта лечь на кровать, утыканную гвоздями, и бросаем ему на грудь большой шлакобетонный блок. Однажды я бросил в аспиранта пластиковый контейнер с кетчупом, и он встал весь в «крови». Но аспиранты обычно не желают приносить свои рубашки в жертву науке.

Вы сказали, что преподаватель должен быть еще и исследователем, чтобы оживить теорию практикой.

ГЛЭШОУ: Я не думаю, что между преподаванием, исследованием и обучением существуют четкие границы. По мере того как мы преподаем, мы учимся, а по мере проведения исследований мы представляем их при обучении. Во время ответа студентов мы учимся проводить исследования лучше. Все это складывается в одно целое. Именно для этого и предназначены главные американские университеты. Они соединяют все это воедино, и они должны это делать.

Что бы Вам хотелось, чтобы Ваши студенты вынесли из Вашего «Основного» курса?

ГЛЭШОУ: Мне бы хотелось, чтобы они заинтересовались и хотя бы в общих чертах представили, как людям удалось понять (в той степени, в какой им это удалось), из чего состоит материя, что происходит в кирпиче, когда Вы подходите к нему в 10 раз ближе, когда Вы увеличиваете его размер в десять раз, затем еще в десять раз, затем еще, еще и еще, чтобы в точности понять, как он собирается воедино.

И, наоборот, если Вы представите много кирпичей, целый мир, Солнечную систему, галактику, всю Вселенную, как можно примирить рождение и эволюцию всей Вселенной со свойствами материи в очень малом масштабе.

Вот с чем все это связано: здесь сходятся физика очень большого и физика совсем малого. Змея в процессе поедания своего собственного хвоста — в этот момент очень интересно оказаться поблизости. В конечном счете, все соединяется воедино.

Не могли бы Вы рассказать нам, что происходит на субатомном уровне: что такое слабая сила, существует ли что-то меньше кварков?

ГЛЭШОУ: Очень милый вопрос. Каждый раз, когда мне задают такой вопрос, я думаю: «Понимает ли он давление воздуха? Понимает ли он, почему закон Бойля является истинным? Почему наступает весна?». Зачастую ответ на этот вопрос отрицателен, а если он отрицателен, то очень сложно двигаться дальше и объяснять, что такое слабая сила и что такое сильная сила.

Как то раз (году в 1930) мы осознали, что все многообразие различных проявлений силы и движения можно свести всего к четырем силам, которые мы кратко называем сильной и слабой ядерными силами, силой тяготения и электромагнитной силой. На самом деле, почти для всего Вам будет достаточно электромагнетизма и тяготения.

Прокладка труб, специальность моего отца, зависит от тяготения, потому что вода стекает вниз, и от электромагнетизма, потому что последний объясняет, как протереть соединение, почему нужна медь и что она из себя представляет, а также все, что угодно, обо всем, что Вы видите, ощущаете, обоняете, осязаете или делаете. Но на элементарном уровне Вам необходимы две другие силы. Сильная и слабая ядерная силы. Они связаны с ядром атома и радиоактивностью. Но они важны, потому что если бы не было ядра, то не было бы и атома и ничего вообще.

Таким образом, сильная и слабая силы связаны с ядром атома. Мы, те, кто несколько лет назад получил Нобелевскую премию (и еще несколько человек, которые ее не получили), осознали, что две из этих четырех сил, в действительности, являются различными аспектами, различными воплощениями одного и того же основополагающего уравнения или системы; главным образом, что слабая и электромагнитная силы, на самом деле, — одно и то же.

Таким образом, в некотором смысле, мы сократили количество — но только в некотором смысле — сил с четырех до трех, предполагая дальнейшее сокращение с трех до двух и, конечно же, до одной — высшая мечта Эйнштейна об объединении. Но этого мы еще не достигли.

В экспериментальной и теоретической работе так много зависит от гигантских машин. Помогут ли эти машины Вам как теоретику?

ГЛЭШОУ: Мы зависим от экспериментальных данных, а все те замечательные вещи, которые нам известны о природе и Вселенной, зависят от телескопов, рентгеновских обсерваторий, ускорителей и другого оборудования. Поэтому я с огромным волнением ожидаю новых ускорителей, которые вот-вот должны начать функционировать в Европе. Еще боль-

ше я взволнован в ожидании претворения в жизнь задумки Ваксаачи, Гиппертрона[1] — ускорителя им. Рональда Рейгана в Техасе.

Я не знал, что это Гиппертрон.

ГЛЭШОУ: Не официально. Это Центр им. Рональда Рейгана по изучению физики частиц. Если бы он финансировался...

Некоторые ученые считают, что если мы возьмем миллиарды долларов, которые могут уйти на эту машину, и вложим их во что-то другое...

ГЛЭШОУ: Нет, я не понимаю, почему они хотят забрать мои деньги. Я согласен, что наука финансируется недостаточно и теперешнее финансирование нужно удвоить. Именно столько мы и просим для физики частиц. Мы можем построить Сверхпроводящий суперколлайдер (SSC), если удвоить тот бюджет, которым сейчас располагает физика высоких энергий. Что касается других ученых (которые выполняют замечательную работу), то бюджет их отраслей тоже должен быть удвоен. Но я не хочу строить свою машину, отнимая их финансирование. Я сомневаюсь, что они хотят выполнять свою работу на деньги, отобранные у меня.

Сложнее ли убедить Конгресс поддержать этот проект, потому что он не даст нам, скажем, тефлон?

ГЛЭШОУ: Тефлон был достаточно хорош. Его породил проект по созданию атомной бомбы. Вы знали об этом? При разделении урана, которое нужно было провести, чтобы получить U-235 для производства бомб, — того, что было нужно в то время, — ученые проводили эксперименты с тяжелыми газами, урановыми газами. Из урана получается газ, если его соединить с фтором. На самом деле, одним из продуктов Манхэттенского проекта стал тефлон. Я уверен, что создание SSC приведет к получению всевозможных замечательных технологий: сверхпроводящий аккумулятор энергии, перенос больших объемов грунта, строительство туннелей и различные технологии на грани возможного.

Мне кажется, Вам должно быть немного жаль, что Вам пришлось разделить свою Нобелевскую премию, в отличие от тех времен, когда жила мадам Кюри. Сейчас бывают случаи, когда премию делят два и три человека.

ГЛЭШОУ: Действительно, человек, который получает эту премию один, получает в три раза больше денег, чем тот, кто получает ее не один

[1]Сверхпроводящий суперколлайдер (SSC) (строительство которого сейчас прервано) должен был быть построен около города Ваксаачи (Техас). Поскольку первоначальный план SSC был одобрен президентом Рональдом Рейганом, этот коллайдер иногда в шутку называли Гиппертроном. Это название стало наследием актерской жизни Рейгана. Еще до своего президентства он снялся в фильме «Knute Rockne, All American», где сыграл роль Джорджа Гипа (также известного под кличкой Гиппер). С тех самых пор Рейгана-актера все звали не иначе как Гиппер. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

и вынужден делить с двумя другими людьми. На самом деле, можно получить вообще лишь четверть этой премии.

Но деньги — это не главное в Нобелевской премии. Просто на один день ты становишься королем или королевой. Это действительно замечательно, и это большая честь. Каждому приятно, когда ему оказывают почести. Но я счастлив, что разделил свою премию с двумя хорошими друзьями: Стивеном Вайнбергом и Абдусом Саламом, которые были и остаются моими лучшими друзьями.

На каком уровне находится теоретическая физика в Европе по сравнению с нами?

ГЛЭШОУ: Очень трудно однозначно и точно ответить на этот вопрос. В настоящее время лучшее экспериментальное оборудование находится в Европе, что очень и очень вдохновляет европейских физиков, вследствие чего они показывают замечательные результаты. Просто превосходно работают итальянцы, а французы особенно преуспевают в физике конденсированного состояния. Все работают хорошо. Русские просто поражают. Это не соревнование. Занятия физикой всегда были самым интернациональным видом спорта.

... Физика была интернациональной в семнадцатом веке, такой она остается и по сей день. Мы очень дорожим своим интернационализмом и очень редко говорим: «Это сделали в Америке, этого достигли в Европе, а это осуществили в России». Это сделали все мы, работая вместе.

В теоретической физике очень мало женщин. С этим можно что-нибудь сделать?

ГЛЭШОУ: Эта ситуация уже меняется, и этому, конечно, можно поспособствовать. Решение состоит в том, чтобы достаточно рано начинать обучать физике женщин, которые ею интересуются. Но в физике и сейчас немало женщин, и они превосходно работают. Некоторые вообще достигают выдающихся успехов. Так что все меняется. В Гарварде в моей области работает 25 или 30 процентов женщин. Пока мы не достигли пятидесятипроцентной отметки.

Мир науки

Взгляд на Вселенную

Мы можем бесконечно долго спорить о том, есть ли у дельфинов, шимпанзе и других тварей способность рассуждать. Их можно научить выполнять различные трюки, решать головоломки и, до известной степени, говорить. Тем не менее, несомненно одно: только человеческое существо способно интересоваться. Мы — представители единственного вида на Земле, который наблюдает великолепие небес и хочет знать его причину. Первобытные сообщества открывали или представляли среди звезд какие-либо существа: льва, близнецов, рака и т. д. В этих созвездиях они стремились придать смысл человеческому опыту. Даже наш современный язык отражает древние предрассудки. Каждое из слов «consider» (рассматривать, считать), «mercurial» (ртутный), «venereal» (венерический), «lunacy» (лунатизм), «martial» (воинственный), «jovial» (величественный, веселый) и «saturnine» (свинцовый, мрачный) соответствует одному из семи небесных тел, а обыденные, на первый взгляд, английские слова типа «disaster» (несчастье, катастрофа), «influence» (влияние), «hour» (час), «contemplate» (созерцать, размышлять) также имеют астрологическое происхождение. В нашем развитом и просвещенном современном мире по-прежнему есть люди, которые ищут свою судьбу в небе. Живучесть столь пагубной науки как астрология заставляет сомневаться, действительно ли способность рассуждать является универсальной способностью всех людей.

Ранние общества открыли, что звезды и Млечный Путь — весь небесный свод, состоящий из двенадцати главных созвездий, — судя по всему, постоянно вращаются вокруг наблюдателя, находящегося на Земле. В течение вечера каждая звезда движется по дуге окружности. Фотография, сделанная с долгой экспозицией и изображенная на рисунке 1, иллюстрирует эту простую истину. Древние люди считали это свидетельством неподвижной и неизменной небесной сферы, к которой прикреплены звезды, а также ее суточного вращения вокруг Земли.

Греки верили, что различные формы материи, существующие на Земле, можно объяснить как смеси четырех основных ингредиентов: огня, воды, земли и воздуха. Был также пятый базовый материал, «квинтэссенция», объясняющий небеса. Движение этой совершенной небесной субстанции могло происходить только по кругу — идеальной фигуре без



Рис. 1. Подвергнутая долгой экспозиции фотография траекторий движения звезд вокруг северного небесного полюса.

начала и конца. Так объяснялось вращательное движение небесной сферы, а видению космоса Аристотелем суждено было править более тысячи лет.

Но во внимание было принято далеко не каждое небесное тело. Оставалось еще семь тел, которые явно не были частью небесной сферы: Солнце, Луна и пять планет. (*Пять*, а не девять, так как три еще не были открыты, а Земля считалась совершенно особенным местом.) Глубокий смысл этих небесных объектов для древних сообществ сегодня отражается в названиях дней недели, приведенных в таблице 1 на трех западных языках.

В латинском языке каждый день недели соответствует одному из небесных тел и божеству, его представляющему. Во французском языке это соответствие сохраняется, за исключением выходных дней. Английские же названия дней недели образуются прямым переводом с латин-

Таблица 1. **Названия дней недели**

Английский	*Французский*	*Латинский*
Sunday	Dimanche	Dies Solis
Monday	Lundi	Dies Lunae
Tuesday	Mardi	Dies Martis
Wednesday	Mercredi	Dies Mercurii
Thursday	Jeudi	Dies Jovis
Friday	Vendredi	Dies Veneris
Saturday	Samedi	Dies Saturni

ского языка с англо-саксонскими божествами Tiw (Тив), Woden (Один), Frigg (Фригг) и Thor (Тор), узурпирующим их латинские эквиваленты. Любопытно, что Венера (олицетворение женского начала в природе) заменяется Фриггой, также известной как миссис Один. Истории религии, хронометрирование и астрономия переплетаются между собой весьма непростым образом.

Семь небесных тел движутся по небу гораздо более сложно, нежели неподвижные звезды. Луна движется кругами, но круги ее движения отличаются от кругов движения звезд. Древние уладили это без особого труда: они представили, что Луна прикреплена ко второй небесной сфере, которая совершает свое собственное круговое движение. То же самое касается и Солнца, закрепленного на третьей спокойно вращающейся сфере. Слово «планета» происходит от греческого слова, имеющего значение «блуждающая». Именно такими и являются планеты. Некоторые планеты время от времени даже меняют направление своего движения на противоположное. От простого понятия семи вращающихся концентрических сфер пришлось отказаться.

Однако круговое движение по-прежнему оставалось прерогативой небесных тел, состоящих из квинтэссенции. Придумывались всевозможные хитрости. Планеты должны были двигаться по кругам, но эти круги не имели своим центром неподвижную Землю: движение было *эксцентрическим*. Планеты должны были двигаться по кругам внутри кругов: *эпициклов*. Планеты должны были двигаться по кругам, но не с постоянной скоростью, как это казалось из центра; эти круги назывались *эквантами*.

Используя эксцентрики, эпициклы и экванты, Птолемей, немало потрудившись, сформулировал свою систему движения небесных тел во втором веке н. э. Земля находилась в самом центре Вселенной и была неподвижна. Эта система могла объяснить прошлые и будущие движения планет. Серьезные расхождения между предсказанием и наблюде-

нием улаживались с помощью небольших корректировок семидесяти одновременных и независимых движений семи тел. Несмотря на то, что система Птолемея была невероятно запутанна и сложна и понимали ее лишь немногие, она принималась всеми; она работала и помещала Землю в самый центр, где ей и положено быть. По прошествии средних веков, когда хранители-арабы вернули систему Птолемея в Европу, она очень скоро стала неотъемлемой частью христианской догмы.

Николай Коперник (1473–1543) был ярым схоластом и каноном Римской католической церкви. Он твердо верил в превосходство движения по кругу, поэтому его беспокоила сложность и произвольность теории Птолемея. Копернику «... казалось, что планетарные теории Птолемея и большинства других астрономов, хотя и согласующиеся с численными данными,... представляют немалую сложность... Осознав эти недостатки, я часто думал, что, вероятно, можно найти более разумное расположение кругов,... при котором все двигалось бы равномерно вокруг своего собственного центра (Коперник не принимал экванты), как того требует правило абсолютного движения».

Коперник осознавал, что за более простую систему придется дорого заплатить, а именно: отказаться от неподвижной Земли, поместить Солнце в центр Вселенной, причем вращающаяся Земля будет двигаться по кругу вокруг Солнца. Не осмелившись выдвинуть столь радикальную концепцию самостоятельно, он воззвал к прежним авторитетам: «... согласно Цицерону Нисета (Nicetas) считал, что Земля движется... согласно Плутарху некоторые другие также придерживались того же мнения,... когда же я, исходя из этого, принял такую возможность, я сам начал размышлять о движении Земли. И, несмотря на то, что это казалось полным абсурдом, все же, поскольку я знал, что другие до меня имели свободу предполагать любые круги движения, какие вздумается, чтобы продемонстрировать наблюдения, касающиеся небесных тел, я решил, что я тоже могу попытаться открыть более здравые демонстрации вращений небесных тел, предполагая, что Земля движется».

Система Коперника обладала, по крайней мере, не меньшими предсказательными способностями, нежели система Птолемея, и при этом была гораздо более простой. Все планеты, включая Землю, можно было считать движущимися по концентрическим сферам, а для обеспечения количественной точности нужно было добавить лишь несколько маленьких эпициклов и эксцентриков.

Действия Коперника полностью согласовались с его твердыми религиозными убеждениями. Его гелиоцентрическая теория была ничем иным, как отражением разума Творца, а ее бóльшая простота — повторным утверждением принципов Аристотеля. И все же Коперник мало кого обратил в свою веру. Как старая церковь, так и новая настойчиво

поддерживали геоцентрическую теорию. Ибо разве не написано в Священном Писании: «Иисус воззвал к Господу в тот день, в который предал Господь Аморрея в руки Израилю, когда побил их в Гаваоне, и они побиты были пред лицем сынов Израилевых, и сказал пред Израильтянами: стой, солнце, над Гаваоном, и луна, над долиною Аиалонскою! И остановилось солнце, и луна стояла, доколе народ мстил» (Кн. Иис. Н., 10: 12–13). Если Господь мог остановить Солнце на какое-то время, значит, обычно Солнце движется. Вероятно, система Коперника была нужна церкви в качестве инструмента для вычислений (календарь уже был не в порядке), но в качестве описания реального мира она представлялась ересью. В конечном счете, Католическая церковь была вынуждена поместить выдающееся произведение Коперника в список запрещенных книг как «ложное и полностью противоречащее Священному Писанию», где ему до 1835 года суждено было оставаться недоступным для приверженцев Римского католичества.

Иоганн Кеплер (1471–1630) был убежденным сторонником Коперника, и его основной целью было совершенствование гелиоцентрической теории. Даже больше чем Коперник он верил в основополагающую простоту физических законов. Например, он спрашивал, почему должно быть именно шесть планет: не больше и не меньше. (В системе Коперника Земля стала всего лишь еще одной планетой: унизительная ересь, но, несмотря на это, абсолютная истина.) Кеплер знал, что существует лишь пять правильных геометрических тел: тетраэдр, куб, октаэдр, додекаэдр и икосаэдр. Поместите эти пять тел внутрь шести вложенных друг в друга сфер, и радиусы этих сфер будут пропорциональны расстояниям, на которых эти планеты находятся от Солнца. Этот пример законов Кеплера, безусловно, являет собой образец сущей чепухи, но явно указывает на его безграничное воображение.

Несмотря на то, что телескоп еще не изобрели, астрономические данные уже были гораздо более качественными, нежели те, которыми располагал Коперник. Это произошло, главным образом, благодаря кропотливой работе Тихо Браге в своей обсерватории, расположенной на острове в стороне от Дании. Ошибки измерения сократились более чем в десять раз. Кеплер поставил перед собой задачу подогнать новые и более точные данные по орбите Марса под теорию Коперника, в которой он был убежден. После четырех лет бесплодных усилий он осознал, что это невозможно: теория оказалась, проще говоря, ошибочной. Марс движется не по кругу и даже не по кругу, измененному с помощью эпициклов, эксцентриков или эквантов. Марс движется по эллипсу. Это открытие доказало обоснованность веры Кеплера в основополагающую простоту законов природы. Движение каждой из шести планет можно было уместить в простой эллипс, при этом не требовалось никаких

птолемеевских подгонок: эксцентрики и эпициклы вслед за эквантами оказались в огромной куче мусора, образованной отвергнутыми физическими теориями.

Планеты обращаются по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце. Это первый из трех великих эмпирических законов Кеплера, вытеснивший аристотелевский принцип обращения по кругу. Говоря языком теологов, планетам было позволено двигаться по столь несовершенным орбитам, поскольку Кеплер верил, что они сами, подобно Земле, являются несовершенными материальными телами.

Второй закон Кеплера заменяет понятие равномерного движения: линия между Солнцем и планетой описывает равные площади за равное время. Третий же закон состоит в ошеломляюще простом утверждении, что квадрат периода планетарной орбиты (ее год) пропорционален кубу среднего радиуса ее орбиты. Этот закон не имеет прецедента в теории Аристотеля, поскольку он относится к движениям различных планет друг относительно друга.

Другой способ формулировки третьего закона Кеплера состоит в утверждении, что средняя скорость планеты пропорциональна величине, обратной квадратному корню из ее расстояния до Солнца. Для иллюстрации этого закона приведем на рисунке 2 график скоростей планет в зависимости от их расстояния до Солнца. Обратите внимание, что девять точек лежат на гладкой кривой, соответствующей $1/\sqrt{R}$. Планета Меркурий, находящаяся от Солнца на расстоянии, равном одному проценту расстояния, отделяющего от Солнца Плутон, обращается по своей орбите в 10 раз быстрее последнего.

Ни один из великих законов Кеплера не был выведен из согласованной теоретической системы взглядов; пройдет еще целый век, прежде чем это сделает Исаак Ньютон. Кеплер искал и нашел свои законы путем тщательного анализа и вдохновенных догадок. Вероятно, он был самым блестящим астрономом всех времен, также как Тихо Браге можно считать лучшим из астрономов, когда-либо занимавшихся наблюдениями. Кеплер и Браге жили за триста лет до учреждения Нобелевской премии (да эту премию и не дают за достижения в астрономии).

Сверхновые звезды представляют собой колоссальные звездные вспышки, настолько огромные, что они способны затмить всю галактику, в которой появляются. В нашей галактике сверхновые — большая редкость. Одна из самых эффектных сверхновых вспыхнула в 1054 году. Китайские летописи сообщают, что эта звезда была настолько яркой, что ее можно было наблюдать в течение всего дня, а ночью она могла соперничать с Луной. Но в европейских архивах не было обнаружено ни одной записи об этой звезде. Какой великий страх и абсолютную слепоту способна породить тоталитарная вера!

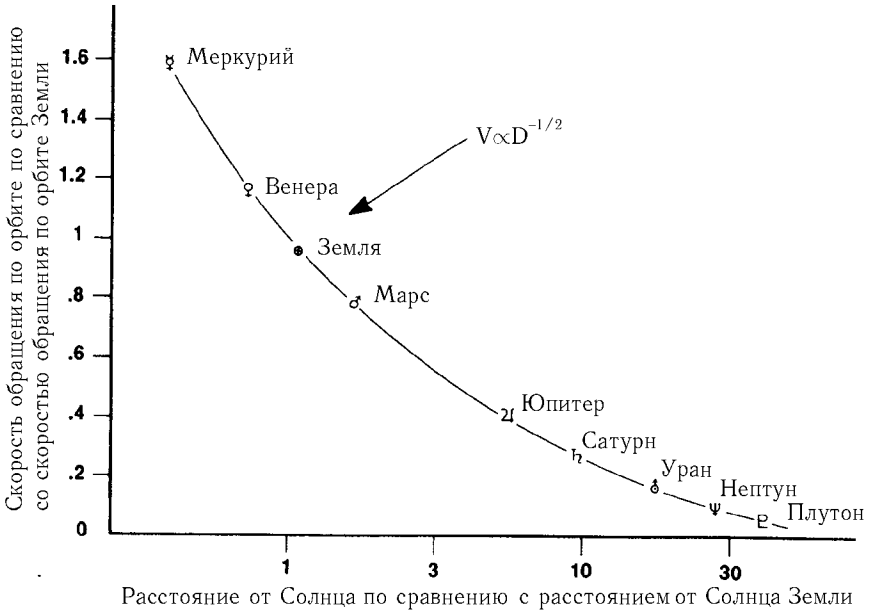


Рис. 2. Графики скоростей планет в зависимости от их расстояния от Солнца.

Самые последние сверхновые появились в нашей галактике в 1572 и в 1604 гг. Они известны как сверхновая Тихо и сверхновая Кеплера. С тех пор ни один астроном не получал столь высокой награды.

Галилео Галилей родился в год смерти Микеланджело (1564) и умер в год рождения Ньютона (1642). Подобно Кеплеру, Галилей верил в учение Коперника. Не имея столь же сильной склонности к математике, какой обладал Кеплер, Галилео так никогда и не принял концепцию своего коллеги об эллипсах. В 1609 году, узнав об изобретении телескопа в Дании, Галилей создал свой собственный телескоп. Он мгновенно осознал потенциальные возможности этого инструмента для военных целей: ему суждено было обеспечивать «своевременное предупреждение» о приближении вражеского флота. Военно-промышленный комплекс Венецианской республики заплатил за этот прибор кругленькую сумму.

Первые наблюдения, которые Галилей провел с помощью телескопа, подтвердили его предубеждения, порожденные теорией Коперника. Три примера: Млечный Путь, когда на него смотришь невооруженным глазом, представляется самим собой: размытая, непрерывная, молочная

полоса, тянущаяся по всему небу. А при взгляде в телескоп открываются несказанные тысячи отдельных звезд. (Сегодня нам известно, что наша галактика, Млечный Путь, содержит около 10^{11} звезд.) Однако религия настаивала на том, что Вселенная создана исключительно для радостей и горестей человечества. А для чего тогда нужны эти визуально неразличимые звезды, которые можно увидеть только лишь с помощью магических приборов? (Телескоп, в силу его очевидной ценности для армии, никогда не считали проклятым инструментом, созданным дьяволом.) О нашем ближайшем небесном соседе Галилей писал: «Поверхность Луны не ровная, не однородная и не в точности сферическая, какой многие философы считают ее (и другие небесные тела); напротив, она негладкая, шероховатая, вся в кратерах и возвышениях, вследствие чего напоминает поверхность Земли, контрастирующую горными цепями и глубокими ущельями». Галилей видел пятна на поверхности Луны и Солнца. Небесные тела оказались не так совершенны, как утверждала религия.

Самым пугающим из всех открытий, сделанных Галилеем, было то, что четыре главных спутника Юпитера: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто — обращаются вокруг этой планеты. Оказалось, что периоды их обращения подчиняются третьему закону Кеплера, — поразительный успех модели, созданной последним, в новой, совершенно неожиданной области. Ни один здравомыслящий человек, наблюдающий Юпитер и его спутники, более не мог сомневаться в истинности гелиоцентрической теории.

Работа Галилея не была принята всеми. Чудеса могли быть сделаны с помощью линз. В действительности же, дело, должно быть, было в том, что выводы Галилея были неприемлемы для метафизики:

> В голове семь отверстий: две ноздри, два уха, два глаза и рот; так и в небесах существуют две благоприятные звезды, две неблагоприятные, два светила и один Меркурий, неопределенный и безразличный. Исходя из этого, а также из многих подобных явлений Природы, как-то: семь металлов и т. п., перечислять которые было бы скучно, — мы делаем вывод, что и планет непременно должно быть семь... Кроме того, евреи и другие древние нации, как и современные европейцы, принимали разделение недели на семь дней, присвоив каждому из них название планеты. Если же мы теперь увеличим количество планет, то вся система рухнет... Более того, спутники невидимы невооруженным глазом, а потому не могут оказывать на Землю никакого влияния, вследствие чего они были бы бесполезны, а потому их не существует.

Такие аргументы приводил в 1611 году флорентийский астроном Франческо Сицци.

Какими бы бесполезными и неразличимыми для невооруженного глаза они ни были, «звезды Медичи» Галилея (названные именем его покровителя) было суждено увидеть каждому, кто имел доступ к телескопу. В середине семнадцатого века к небесному «зверинцу» добавилось еще пять спутников Сатурна. Они тоже удовлетворяли законам Кеплера. Почему эти простые законы так хорошо работали? Ключом к этой загадке стало осознание того, что, во-первых, естественным состоянием движения непотревоженного объекта, находится ли он на Земле или в небесах, является прямая линия. Во-вторых, нужно было понять, что сила, заставляющая тела падать на землю, действует и на небе и ответственна за движения планет. В-третьих, чтобы из принятого вида силы вывести природу планетарной орбиты, были необходимы новые и эффективные аналитические методики.

Исаак Ньютон обладал блестящим математическим талантом, который был необходим для решения задачи, ранее ставившей в тупик всех, кто за нее брался. Более того, он был абсолютно убежден в универсальности физических законов. Для Ньютона небесная механика и земная механика были одной и той же дисциплиной. Гипотеза Ньютона об универсальной силе тяготения, о том, что два тела притягивают друг друга с силой, пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, дала ему возможность вывести все три закона Кеплера. Но, кроме этого, Ньютон показал, что эта же самая сила объясняет движения планет вокруг Солнца, спутников вокруг их планет, тел, падающих на Землю, движения волн и даже траектории комет. Тайна движений небесных тел была раскрыта с помощью чисто земных концепций. Или, скорее, множество тайн было сведено к одной очень просто сформулированной тайне: Что такое тяготение? Опубликованная в 1867 году работа Ньютона и по сей день остается самым важным научным откровением всех времен.

Седьмую планету открыл некий Уильям Гершель, сын гобоиста Ганноверского оркестра гвардейской пехоты, который и сам был профессиональным музыкантом. В свободное время Гершель строил телескопы. Не обычные телескопы, а самые лучшие телескопы своего времени. Гершель поставил перед собой огромную задачу: провести полное и систематическое наблюдение неба. В 1781 году он открыл весьма любопытный новый объект, который счел кометой. Через несколько месяцев стало ясно, что комета Гершеля — вовсе не комета, а новая планета. Тогда остро встал вопрос названия новой планеты. Гершель назвал ее «Георгиева звезда» в честь своего покровителя, короля Георга III, и именно под таким названием она стала известна в Великобритании. Французы настаивали на названии Гершель, в честь человека, ее открывшего, и именно под таким именем она была известна во Франции. Шведы и русские предложили

название «Нептун», но более внимательное изучение мифологии обеспечило лучшую альтернативу. Уран, бог неба и супруг Земли, был отцом Сатурна и дедом Юпитера, который, в свою очередь, породил Марса, Венеру, Меркурия и Аполлона (или Солнце). К середине девятнадцатого века название «Уран» стало общепринятым. Кстати, девяносто второй химический элемент периодической системы был обнаружен всего лишь через несколько лет после работы Гершеля, поэтому его назвали именем этой планеты.

Тогда как открытие Урана произошло чисто случайно, открытие Нептуна стало триумфальным моментом теории Ньютона и научного метода. Тщательные наблюдения, проводимые в начале девятнадцатого века, выявили аномалии в орбите Урана. Два великих астронома-теоретика, один во Франции, а другой — в Англии, взялись за эту задачу. Они постулировали существование восьмой планеты, которая возмущает движение Урана именно так, как это наблюдалось. Научный труд, который Джон Кауч Адамс оставил в Королевской обсерватории 21 октября 1845 года, начинался следующими словами: «Согласно моим вычислениям наблюдаемые аномалии в движении Урана можно объяснить, предполагая существование внешней планеты, масса и орбита которой следующие...» Тем временем, совершенно независимо от Адамса, Урбен Леверье в Париже подготовил статью, озаглавленную «*Sur la Planete qui produit les anomalies observées dans le mouvement d'Uranus — determination de sa masse, de son orbite, et de sa position actuelle*» (О планете, которая вызывает аномалии, наблюдаемые в движении Урана, — определение ее массы, орбиты и реального местонахождения). Каждый из ученых в точности объяснил, где и когда следует наблюдать небо и что именно в нем нужно искать. Очень скоро, 25 сентября 1846 года, Берлинская обсерватория объявила об открытии предсказанной планеты. По словам директора этой обсерватории, это открытие воистину стало «самым выдающимся доказательством универсального тяготения». В конце концов, восьмую планету назвали «Нептуном», но при этом не обошлось без споров.

Однако в движениях внешних планет по-прежнему оставались небольшие, но явные аномалии. Девятую планету предсказал Персиваль Ловелл в 1915 году, но, поскольку достаточно мощного телескопа, с помощью которого можно было бы увидеть этот тусклый и далекий объект, тогда еще не было, он не дожил до дня открытия этой планеты. Плутон открыли астрономы, работавшие в Ловелловской обсерватории во Флэгстаффе (Аризона), в 1930 году и объявили о его открытии в день рождения Ловелла. Его астрономический знак ♇ составлен из инициалов человека, его предсказавшего. Два первых трансурановых элемента, которые в природе не встречаются, были впервые синтезированы на

циклотроне в Беркли. Поскольку в периодической таблице они следуют сразу за ураном, понятно, что их назвали нептуний и плутоний, в честь двух последних открытых планет. Сегодня искусство выращивания новых элементов достигло еще более высокой ступени развития, так что в настоящее время уже известны *четырнадцать* трансплутониевых элементов. Игра в название химических элементов потеряла свое очарование, так что нескольким последним элементам пришлось довольствоваться лишь номерами.

Однако о Солнечной системе можно рассказать куда больше. Фотографии Юпитера, Сатурна и их спутников, привезенные экипажем «Вояджера», вызвали бы слезы счастья на глазах Кеплера, что сейчас происходит с менее великими смертными. Оказалось, что Уран и Нептун имеют кольца, напоминающие кольца Сатурна. Делалось предположение о том, что Солнце имеет парную звезду-карлика, названную Немезидой, прохождение которой через Солнечную систему каждые 26 миллионов лет вызывает смерти и катастрофы на Земле. Говорят, что именно Немезида вызвала вымирание динозавров и что через 10 миллионов лет она должна вернуться. Но какой бы завораживающей не представлялась наша Солнечная система, она все же является довольно простой темой для обсуждения. Обратим же свое внимание на более серьезные вопросы.

Млечный Путь, и Галилей это видел, состоит из огромного количества звезд, разбросанных по всему небу одной непрерывной и опоясывающей весь небосвод полосой. Разумно было предположить, что Солнце является лишь одной звездой из великого их множества, составляющего огромное дисковидное скопление. Действительно, наш Млечный Путь (называемый Галактикой, с заглавной буквы «Г») состоит примерно из 10^{11} звезд, расположенных в виде диска, диаметр которого равен приблизительно 80 000 световых лет, а толщина — 6 000 световых лет. Как Земля находится не в центре Солнечной системы, так и наше Солнце не близко к центру Галактики: Солнце удалено от центра приблизительно на 30 000 световых лет и расположено «к северу» от средней плоскости галактического диска.

Почти каждая звезда, которую можно увидеть невооруженным глазом, является частью Галактики. Одним заметным исключением является Андромеда. Если посмотреть на нее в небольшой телескоп, то она покажется крошечным световым пятном эллиптической формы. При использовании больших телескопов было обнаружено, что по всему небу рассеяны тысячи таких тусклых и размытых «туманностей». Чем они могут быть? Послушайте, что по этому поводу написал в 1755 году философ и ученый Иммануил Кант:

... туманность [галактика] не является уникальным и одиночным солнцем, она является системой множества солнц, которые кажутся

втиснутыми (из-за малого расстояния между ними) в настолько ограниченное пространство, что их света, который был бы незаметен, будь они изолированы друг от друга, оказывается достаточно (благодаря их огромному количеству), чтобы создавать бледное и постоянное свечение. Их схожесть с нашей собственной звездной системой; их форма, которая выглядит именно так, как следует из нашей теории; слабость их света, которая говорит о бесконечном расстоянии, — все это удивительным образом согласуется и приводит нас к рассмотрению этих эллиптических пятен как систем, имеющих тот же порядок, что и наша собственная, — словом, как Млечных Путей, подобных тому, строение которого мы уже объяснили... Мы видим, что подобные системы звезд (галактики) разбросаны в космическом пространстве на бесконечных расстояниях и что творение, во всем своем бесконечном величии, повсюду организуется в системы, составляющие которых связаны друг с другом. Огромная область открыта для исследований, и только наблюдения способны дать ключ к ее загадкам.

Таким образом, Кант ввел понятие «островов Вселенной» — отдаленных галактик, по структуре и составу напоминающих нашу. Самая близкая к нашей и самая яркая галактика — Андромеда. Именно на Андромеду Эдвин Хаббл направил свой гигантский 100-дюймовый телескоп в Маунт-Вилсоновской обсерватории. Несмотря на огромное расстояние, отделяющее нашу Галактику от соседней, Хаббл сумел различить отдельные звезды: Андромеда действительно представляет собой «систему множества солнц»! Более того, Хаббл распознал внутри Андромеды некоторые, очень особенные звезды, называемые Цефеидами. Расстояние до этих звезд можно оценить достоверно через их видимую яркость. Хабблу удалось показать, что расстояние до Андромеды составляет более миллиона световых лет. Эта галактика во многом похожа на нашу. Следовательно, изображение галактики, родственной нашей, на рисунке 3 могло бы во многом походить на фотографию Млечного Пути, сделанную пучеглазым монстром с Андромеды.

После создания гипотезы «островов Вселенной» Хабблу, в 1929 году, еще предстояло сделать гораздо более важное открытие — то, что мы сейчас знаем как «закон Хаббла», — наш первый и самый главный ключ к тому, что мы живем в расширяющейся Вселенной. Давайте посетим его знаменитые Силлимановские лекции, прочитанные в Йельском университете в ноябре 1935 года:

[Галактические] спектры отличаются тем, что их [спектральные линии] занимают не те положения, которые свойственны близким источникам света. Эти линии сдвинуты от своего нормального положения



Рис. 3. Андромеда, ближайшая к нам галактика, подобна Млечному Пути.

к красной части спектра, что видно при соответствующем сравнении спектров. Эти сдвиги, называемые красными смещениями, увеличиваются, в среднем, с возрастанием видимой тусклости наблюдаемой туманности. Поскольку по видимой тусклости измеряют расстояние, значит, красные смещения увеличиваются по мере увеличения расстояния. Детальное исследование показывает, что это отношение является линейным.

Маленькие микроскопические сдвиги, либо в красную, либо в фиолетовую части спектра, уже давно были известны в спектрах астрономических тел и не только [галактик]. Эти смещения уверенно интерпретируют как результаты движения по линии зрения — радиальные скорости удаления [красные смещения] или приближения [голубые смещения]. Та же интерпретация зачастую применяется к красным смещениям, наблюдаемым в [галактических спектрах]; она привела к появлению термина *соотношение между скоростью и расстоянием*... Исходя из этого допущения, [галактики] считают удаляющимися из нашей области пространства со скоростями, возрастающими прямо пропорционально расстоянию.

Согласно закону Хаббла отдаленные галактики очень быстро удаляются от нас, причем скорость удаления галактики и расстояние до нее связаны простым линейным отношением. На рисунке 4 мы графически изобразили эти величины для пяти галактик. Отношение предельно просто: ближние галактики удаляются медленно, а отдаленные — гораздо быстрее. Удвойте расстояние, удвоится и скорость удаления галактики. Скорость удаления галактики дается приблизительно как 15 километров в секунду, умноженные на ее расстояние в миллионах световых лет.

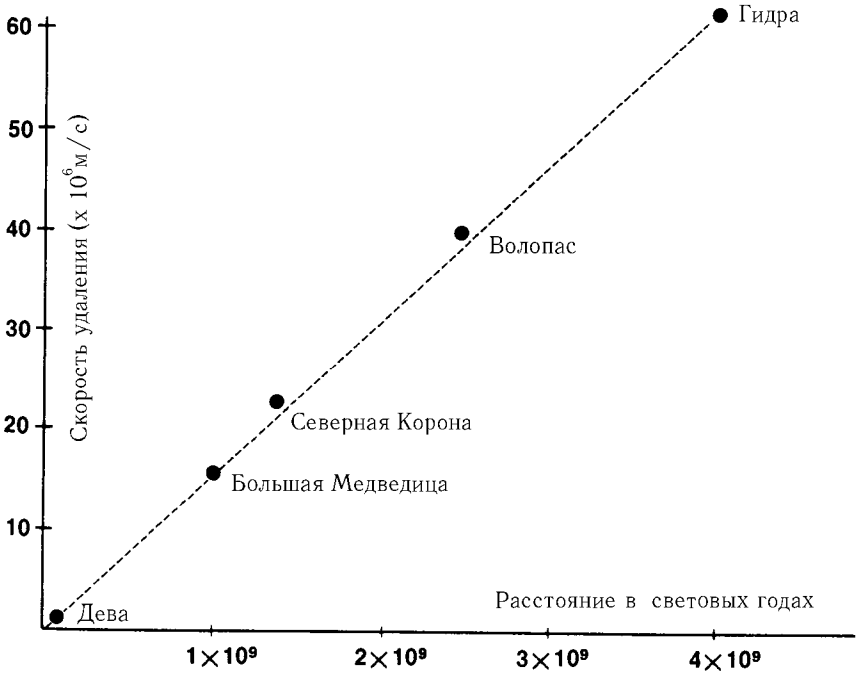


Рис. 4. Скорость удаления в зависимости от расстояния для пяти галактик.

Константа пропорциональности, связывающая скорость удаления отдаленной галактики с расстоянием до нее, известна как постоянная Хаббла и является одним из базовых параметров экспериментальной астрономии. В некотором смысле, она представляет собой скорость, с которой Вселенная взрывается, и очень тесно связана с возрастом Вселенной. К сожалению, это величина не относится к разряду измеренных

точно и известна лишь с пятидесятипроцентной точностью. Действительно, сейчас ее значение примерно в 10 раз меньше, чем величина, первоначально объявленная Хабблом. Точное определение постоянной Хаббла чрезвычайно сложно, так как оно требует прямого измерения расстояний до отдаленных галактик. Большая часть аналитических исследований основана на видимой яркости галактик. Если бы все галактики имели одинаковую внутреннюю яркость, тогда эта яркость, видимая на Земле, могла бы служить мерой расстояния до этих галактик. К сожалению, в действительности это не так, и определение постоянной Хаббла зависит от целой серии экспериментальных методов, имеющих различную степень надежности.

К счастью, последние достижения радиоастрономии впервые обеспечили возможность прямого определения постоянной Хаббла. Метод, созданный Норбертом Бартелем и Ирвином Шапиро в Смитсоновском астрофизическом центре в Гарварде, задействует интерферометрию со сверхдлинной базой, в которой несколько радиотелескопов, расположенных в тысячах миль друг от друга, соединяются в одно целое. Этот анализ зависит от присутствия в отдаленной галактике недавно появившейся сверхновой. (В среднем, сверхновая взрывается в обычной галактике примерно каждые десять лет.) Бартель и Шапиро сосредоточили свое внимание на галактике, известной как M101. Сверхновая появилась в этой галактике, расположенной в 60 миллионах световых лет от нашей, в 1979 году. Эта сверхновая, которой сейчас около пяти лет, окружена огромной расширяющейся оболочкой, образованной горячими газами. Скорость расширения этой оболочки известна из оптических измерений. Бартель и Шапиро наблюдали скорость роста угловой протяженности следа этой сверхновой. Результаты двух этих измерений, взятые вместе, определяют расстояние до M101. Сравнение с ее наблюдаемым красным смещением дает величину постоянной Хаббла. Однако пока результаты являются очень предварительными. Но мы все же надеемся, что, в конце концов, такая методика поможет определить скорость расширения Вселенной с точностью до одного процента или даже выше.

Разве мы не проделали полный круг и не вернулись к антропоцентрической точке зрения, когда наша галактика покоится в центре Вселенной, а все остальные от нее разбегаются? Вовсе нет. Чтобы представить нашу расширяющуюся Вселенную, рассмотрим ее двухмерный аналог: поверхность надуваемого воздушного шара. Крапинки на поверхности шара следует рассматривать как галактики нашей Вселенной. Одной из них является Млечный Путь. Узор из крапинок растет, но во всех остальных отношениях остается неизменным. Расстояние между любыми двумя крапинками увеличивается за любой временной промежуток в одном и том же постоянном отношении. Две крапинки, на-

ходящиеся на расстоянии одного дюйма в момент времени A, оказываются на расстоянии в два дюйма в момент времени B, скажем, минуту спустя: они удаляются друг от друга со скоростью один дюйм в минуту. Две крапинки, расположенные на расстоянии одного фута друг от друга, удаляются со скоростью один фут в минуту. Если в качестве точки отсчета выбрать любую крапинку, то скорости удаления от нее других крапинок будут удовлетворять закону Хаббла. С точки зрения этого закона две любые галактики эквивалентны. Как наше Солнце ничем примечательным в Галактике не является, так и наша галактика не является чем-то особенным во Вселенной. Обратите внимание, что наша аналогия обладает еще одним любопытным свойством: поверхность шара конечна, но у нее нет кромок, и любая ее точка ничем не отличается от любой другой. Мы пока не знаем, конечна наша Вселенная или бесконечна, но нам известно, что у нее нет границ, и мы твердо верим, что из любого положения она выглядит более или менее одинаково. Последний принцип, экспериментально проверить который представляется практически невозможным, был возведен в степень догмы. Он известен как *космологический принцип*.

Я упомянул, что нам не известно одно: бесконечна ли Вселенная в пространственном отношении. Этот вопрос, безусловно, важен, и ученые найдут ответ на него в не слишком далеком будущем. Он зависит лишь от того, какова средняя плотность материи во Вселенной. Это число мы уже знаем приблизительно, но недостаточно точно, чтобы принять решение о конечности Вселенной. Астрономы заключают пари на то, что Вселенная в действительности бесконечна. Допустим, что они правы.

Если Вселенная бесконечна и если распределение звезд и галактик повсюду одинаково (космологический принцип!), то, судя по всему, в наших руках оказывается проблема: проблема, известная под названием парадокса Олберса. Согласно Олберсу в бесконечной Вселенной ночное небо не может быть темным. Посмотрите в любом направлении, и, рано или поздно, на вашей линии зрения окажется звезда. Даже несмотря на большую удаленность звезд друг от друга, их бесконечно много, причем каждая из них имеет конечный размер. Олберс утверждал (правильно), что интенсивность света на Земле, днем и ночью, была бы в этом случае эквивалентна свету 10 000 солнц!

Но даже ребенок знает, что это не так. Ночь темна и страшна. Чего ребенок не знает, так это того, что расширяющаяся Вселенная дает разгадку этого парадокса. Дело в том, что если Вселенная расширяется, то она не могла расширяться всегда. Из наблюдаемой скорости расширения мы можем сделать вывод, что возраст Вселенной не превышает 20 миллиардов лет, а, вероятно, даже близок к этой цифре. Хотя Вселенная

и может быть бесконечной, свет не способен доходить до нас с расстояний, превышающих 20 миллиардов световых лет. Более того, свет от удаленных источников сдвигается в дальнюю инфракрасную часть спектра, поэтому он совершенно невидим. Вселенная может быть или не быть конечной, но ночью небо все равно будет темным. Однако у Вселенной точно есть начало. Точно так же, как Вселенная расширяется в будущем, она сжимается в прошлом. Однажды — это было очень давно — вся Земля, вся Солнечная система, весь Млечный Путь и все известные галактики должны были умещаться в одном тыквенном семени. Это не миф; это взгляд ученых на сотворение: сначала был Большой взрыв.

Жизнь в логарифмическом масштабе времени

Рассмотрим рост и развитие человека с самого момента зачатия — чудо жизни. Можно выделить, как минимум, девять различных периодов развития. Оплодотворенная яйцеклетка, примерно через день, начинает быстро делиться, превращаясь в свободную бластоцисту — сферическое тело клеток, движущееся в репродуктивных путях матери. Через шесть дней блуждания бластоцисты заканчиваются, и она должна прикрепиться к стенке матки, превратившись в прикрепленную бластоцисту. Примерно через месяц завершается сложное построение плаценты, и голодный эмбрион начинает питаться от системы кровообращения своей матери. По истечении первых трех месяцев этого человечка начинают называть утробным плодом. Первый послеродовой период человеческой жизни называют младенчеством, затем наступает детство, юность и, наконец, зрелость. Эти девять периодов жизни можно представить в виде таблицы 1. Безусловно, гораздо более информативно было бы представить эту информацию в виде картинки. Попытаемся сделать это с помощью рисунка 1. Несомненно, что такое изображение девяти периодов жизни оставляет желать лучшего: бóльшая часть значимой информации сжата в самом верху картинки.

Таблица 2. **Девять периодов жизни**

Период жизни	*Начало*
1. Оплодотворенное яйцо	Зачатие
2. Свободная бластоциста	1 день
3. Прикрепленная бластоциста	6 дней
4. Эмбрион	4 недели
5. Утробный плод	12 недель
6. Младенец	38 недель
7. Ребенок	2,5 года
8. Подросток	10 лет
9. Взрослый	21 год

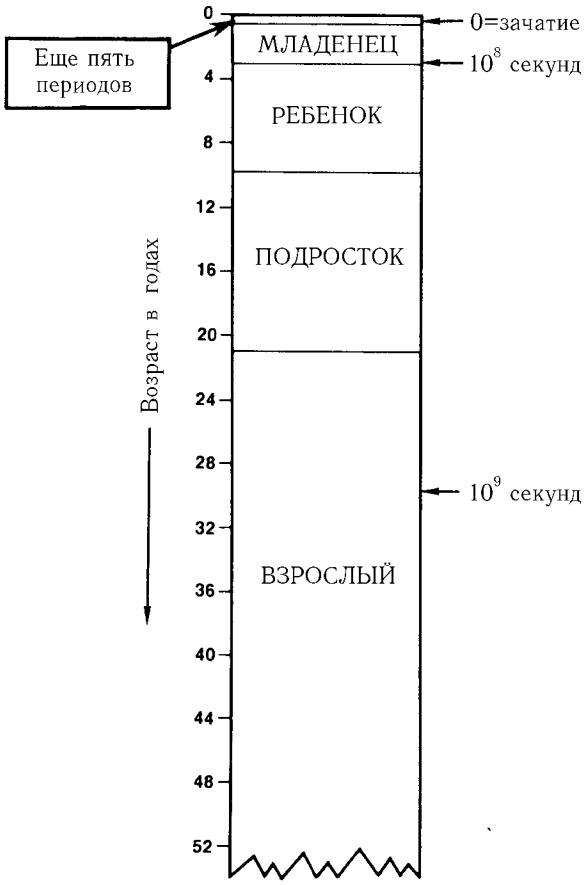


Рис. 1. Жизнь в линейном масштабе времени.

Проблема такой картинки состоит в том, что каждая единица длины соответствует определенном периоду времени. Это «линейное», или «арифметическое», представление. Оно бы превосходно подошло для обсуждения американской политики за прошедшие два столетия, поскольку новый президент избирается каждые четыре года, с точностью часового механизма. Однако подобное представление оказывается неадекватным для описания развития человека, в начале жизни которого все-

возможные события происходят гораздо быстрее и оказывают на него куда большее влияние. (Дети учатся ездить на велосипеде, подростки переживают период полового созревания, но молодежь крайне редко выращивает руки, ноги и печень.) Линейная последовательность времени ущербна даже с точки зрения психолога. По мере нашего взросления нам кажется, что время бежит быстрее. Пятилетнему ребенку один год может показаться столь же длинным, сколь два года — десятилетнему и десять лет — пятидесятилетнему. Быть может, субъективное время измеряется через время, уже проведенное на Земле.

Умные математики изобрели другую разновидность масштаба, более подходящую для нашей ситуации, — «логарифмический» масштаб, в котором каждая единица длины соответствует постоянному множителю. На рисунке 2 вы можете наблюдать панораму развития человека в логарифмическом масштабе времени.

В логарифмическом представлении девять периодов жизни четко разделены, и мы видим, что бóльшая часть значимого развития происходит до рождения.

Обратите внимание на то, что момент зачатия отодвинут в бесконечность, что может предполагать существование даже более ранних этапов развития человека. И таковые действительно имеются: прикрепление одного сперматозоида к яйцеклетке, отторжение ею его последователей, проникновение сперматозоида в яйцеклетку, слияние родительских ДНК и т. д.

Детство начинается приблизительно в стомиллионную секунду после зачатия или примерно в два года восемь месяцев. По этой же шкале следующий значительный период жизни начинается в миллиардную секунду, когда человеку исполняется тридцать лет. Только Мафусаил[1] мог бы отпраздновать свой следующий день рождения (10^{10} секунд) в зрелом и даже старом возрасте, превышающем 317 лет.

Читателю уже, наверное, интересно, каким образом наше рассуждение об эмбриологии человека связано с расширением Вселенной. Нашей целью в данном случае является практическая демонстрация возможностей логарифмического масштаба. Этим инструментом мы будем пользоваться часто. Например, давайте применим его к рождению и эволюции всей Вселенной — самой антропоморфической аналогии, какую только можно представить. Зарождение Вселенной в процессе колоссального взрыва, известного как *горячий Большой взрыв*, играет роль момента зачатия (или, быть может, полового акта), а современная Вселенная аналогична взрослому человеку.

[1] Мафусаил — в Библии один из патриархов, сын Еноха, дед Ноя, проживший 969 лет. — *Прим. пер.*

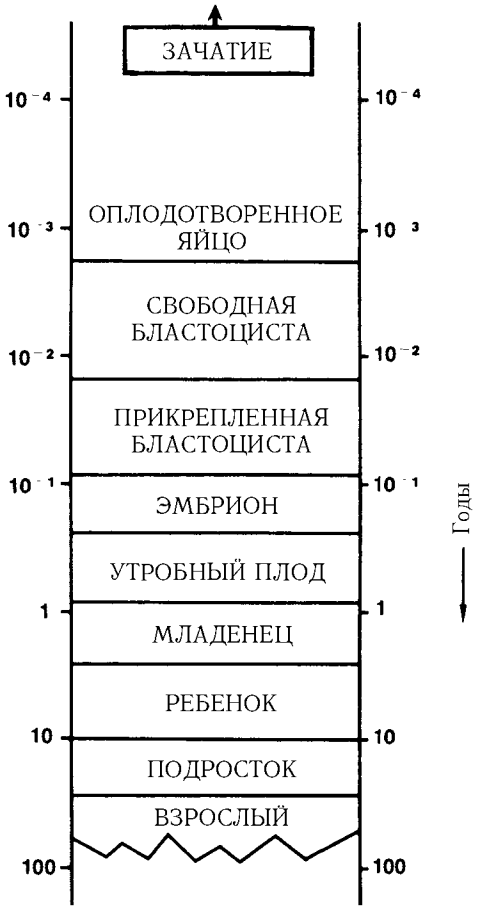


Рис. 2. Жизнь в логарифмическом масштабе времени.

В эволюции Вселенной, с момента ее создания 20 миллиардов лет назад, можно выделить семь периодов. Первый период — это Вселенная в первую микросекунду своего существования. Она настолько горяча, что способны выжить только самые основные строительные блоки материи. Это Эпоха Кварков и Глюонов. На первом этапе именно этой эпохи возникла приверженность не к антиматерии, а к материи

как доминирующей составляющей современной Вселенной. С течением времени Вселенная расширяется и остывает. Наступает некоторый момент, когда кварки могут соединиться друг с другом, чтобы образовать нейтроны, протоны и их античастицы. Эта Эпоха Нуклонов и Антинуклонов продолжается с микросекунды примерно до сотой доли секунды. В это время, по-прежнему оставаясь невероятно горячей, Вселенная уже достаточно остыла, чтобы произошла взаимная аннигиляция нуклонов и антинуклонов. Выживают лишь несколько лишних нуклонов; гораздо позднее они станут основой материи в том виде, в каком знаем ее мы. На этом этапе развития в составе Вселенной преобладают электроны, позитроны и нейтрино — это Эпоха Лептонов, и она продолжается, пока Вселенной не исполнится примерно 100 секунд.

В этот момент одновременно начинает происходить несколько важных событий. Их суммарное действие приводит к образованию простых атомных ядер, типа ядер гелия и лития. В конце этого периода, Эпохи Ядерного Синтеза, материя Вселенной состоит примерно из 74 процентов протонов (ядер водорода), 25 процентов ядер гелия и 1 процента более тяжелых атомных ядер. Этот процесс завершается, когда Вселенной исполняется примерно 1 000 секунд. По окончании четвертой фазы эволюции Вселенной заканчивается бóльшая часть реорганизации материи и энергии. Готов помост для создания звезд, галактик, планет и еще более экзотических тел, составляющих небесную панораму. Однако температура Вселенной все еще слишком высока, чтобы эти объекты могли сформироваться: это Эпоха Ионов, когда Вселенная представляет собой горячую, однородную и непрозрачную плазму. В логарифмическом масштабе времени это пока самый длинный из семи периодов развития Вселенной. Он длится десять в десятой степени секунд: от возраста в тысячу секунд до 10^{13} секунд (или 500 000 лет).

Эпоха Ионов — это время расширения и охлаждения. Ничего особенно интересного не происходит, пока температура не понижается до жуткого холода в 3 000° Цельсия — около половины температуры поверхности Солнца.

Наступил момент, когда ионы захватывают электроны, чем начинают Эпоху Атомов. Внезапно, загадочно, повсюду и сразу Вселенная становится прозрачной. Свет может беспрепятственно распространяться от одной точки к другой. Вселенная превратилась в разреженный гелиево-водородный газ, который по-прежнему расширяется и по-прежнему остывает. В конце концов, происходит своего рода конденсация. Небольшие аномалии в гигантском облаке газа увеличиваются. Наконец, когда Вселенной исполняется несколько сотен миллионов лет, первичные флуктуации становятся огромными: они эволюционировали в светящиеся небесные тела, которые по-прежнему вызывают изумле-

ние у любопытного вида, живущего на планете, называемой Землей. Начался седьмой период: Эпоха Звезд и Галактик. Наконец-то мы достигли современной Вселенной, имеющей возраст около 20 миллиардов лет.

Сейчас температура нашей Вселенной составляет порядка −270°C, что, кстати говоря, всего лишь на три градуса выше предельного холода или того, что ученые называют «абсолютным нулем температуры». Вероятно, вы заметили, что на Земле, на самом деле, не так холодно; таких морозов не бывает даже зимой в Новой Англии[1]. Ага, да нам просто повезло, что мы живем всего лишь в 10^{13} см от скромной звезды — Солнца. Если бы Земля вдруг отделилась от Солнечной системы и оказалась бы на полпути в никуда, то очень скоро мы обнаружили бы, насколько холодна наша Вселенная в действительности. Семь периодов роста и развития Вселенной отражены на рисунке 3. Обратите внимание на то, что долгая Эпоха Ионов разделяет историю Вселенной на два главных раздела: очень молодая Вселенная, содержащая экзотический словарь физики элементарных частиц, и современная Вселенная экспериментальной астрономии. (Кстати, не расстраивайтесь, если вам неведома разница между кварком и глюоном... очень скоро мы вернемся к этим «тварям».) Молодая Вселенная — это место, где пересекаются физика элементарных частиц, общая относительность и астрономия. Сегодня люди, работающие в этой области (неонатальные[2] космологи?), ловят кайф. Это время открытий и радостного волнения. Быть может, ученым действительно удастся понять раннюю историю Вселенной, наблюдать которую не представляется возможным. Лекторы часто обсуждают первую 10^{-42} долю секунды после Большого взрыва, и никто их не высмеивает. А теперь будьте внимательны: попробуйте заговорить о времени *до* Большого взрыва, и вас *поднимут на смех*. Подобная метафизическая концепция — табу для физика. Свое логарифмическое представление мы придумали не для того, чтобы выталкивать реальный момент Большого взрыва в бесконечность.

Более поздняя эпоха жизни Вселенной — история звезд и галактик, квазаров, пульсаров и черных дыр, а также возможность существования внеземных цивилизаций — сама переживает возрождение, время великих открытий. Это следствие развития новых технологий астрономического наблюдения. Наземный телескоп, который по-прежнему остается важным для астронома, уже не является его единственным инструмен-

[1]Новая Англия (New England) — название исторически сложившегося района в северо-восточной части США, предложенное в 1614 году английским капитаном Дж. Смитом. В Новую Англию входят штаты: Мэн, Нью-Хэмпшир, Вермонт, Массачусетс, Коннектикут, Род-Айленд. Главный экономический центр — г. Бостон. — *Прим. пер.*

[2]Неонатальный — относящийся к новорожденному. — *Прим. пер.*

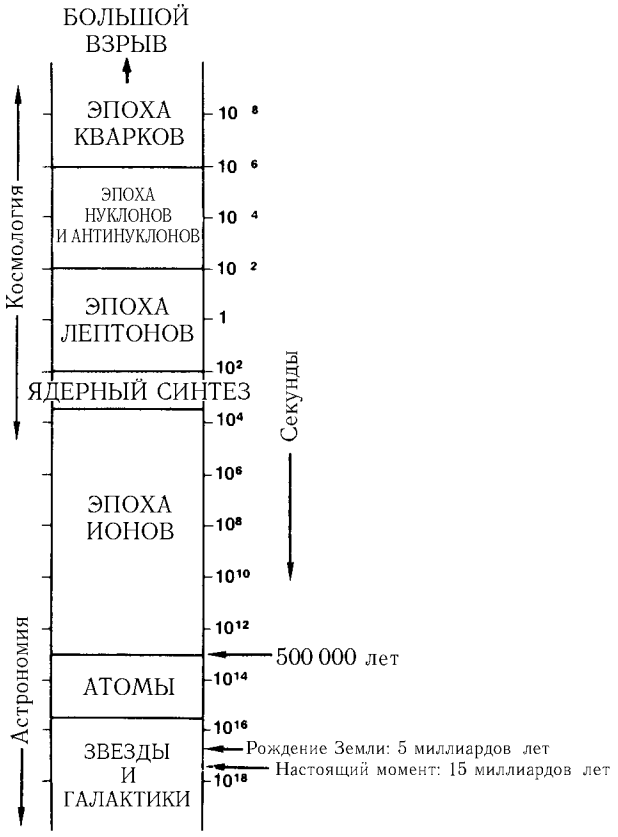


Рис. 3. Вселенная в логарифмическом масштабе времени.

том. К оптической астрономии добавились радиоастрономия, рентгеновская астрономия, гамма-лучевая астрономия, инфракрасная астрономия, ультрафиолетовая астрономия и микроволновая астрономия. В каждом случае электромагнитный сигнал, приходящий из отдаленной части Вселенной, обнаруживается и анализируется. Перечисленные семь типов излучения отличаются друг от друга только длиной волны, как красный свет отличается от фиолетового, только в большей степени: радиоволны имеют многометровую длину, а некоторые гамма-лучи достигают длины, равной лишь 10^{-16} сантиметра. На рисунке 4 приводится еще

одно применение логарифмического представления: электромагнитный спектр. Обратите внимание, сколь малую часть спектра занимает видимый свет: волны длиной 5×10^{-5} сантиметров соответствуют фиолетовому свету, а 8×10^{-5} сантиметров — длина волны красного света. Между этими значениями находятся волны голубого, зеленого, желтого и оранжевого света. Неудивительно, что новая астрономия настолько мощнее старой. Чуть позже мы рассмотрим несколько великих астрономических открытий, которые стали возможны благодаря нашему технологически развитому, любопытному и щедрому обществу.

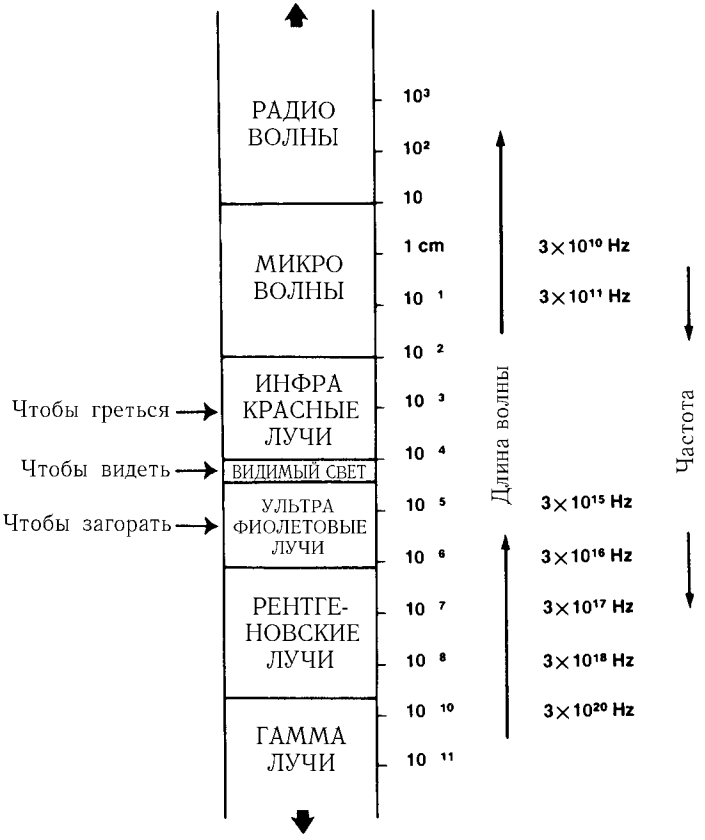


Рис. 4. Электромагнитный спектр.

Давайте остановимся на одно мгновение, чтобы исследовать очень большие и очень малые числа, с которыми мы непременно сталкиваемся при рассмотрении космоса и атома. Мы начинаем с безразмерных чисел. Примером такого числа является π — отношение окружности круга к его диаметру. Другие примеры — число планет в Солнечной системе (девять), число смертных грехов (семь), число различных вариантов раздачи карт в покере (2 598 960) или население Соединенных Штатов ($\sim 2 \times 10^8$). Обратите внимание на использование знака «$\sim$». Он означает «примерно» или «приблизительно». Он используется, когда мы не знаем какое-то число точно, когда точность этого числа нас не заботит или когда мы не можем его уточнить. Число населения Америки, в нескольких последних разрядах, меняется очень быстро, поскольку достаточно часто люди рождаются или умирают. Следует ли включать в это число иностранцев-резидентов? Иностранных студентов? Туристов? Американцев, которые живут и работают за границей? Людей, имеющих двойное гражданство? Нелегальных иммигрантов? Для обсуждения общего характера вполне достаточно грубой оценки количества населения.

В науке, как и в подобных социальных вопросах, нам зачастую неизвестно точное значение какого-то числа, а порой нам и не нужно его знать. «Примерная оценка» — вот все, что нам необходимо. Так, мы говорим, что Солнце содержит $\sim 10^{57}$ протонов. С другой стороны, иногда нам важно знать точное значение какой-либо величины: например, атом урана содержит ровно 92 электрона.

Безразмерное число называется безразмерным, потому что его описание *не* требует выбора специальных единиц измерения. Числа, содержащиеся в выражениях «55 миль в час», «трехминутное яйцо» или «стоваттная лампочка», имеют размерность. В системе единиц, отличных от мили, минуты или ватта, числа изменятся. Мой вес, к примеру, не является числом безразмерным. В фунтах он составляет 198 единиц, в килограммах 90, в стоунах — 14,1, а в аптекарских унциях — 2893,5668. Мой вес — это мой вес, но его численное описание зависит от выбора норм измерения: мой вес является размерным числом.

Рисунок 5 является логарифмическим представлением десяти безразмерных чисел, охватывающих практически восемьдесят степеней десяти. Несмотря на то, что в мире очень много людей, их число тускнеет по сравнению с количеством звезд во Вселенной, которое, в свою очередь, пренебрежимо мало по сравнению с количеством возможных позиций в шахматах. Самое большое вводимое нами число — это количество протонов во Вселенной, которое равно произведению числа протонов в средней звезде (10^{57}) на число звезд в известной Вселенной (10^{22}), т. е. 10^{79}.



Рис. 5. Большие безразмерные числа.

Числа, имеющие размерность, например: расстояния, времена, массы, энергии, давления, скорости и т. п. — требуют описания единиц измерения. Возьмем, к примеру, длины, которые американцы исчисляют дюймами, футами, ярдами и милями. Другие народы за многие века выбрали другие нормы длины. В таблице 2 приведен список, состоящий из 100 единиц измерения длины, используемых в различных культурах.

Очевидно, что человек, особенно путешественник или торговец, вполне может утратить контроль над ситуацией. Всем было бы гораздо легче, если бы разные народы мира согласились отказаться от своих родовых или традиционных единиц измерения, которые обычно основы-

Таблица 3. **Единицы длины**

Ангстрем	Braca	Сантиметр	Chek
Аршин	Braccio d'Ara	Мерная цепь (Великобритания)	Ch'ih
Астрономическая единица	Brasse	Мерная цепь (США)	Cho
Aune	Braza	Chang	Coss
Covado	Hat'h	Mijl	Pied de Roi
Кубит	Дюйм	Мил	Pouce
Daktylos	Kassabah	Миля (Австрия)	Pu
Diraa	Ken	Миля (морская)	Pulgada
Dito	Kerat	Миля (норвежская)	Ri
Duim	Kette	Миля (США)	Rode
El	Khat	Миллиметр	Род
Ell	Километр	Mkono	Сажень
Ella	Klafter	Nin	Sen
Elle	Kung	Palame	Shaku
Estadio	Kup	Palm	Streep
Фатом	Latro	Palmo	Strich
Ферми	Лье	Парсек	Toise
Fod	Li	Pe	T'sun
Fot	Световой год	Pecheus	Tu
Фут (фр.)	Линь	Перч	Vara
Фут (США)	Линк	Persakh	Вершок
Фурлонг	Линия	Pharoagh	Верста
Fusz	Метр	Picki	Ярд
Guz	Микрон	Пи	Zar
Ладонь	Miglio	Pied	Zoll

ваются на физиогномике давно забытого тирана. На самом деле, большинство стран уже сделали именно это. Все крупные народы мира, за исключением Соединенных Штатов, уже приняли метрическую систему единиц измерения. Во всем неамериканском мире основной единицей измерения длины является метр, а основной единицей измерения массы — грамм. Единственные государства, которые не планируют перехо-

дить к метрической системе, — это Бирма, обе части Йемена[1] и США. Американские инженеры, обученные измерять в системе единиц фунт-сила, британских тепловых единиц, градусов Фаренгейта и фут-фунтах, с трудом общаются со своими европейскими и азиатскими коллегами, принявшими метрическую систему. Товары, произведенные в Америке, если только они не предназначены на экспорт (а такое производство очень дорого), требуют использования неметрических инструментов при их обслуживании или ремонте. Разве эта характеристика будет способствовать росту продаж американских товаров в мире, где используется метрическая система измерения?

Когда-то американская промышленность занимала первое место в мире. Сегодня бóльшая часть наших кораблей, стереосистем, обуви, швейных машин, электричек, телевизоров, калькуляторов, видеомагнитофонов и музыкальных синтезаторов производится за границей. Быть может, наше упорное нежелание отказаться от пинты и фунта, от дюйма и мили является следствием упадка, а может, его следует отнести к причинам сложившейся на сегодняшний день ситуации?

Ученые во всем мире пользуются метрическими единицами. Метр, равный 3,281 футам, немного больше ярда. Сантиметр, сотая доля метра, приблизительно равен ширине ногтя на вашем мизинце, или 0,3937 дюймов. Одной из приятных характеристик метрический системы является использование в ней определенных приставок, которые изменяют величину основной единицы на степени десяти. Например, *санти*метр равен 10^{-2} метра, а *деци*литр — 10^{-1} литра. В таблице 3 приведен список других полезных приставок, разделяемых на логарифмической шкале тремя степенями десяти.

Хотя не все эти приставки используются в повседневной речи, все чаще слышишь о потреблении энергии государством в *тераваттах*; о проблемах, с которыми сталкиваются японцы, в разработке *пикосекундной* технологии или о стоимости очередной бесплодной оружейной установки в *гигабаксах*. (Гигабакс на мегасмерть при ядерной катастрофе равняется всего лишь 1000 долларов на похороны.)

На рисунке 6 показаны различные расстояния в логарифмическом представлении. Мир человеческих забот лежит вблизи 10^2 см, а график простирается вплоть до более чем 45 степеней числа 10: от кратчайших расстояний, измеренных на наших гигантских ускорителях, до самой отдаленной области из известных нам на небосводе.

Рассмотрев время и расстояние, давайте обратимся к скорости. Обычно скорость измеряют в километрах в час, в милях в час или в узлах. Мы выберем сантиметры в секунду. Ограничение по скорости на

[1]*Примечание автора*: С тех пор две части Йемена объединились.

Таблица 4. **Метрические приставки**

Название	*Умножается на:*	*Происхождение*	*Значение*
тера-	10^{12}	латынь	чудовище
гига-	10^{9}	латынь	гигант
мега-	10^{6}	греческий	огромный
кило-	10^{3}	греческий	тысяча
милли-	10^{-3}	латынь	тысяча
микро-	10^{-6}	греческий	маленький
нано-	10^{-9}	греческий	карлик
пико-	10^{-12}	итальянский	маленький
фемто-	10^{-15}	датский	пятнадцать
атто-	10^{-18}	датский	восемнадцать

американских шоссе, 55 миль в час, соответствует приблизительно 2 400 см/с, а почти рекордная скорость человека, пробежавшего 100 метров за 10 секунд, соответствует 1 000 см/с. Несколько типичных скоростей изображено на рисунке 7 в логарифмическом представлении. Самая медленная скорость, которую нам несложно представить, — это скорость роста ногтя на пальце: примерно дюйм в год, или 10^{-7} см/с. Чисто случайно эта скорость оказалась почти равной скорости дрейфа материков. Какой бы медленной ни была эта скорость, материки сдвинутся на тысячу километров (достаточно, чтобы испортить всю карту мира) за 30 миллионов лет, которые составляют лишь 1 процент возраста Земли.

А теперь перейдем к действительно быстрым скоростям. Военные реактивные самолеты летают в несколько раз быстрее скорости звука, которая равна приблизительно 10^5 см/с. Вторая космическая скорость примерно в 10 раз больше. Скорость, с которой Земля обращается вокруг Солнца, равна 3×10^6 см/с, а вся наша Солнечная система движется во Вселенной со скоростью 4×10^7 см/с, относительно следов Большого взрыва. Электроны в атомах движутся со скоростью около 3×10^8 см/с, а электроны, создающие изображение на экране вашего телевизора, движутся еще в 10 раз быстрее, со скоростью 3×10^9 см/с. Наконец, мы подходим к свету, которому принадлежат все возможные рекорды скорости. Скорость света является настолько важной величиной, что в универсальной системе единиц у нее есть даже свой символ — c. Она равна произведению 2,998 (для всех практических целей — 3) на 10^{10} см/с, или в патриотических единицах, 186 000 миль в секунду. Согласно специальной теории относительности, общепринятому разделу современной науки, скорость света является предельной скоростью. Ни один объект,

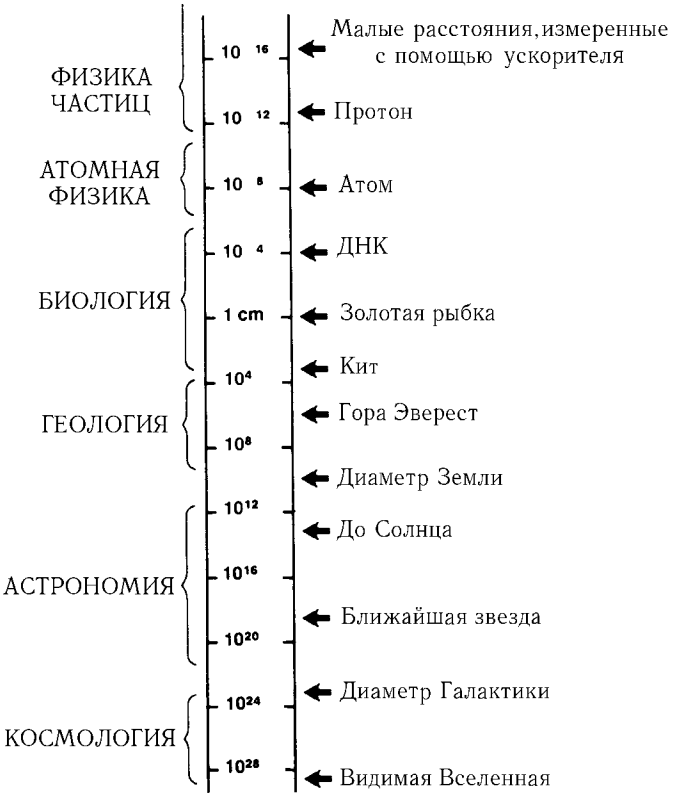


Рис. 6. Расстояния, большие и малые, в сантиметрах.

ни одно сообщение, ни один сигнал любого рода не могут двигаться быстрее скорости света. Не существует и никогда не будет существовать езды со скоростью, превышающей скорость света.



Рис. 7. Типичные скорости в сантиметрах в секунду.

Игра чисел

Младенец, рассматривая пальчики на руках и ногах, учится считать и узнает целые числа. Это очень важное открытие, ибо существует бесконечно много целых чисел, гораздо больше, чем можно сосчитать. Однако результат этого счета, количество целых чисел, является важной математической концепцией. Это бесконечное число математики называют «алеф-нуль». Бесконечные числа, как мы увидим, вообще являются достаточно крепким орешком.

Рассмотрим количество целых чисел, которые делятся на 17. Большинство людей предположило бы, что этих чисел меньше, чем всех целых чисел. Как-никак, на 17 делятся не все целые числа. Однако количество таких целых чисел тоже равно алеф-нулю. Говорят, что два множества численно равны, если члены обоих можно привести в точное соответствие. В большом зале, где танцуют пары, несложно сказать, что количество мужчин равно количеству женщин. Для этого совсем необязательно их считать. Здесь приведено аналогичное соответствие между множеством всех целых чисел и множеством целых чисел, которые делятся на 17:

$$1 \leftrightarrow 17$$
$$2 \leftrightarrow 34$$
$$3 \leftrightarrow 51$$
и т. д.

Каждое целое число связано с единственным множителем 17, и наоборот. Два множества численно равны.

Целое число, которое не делится ни на какое другое целое число, кроме единицы, называется простым. Семнадцать — это простое число, равно как два, три и пять. Разбудим же свои логические навыки, доказав, что существует бесконечное количество простых чисел. Наш метод доказательства называется *reductio ad absurdum*[1]. Мы допустим утверждение, противоположное нашему, и путем логического вывода придем

[1]Сведение к абсурду (лат.); в русском языке также называется доказательством от противного. — *Прим. пер.*

к противоречию. Это означает, что утверждение, противоположное нашему, должно быть ложным, а потому само наше утверждение истинно. Допустим, что существует только конечное число простых чисел. Перемножим все эти числа и добавим единицу. Очевидно, что мы получили число, которое нацело не делится ни на одно из простых чисел, имеющихся в нашем списке. Значит, оно тоже является простым. Вот мы и пришли к противоречию, так как этого числа в нашем исходном множестве не было, хотя мы предполагали, что оно содержит все простые числа. Следовательно, существует бесконечное количество простых чисел. Если быть более точным, то это количество равно алеф-нулю.

Дети, когда начинают делить конфету со своими друзьями, открывают для себя дробные числа. Дробные числа получаются при делении одного целого числа на другое. Множество всех дробных чисел называют «рациональными числами». Конечно, на первый взгляд кажется, что количество дробных чисел значительно больше количества целых чисел. Как-никак, между нулем и единицей лежит бесконечное число дробных чисел. В самом деле, между любыми двумя различными дробными числами существует бесконечное число других дробных чисел. Тем не менее, число рациональных чисел опять равно алеф-нулю. Дробных чисел ничуть не больше, чем целых. Мы доказываем это, выражая точное соответствие между целыми и дробными числами:

$$
\begin{array}{ccccccccccc}
 & & & & 1/1 & \leftrightarrow 1 & & & & & \\
 & & & 1/2 & 2/1 & \leftrightarrow 2 & 3 & & & & \\
 & & 1/3 & 2/2 & 3/1 & \leftrightarrow 4 & 5 & 6 & & & \\
 & 1/4 & 2/3 & 3/2 & 4/1 & \leftrightarrow 7 & 8 & 9 & 10 & & \\
1/5 & 2/4 & 3/3 & 4/2 & 5/1 & \leftrightarrow 11 & 12 & 13 & 14 & 15 &
\end{array}
$$

и т. д.

Мы перечислили дробные числа в порядке возрастания суммы числителя и знаменателя. Существует всего одна дробь, для которой эта сумма равна двум; две дроби, для которых она равна трем; три дроби, для которых она равна четырем, и т. д. В вышеприведенном соответствии дробное число две третьих связано с целым числом восемь. Каждое дробное число связано с различным целым числом, которое, в свою очередь, тоже связано с дробным. Таким образом, количество дробных чисел равно алеф-нулю.

Существует много чисел, которые невозможно выразить через дроби. Такие числа называются *иррациональными*. Их встречаешь при поиске решений алгебраических уравнений. Даже такое простое уравнение как $x^2 = 2$ имеет иррациональное решение. С помощью карманного каль-

кулятора мы узнаем, что квадратный корень из двух равен 1,4142136. Конечно, это число не является точным ответом. Разложение в десятичную дробь продолжается *ad infinitum*[1], никогда не повторяясь. (С другой стороны, при разложении в десятичную дробь рационального числа некоторый набор цифр должен периодически повторяться. Так, $1/7 = 0{,}142857142857\ldots$) Несложно доказать, что квадратный корень из двух действительно является примером иррационального числа.

Очевидно, что существует очень много иррациональных чисел, например, квадратный корень из трех или кубический корень из четырех. Целые числа, дробные числа, квадратные корни, кубические корни и тому подобное входят в множество, называемое «алгебраическими числами». Алгебраическое число определяется как решение алгебраического уравнения типа

$$x - 5 = 0$$
$$x^2 - 2 = 0$$
$$2x^5 - 3x + 1 = 0$$
и т. д.

Ясно, что существует бесконечное количество различных алгебраических уравнений. Однако их можно упорядочить, составив систематический список этих уравнений. Поскольку каждое алгебраическое уравнение имеет только конечное число решений, алгебраические числа также можно вписать в систематический список или привести в соответствие с целыми числами. Следовательно, количество алгебраических чисел также равно алеф-нулю. Алгебраических чисел ровно столько же, сколько целых!

Мы что-то упустили? Существуют ли числа, которые не являются алгебраическими? Существуют. Они называются «трансцендентными числами». Примером такого числа является знаменитое число пи ($3{,}14159\ldots$), обозначающее отношение длины окружности к ее диаметру. Существует бесконечное количество трансцендентных чисел, и здесь мы, наконец, приходим к бесконечности, которая больше алеф-нуля. И это я сейчас докажу, вновь воспользовавшись эффективным методом *reductio ad absurdum*.

Допустим, что эти числа между нулем и единицей можно привести в соответствие с целыми числами. Именно так и было бы, если бы количество этих чисел равнялось алеф-нулю. Мы покажем, что наше допущение приводит к противоречию. Каждое из чисел нашего списка

[1] До бесконечности (лат.) — *Прим. пер.*

можно выразить с помощью бесконечно длинного разложения в десятичную дробь. Предполагаемое соответствие могло бы выглядеть следующим образом:

$$1 \leftrightarrow 0,01248\ldots$$
$$2 \leftrightarrow 0,99216\ldots$$
$$3 \leftrightarrow 0,55158\ldots$$
$$4 \leftrightarrow 0,01306\ldots$$
$$\text{и т. д.}$$

В этом списке каждое число между нулем и единицей должно появляться в некоторой точке. Я продемонстрирую, что это просто невозможно. Я покажу, как построить некоторое число x, которого не может быть в этом списке. Сделать это очень легко. Число x должно раскладываться в десятичную дробь со следующими свойствами. Его первый разряд должен отличаться от первого разряда первого числа списка. Его второй разряд должен отличаться от второго разряда второго числа списка. И так далее. Таким образом, x не равен ни первому числу, ни второму, ни какому бы то ни было числу списка. Число x просто отсутствует в списке. Это противоречие доказывает, что не существует списка, содержащего все числа между нулем и единицей. Количество чисел между нулем и единицей больше алеф-нуля. Это бесконечное число называется алеф-единицей. Так что существует даже иерархия бесконечностей.

От целых чисел к дробным, алгебраическим и трансцендентным числам. Наконец, мы объяснили все числа, соответствующие точкам на линии. От интуитивного понятия целых чисел мы пришли к сложной концепции того, что математики называют «вещественными числами». Это лишь самое начало огромной, волнующей и неограниченной математической дисциплины, называемой «анализом». Если бы не было анализа, то не было бы ни исчисления, ни дифференциальных уравнений. Без этих мощных математических инструментов не могло бы возникнуть наше технологическое общество.

Добро пожаловать в систему радиовещания Вселенной

Система радиовещания Вселенной обеспечивает вас огромным разнообразием радиопрограмм, которые исходят почти из любой точки Вселенной. Программы, идущие в дневное время, создаются в нашей собственной Солнечной системе с помощью радиопередатчиков, расположенных на Солнце. Не пропустите следующую вспышку на Солнце: показ фейерверков, в 40 раз больших чем сама Земля, который транслируется одновременно как по видимым частотам, так и по радио. Вечерние часы отведены для наших более далеких филиалов. Проследите нескончаемую сагу рождения и смерти звезд нашего Млечного Пути. Для серьезного слушателя состоится групповое обсуждение темы таинственной темной массы Вселенной, в котором примут участие более пятидесяти галактик. Квазары и радиогалактики являются суперзвездами нашего исполинского представления, а лауреаты Нобелевской премии Арно Пензиас и Роберт Вильсон прочитают проповедь о создании Вселенной во время горячего Большого взрыва. Последнее по списку, но не по значимости: наше ток-шоу запросит сигналы от разумных внеземных существ, которые могут рассказать немало интересного о жизни в других частях Галактики. Все еще скучаете? Настройте свой приемник на родственные нашим станции в инфракрасном диапазоне, чтобы услышать последние новости о существовании у других звезд других планет. Но прежде предоставим слово нашему спонсору, который расскажет, что такое радиоастрономия, как она появилась и почему она важна.

Благодаря зеленым холмам Земли, дарующим прохладу, и ее изобильным морям эту планету можно считать истинным Эдемом для совсем недавно поселившихся на ней жильцов, для нас — людей. Атмосфера Земли тоже играет незаметную, но важную роль. Содержащийся в ней кислород — это жизнь и дыхание для всех сложных форм жизни на Земле, а также ключ к действию первого и самого главного инструмента человека — огня. Более того, воздух и движение воздушных масс (ветер) обеспечивают эффективную систему транспортировки воды, перенося ее (в виде дождя и снега) за тысячи миль от соленых океанов к плодородным землям. Без воздуха наша планета была бы ужасно горячей днем и ледяной ночью. Этот изолирующий механизм, известный под

названием «парникового» эффекта, зависит от поглощения инфракрасных волн (теплового излучения) углекислым газом воздуха. Более того, наша атмосфера ограждает нас от опасных коротковолновых видов света: канцерогенного ультрафиолетового излучения, опасных рентгеновских лучей и мутагенных космических лучей. В качестве дополнительной роскоши выступает ионосфера, отражающая некоторые радиоволны, благодаря чему становится возможной дальняя связь корабля с сушей и самолета с землей.

Доброе гостеприимство Земли к нашим земным занятиям вызвано, главным образом, неощутимым, но ох-каким-важным! воздухом, который нас окружает.

Согласно древнеегипетской легенде Ра, бог Солнца, породил Шу, бога ветра. Шу забросил молодую богиню Нут в небеса, где она, став богиней неба, остается навеки разлученной с обожающим ее мужем Гебом, богом Земли. Так Шу сменил своего отца на троне правителя Земли. Это, как мы уже видели, заслуженная награда, если не для мифологического божества Шу, то для самого́ благословенного воздуха.

Поскольку нас окружает защитная атмосфера, из космического пространства к нам свободно попадают электромагнитные волны только определенных длин. В действительности, существуют лишь два огромных окна, через которые находящийся на Земле наблюдатель может рассматривать Вселенную, и эти окна изображены на рисунке 1. Излучения, длины волн которых выходят за пределы этих окон, поглощаются атмосферой прежде, чем их удается обнаружить на Земле. Меньшее окно слева включает весь видимый спектр, а также небольшую область, близкую к ультрафиолетовой части спектра (благодаря которой мы загораем), и небольшую область, близкую к инфракрасной части спектра (благодаря которой мы греемся). Именно через это маленькое окно Солнце освещает Землю и питает энергией огромный фотосинтетический двигатель ее урожаев. Через это маленькое окно мы открыли великолепие ночного неба — сначала мы увидели его невооруженным глазом, а затем с помощью все более сложных телескопов и сопутствующих этим телескопам фотографических и спектроскопических вспомогательных средств. Всего лишь век назад мало кто мечтал об удивительных открытиях, которые были сделаны, когда мы обратили внимание на замечательный дополнительный вид, открывающийся из второго окна в диапазоне длин волн от одного сантиметра до тридцати метров.

В самом деле, сама концепция электромагнитного излучения появилась лишь тогда, когда в 1864 году Джеймс Клерк Максвелл достиг блестящего синтеза законов электричества и магнетизма. Согласно его теории сам свет представляет собой чисто электрическое и магнитное явление; свет — это электромагнитная волна очень короткой длины. Те-

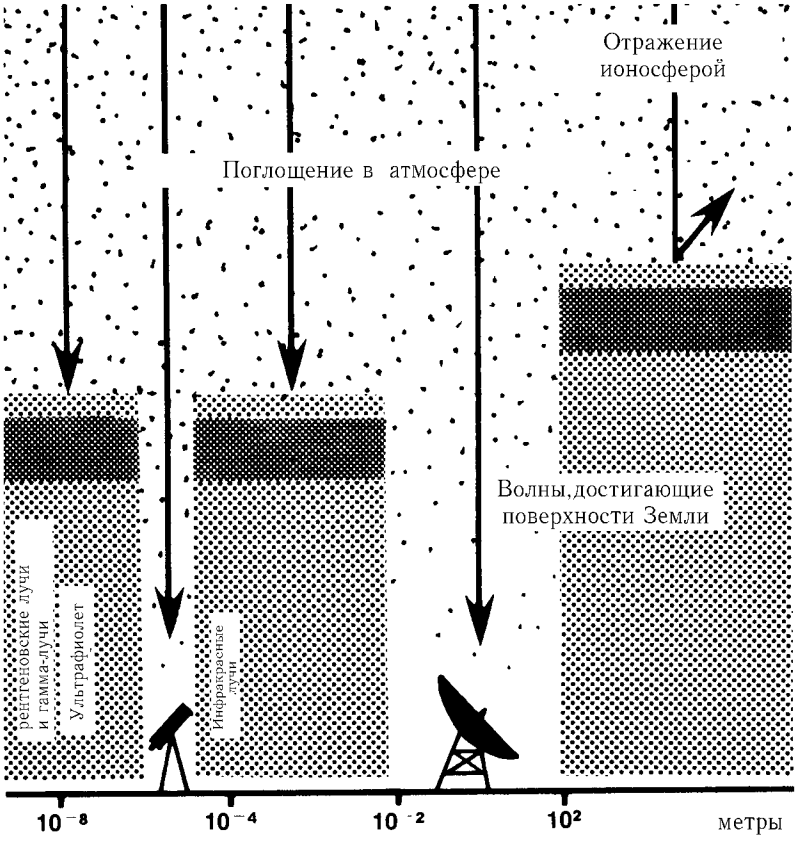


Рис. 1. Электромагнитное излучение проникает сквозь ионосферу Земли и атмосферу, через два окна, или диапазона длин волн: световые волны (меньшее окно слева) и радиоволны.

ория предсказывала существование более длинных волн, но их никогда не видели в лаборатории во времена Максвелла. Генрих Герц, в Германии, вознамерился создать и обнаружить длинноволновое электромагнитное излучение — радиоволны. Его аппарат состоял из искрового промежутка, питавшегося от источника высокого напряжения, помещенного в центр параболического зеркала. Второй искровой промежуток, соединенный с простой проволочной петлей (антенной), помещался на

расстоянии пяти футов от первого, внутри своего собственного параболического рефлектора. Бах! Искра генерируется в первом искровом промежутке, и, вот!, меньшая искра создается на приемнике. Электромагнитные волны создавались, проносились от передатчика к детектору и вызывали вторую искру. Герц открыл радиоволны в 1888 году.

Гульельмо Маркони, предчувствуя коммерчески выгодную разработку, постарался усовершенствовать учебные опыты Герца, имеющие чисто наглядный характер. В ряде экспериментов он посылал радиосигнал на расстояние 10 метров, потом 300 метров, затем 3 000 метров и, наконец, через Ла-Манш. В 1901 году с помощью некоторого более сложного оборудования из Корнуэлла в Ньюфаундленд, через Атлантику, была передана буква *s* (точка-точка-точка: с помощью азбуки Морзе). Наконец, и это была победа, Маркони удалось послать радиотелеграфное сообщение через весь мир: из Уэльса в Австралию в 1918 году. Вскоре после этого, в ноябре 1920 года, появилась первая коммерческая радиостанция с позывными KDKA, вещающая из Питтсбурга, Пенсильвания. За эту идею тут же ухватились.

Рассмотрим область радиоволн электромагнитного спектра, сведенную в таблицу 1. Бóльшая часть этого спектра относится к повседневным делам. Дома и в постели вы просыпаетесь от звука часов-радио, настроенных на *среднечастотную* АМ-радиостанцию. Свои замороженные продукты вы можете разморозить с помощью *микроволн*. Вы звоните по телефону диспетчеру такси, который свяжется с экипажем с помощью волн *высокой частоты*. Посмотрите немного *ультракоротковолновое* телевидение в ожидании и послушайте в наушниках свое *сверхвысокочастотное* коротковолновое радио во время поездки в такси. Поднимитесь на борт оборудованного *радиолокатором* реактивного самолета, который управляется с помощью *низкочастотных* инструментов. За один час вы использовали практически весь радиоспектр, использующий электромагнитное излучение. (Безусловно, свою роль сыграл и видимый свет; иначе водитель вашего такси никогда не нашел бы аэропорт.)

Карл Янский, американский радиоинженер, работал в «Телефонных лабораториях Белла» в Нью-Джерси. В 1932 году он стал первым человеком, услышавшим радиосигналы, исходящие от звезд. Янский изучал фоновые помехи электростатического происхождения, которые нередко мешают слушать радио во время непогоды. Но даже при очень хорошей погоде фоновое шипение, как заметил Янский, один раз в день усиливалось. При этом странный сигнал в каждый последующий день появлялся на четыре минуты раньше, чем в предыдущий. Янский понял, что этот любопытный радиошум связан с движением Млечного Пути по небу. Сигнал исходил из Солнечной системы, из самого центра Галактики!

Таблица 5. **Радиообласть электромагнитного спектра**

Частота	*Длина волны*	*Обозначение и частичный список распределений частот*
10–30 кГц	30 000–10 000 м	Очень низкая частота: радионавигация, морская и подводная связь
30–300 кГц	10 000–1 000 м	Низкая частота: морская связь, морские подвижные спутники, межспутниковая связь
300–3 000 кГц	1 000–100 м	Средняя частота: АМ-радиовещание, любительское радио
3–30 МГц	100–10 м	Высокая частота: коротковолновая радиосвязь, любительское спутниковое радио, частное и служебное радио, диспетчеры такси
30–300 МГц	10–1 м	Очень высокая частота (ОВЧ): УКВ-телевидение, коротковолновая радиосвязь, радиоастрономия
300–3 000 МГц	1 м–10 см	Сверхвысокая частота (СВЧ): СВЧ-телевидение, радиолокатор, синхронные спутники, сотовые телефоны
3 000 МГц–300 ГГц	10 см–1 мм	Микроволны: спутники авиационной радиосвязи, радиоастрономия, микроволновые печи

Судя по всему, работу Янского ученые восприняли далеко не так серьезно, как писатели-фантасты и их почитатели. В 30-е годы лишь один астроном-любитель, Грот Ребер, увлекся радиоастрономией, тогда находившейся в зачаточном состоянии. Инженер из Иллинойса, он соорудил тридцатифутовый радиотелескоп у себя на заднем дворе, откуда спокойно изучал небо. Одним из замечательных наблюдений Ребера стало открытие точечного источника радиоволн в космическом пространстве, объекта из созвездия Лебедя, который теперь известен как Cygnus A.

Радиолокатор — это электронная система, использующая радиоволны для обнаружения объектов, невидимых невооруженному глазу. Радиолокационные устройства способны обнаружить положение объекта, его расстояние до наблюдателя, его скорость и направление движения, а иногда даже его размер и форму. Само слово является акронимом

выражения «Радиообнаружение и определение дальности»[1]. В начале тридцатых годов использовались, в основном, грубые устройства радиообнаружения, а изобретение современных радиолокаторов началось с военных нужд Второй мировой войны. Именно развитие радиолокационной технологии обеспечило возможность быстрого послевоенного роста и развития радиоастрономии, а также поражения Люфтваффе[2].

К 1954 году было замечено и наблюдалось уже около сотни источников радиоволн в небе. Лишь немногим из них можно было подобрать оптических двойников, видимых в телескопы. Многие астрономы полагали, что эти источники соответствуют иначе невидимым «радиозвездам», находящимся в пределах нашей галактики.

Когда британские радиоастрономы установили точное положение на небе Cygnus A, появилась возможность использования гигантского двухсотдюймового телескопа Паломар. Действительно, оказалось, что по своему положению источник радиоволн совпадает с некоторой возмущенной галактикой. На рис. 2 изображение Паломара представляет собой радиоизображение Cygnus A. Два радиокулачка расположены по обе стороны центральной Галактики. Считается, что источники радиоволн состоят из необъятных облаков ионизированной плазмы, каждое из которых по протяженности больше самой галактики.

Как только видимый объект сопоставляется с источником радиоволн, появляется возможность определения удаленности данного объекта от Земли. Характеристические спектральные линии оптического источника сдвигаются в красную область спектра на величину, зависящую от скорости его удаления. Согласно закону Хаббла эта скорость пропорциональна расстоянию. Самое интересное началось тогда, когда было определено красное смещение центральной галактики Cygnus A. При том что Cygnus A является вторым по яркости источником радиоволн в небе, измерения красного смещения показали, что он расположен на невероятно большом расстоянии в *миллиард* световых лет от Земли. Единственная возможность столь высокой интенсивности этого маяка при такой его удаленности состоит в том, что он является необычайно мощным источником, посылающим порядка 10^{38} ватт радиоэнергии. Этот источник радиоволн мощнее нашей собственной галактики приблизительно в десять миллионов раз. В самом деле, Cygnus A производит в виде радиоволн больше энергии, чем типичная большая галактика излучает в видимом диапазоне. Это был первый открытый представитель

[1]В английском языке радиолокатор — это «radar», или акроним для «Radio Detecting and Ranging». — *Прим. пер.*

[2]Воздушные силы гитлеровской Германии. — *Прим. пер.*

[3]National Radio Astronomy Observatory — Национальная радиоастрономическая обсерватория. — *Прим. пер.*

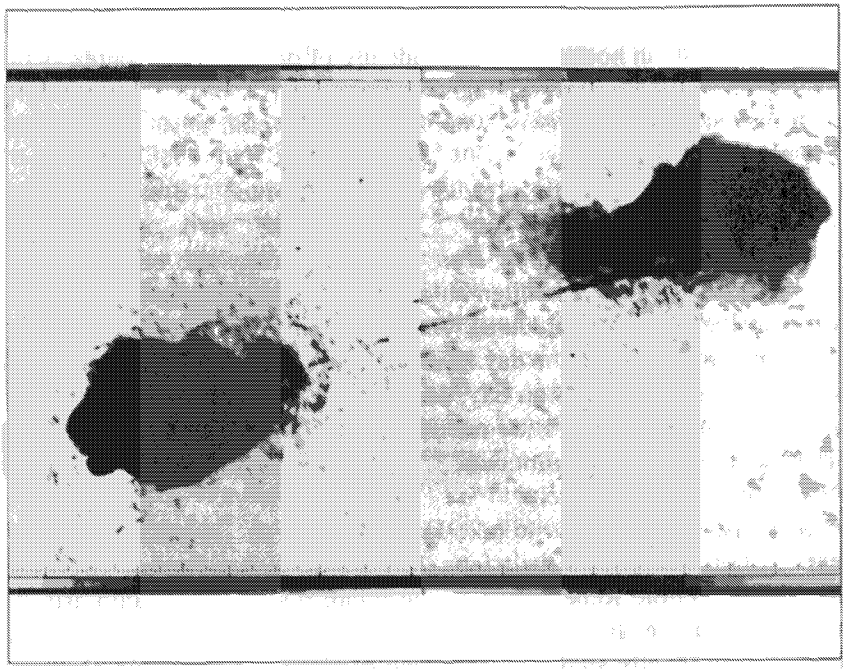


Рис. 2. Радиоизображение Cygnus A. (С разрешения NRAO[3].)

огромного класса новых и причудливых творений космоса: *радиогалактика*. За многие десятилетия, прошедшие со времени ее открытия, было обнаружено много других радиогалактик. Сегодня каталоги насчитывают несколько тысяч таковых.

Мы не обладаем точным знанием того, что же такое радиогалактика, но одно несомненно: ее энергетические требования непомерны. Согласно одной популярной теории радиогалактика возникает при очень быстром вращении черной дыры в центральной Галактике. Черная дыра — это настолько тяжелый и при этом настолько маленький объект, что ничто, даже свет, не способно из нее вырваться. Мы можем понять, что такое черная дыра, если рассмотрим концепцию «второй космической скорости». Пуля, выпущенная в воздух, вернется на Землю, потому что движется слишком медленно. Вторая космическая скорость на поверхности Земли равна порядка одиннадцати километров в секунду, что в десять раз превышает скорость самого быстрого реактивного самоле-

та. Именно такую скорость должен развить космический корабль или спутник, чтобы преодолеть тяготение Земли. Для Солнца вторая космическая скорость намного больше, примерно 600 километров в секунду. Допустим, что мы каким-то образом сумели сжать Солнце в шар радиусом всего лишь в три километра. (Безусловно, *мы* на такое не способны. В других частях нашей галактики такие вещи вполне возможны и, вероятно, даже имеют место.) Вторая космическая скорость на поверхности тела, имеющего массу Солнца и радиус три километра, равна скорости света. Поскольку Эйнштейн сказал (и мы с ним согласны), что ни один объект не может двигаться быстрее скорости света, мы создали ловушку, в которую очень легко попасть, но из которой абсолютно невозможно вырваться: это и есть черная дыра.

Представьте, что в самом центре радиогалактики находится массивная черная дыра, которая могла быть создана при столкновениях и слиянии множества звезд в переполненной внутренней области галактики. Ее окружает огромный и растущий диск сросшегося материала, которым ненасытная черная дыра будет кормиться, при этом увеличиваясь, в конечном счете, вероятно, для того чтобы проглотить весь центр галактики. В процессе поглощения черной дырой окружающих ее звезд может высвобождаться огромное количество энергии. Каким-то образом эта энергия выходит наружу в виде двух противоположно направленных лучей, которые приводят в действие огромные радиомаяки Cygnus A и других радиогалактик.

Некоторые астрономы полагают, что создание черной дыры в центре галактики — событие достаточно распространенное. Даже в центре нашего Млечного Пути может быть «маленькая» черная дыра, такая, которая пока поглотила не более нескольких миллионов звезд. Черная дыра ненасытна. Однажды, в отдаленном будущем, наша черная дыра настолько раздуется, что превратит нашу собственную галактику в радиогалактику. Неясно, станет ли Земля вследствие этого необитаемой, но беспроводная связь и передача данных (равно как и радиоастрономия) точно будет невозможна. Чтобы застраховаться от подобного исхода, вы могли бы установить у себя дома антенну кабельного телевидения.

Один из разделов науки ботаники представляет собой терпеливое и систематическое изучение флоры Земли, основанное на сборе списков разнообразных видов, расположенных упорядоченным образом. Сбор и классификация являются важными аспектами многих других наук типа зоологии, энтомологии и минералогии. То же самое относится и к астрономии. Очень старый, но важный список странных тел на небосводе представляет каталог Мессье, созданный в 1781 году. Он содержит 103 тусклых и туманных объекта (которые тогда называли туманностями), которые не являются ни звездами, ни кометами. Некоторые,

типа M5, являются гигантскими звездными скоплениями в пределах нашей собственной галактики. Крабовидная туманность, первая в списке Мессье и потому известная как M1, является следом ярчайшей сверхновой, которая поразила китайских астрономов в 1054 году. Другая туманность, M31, — это галактика Андромеда, родственная нашей. К 1895 году каталог Мессье был вытеснен Новым общим каталогом, содержащим порядка 15 000 различных статей. Поскольку на небесной сфере присутствует слишком много интересных объектов, чтобы каждый из них мог иметь свое имя, астрономы вынуждены пользоваться каталожными номерами. Крабовидная туманность, например, являясь 1952-й статьей Нового общего каталога, иногда называется не M1, а NGC 1952[1].

В 1959 году новая наука радиоастрономии сделала гигантский шаг к научной зрелости, опубликовав Третий Кембриджский (3C) каталог, первоначально состоявший из списка, содержащего 471 источник радиоволн. Сейчас этот каталог используется повсеместно.

Многие источники радиоволн в 3C каталоге соответствуют известным объектам в пределах нашей собственной галактики. В спектре радиочастот Крабовидная туманность, например, известна как 3C144. Другие статьи соответствуют взрывающимся радиогалактикам, о которых мы говорили. Огромный источник радиоволн, Cygnus A, который впервые наблюдал Ребер, называется 3C405. Некоторые наиболее своеобразные галактики, содержавшиеся в оригинальном каталоге Мессье, наблюдались в радиотелескопы и были идентифицированы как радиогалактики. На рисунке 3 изображены M87 (в спектре радиочастот известная как 3C274) и M82 (или 3C231). Ясно, что обе галактики в высшей степени возмущены; одна выказывает огромную струю исторгаемой материи, а другая — гигантские нити горячего газа, извергающегося из центра галактики. Обе системы являют собой мощные источники радиоволн и рентгеновских лучей.

Однако несколько источников радиоволн по-прежнему невозможно объяснить как радиогалактики или необычные звезды нашей галактики. Их оптические двойники не найдены. Прорыв произошел в 1962 году при использовании австралийского радиотелескопа. Сирил Хазард и его соратники собрались понаблюдать затмение источника радиоволн 3C273 Луной. Эта процедура дает радиоастроному возможность установления очень точного положения источника на небесной сфере. Им удалось найти звезду, которая является видимым двойником 3C273. Исследуя ее оптический спектр, Мартен Шмидт из Калтеха[1] сумел установить ее красное смещение, а затем показал, что она лежит на расстоянии

[1]От New General Catalog — Новый общий каталог (англ.) — *Прим. пер.*

[1]Калифорнийский технологический институт. — *Прим. пер.*

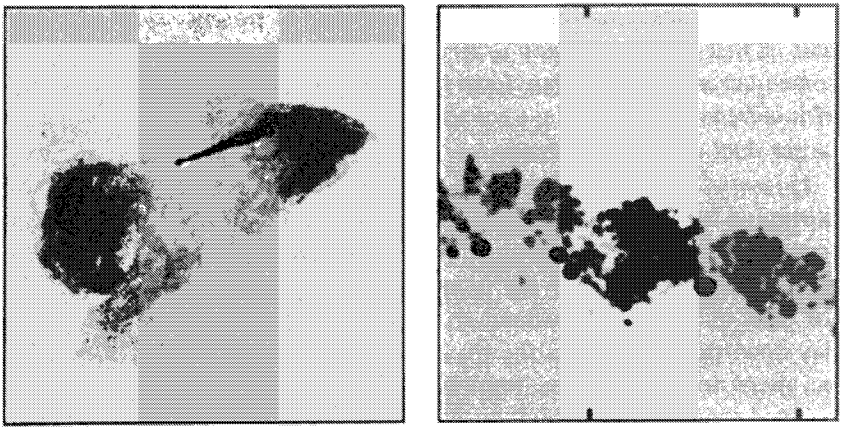


Рис. 3. Два мощных источника радиоволн и рентгеновских лучей: M87 (слева) и M82. (С разрешения NRAO.)

примерно 500 миллионов световых лет. При этом визуальное изображение 3C273 нельзя назвать тусклым. Чтобы примирить столь отдаленное расстояние, на котором она находится, с ее видимой яркостью, мы вынуждены заключить, что она представляет собой чрезвычайно мощный источник. Ее абсолютная яркость должна быть в 100 раз больше самой яркой из известных галактик. Очень скоро к 3C273 присоединилось множество других подобных ей объектов, которые назвали «квазарами» или «квазизвездными объектами». Самый мощный из известных квазаров, 3C279, излучает энергию, в 100 000 раз превышающую энергию нашей собственной галактики.

Квазары, которые являются самыми яркими объектами на небесной сфере, можно увидеть на самых отдаленных расстояниях. У некоторых из них красное смещение настолько велико, что они должны находиться на расстояниях почти в 20 *миллиардов* световых лет. Свет, который мы видим сегодня, возник в очень ранний момент истории Вселенной, когда она была молода и, несомненно, весьма отлична от той, какой является сейчас. Квазары могли возникнуть из горячего Большого взрыва даже раньше, чем появились звезды и галактики; может быть, тогда, когда Вселенной исполнился всего лишь миллиард лет.

Галактики — это достаточно большие объекты, протяженность которых обыкновенно равна нескольким десяткам тысяч световых лет. Квазары, которые зачастую гораздо ярче галактик, известны как относительно

маленькие, компактные объекты, поскольку их радиосигналы и оптические сигналы с течением времени совершают очень сильные флуктуации. Значительные изменения могут произойти всего за несколько недель. Поскольку ни один сигнал не может перемещаться быстрее скорости света, наблюдаемая временная шкала изменений яркости квазара говорит нам о том, что его активная область не превышает нескольких световых недель. Действительно, некоторые квазары совершают флуктуации еженощно. Они создают энергию сотен Млечных путей (или триллионов звезд) в области пространства, по протяженности не превышающей нашу Солнечную систему!

Квазары — такие яркие, такие маленькие и такие далекие — одни из самых загадочных творений космоса. Несмотря на то, что предлагалось множество теорий, объясняющих, что же это такое, ни одна из них не была принята всеми. Но поскольку многие чудеса небес удалось объяснить через законы физики, открытые на Земле, ученые уверены, что не далек тот день, когда они узнают тайну квазаров. Нет никакого сомнения в том, что квазары существуют не для того, чтобы озадачить нас, а для того, чтобы что-то нам объяснить.

Согласно космологическому принципу Вселенная, в общем и целом, выглядит одинаково, независимо от того, где находится наблюдатель. Таким образом, при построении карты видимой Вселенной мы можем поместить себя точно в ее середине. Карта, изображенная на рисунке 4 и фактически представляющая разрез трехмерной Вселенной, показана как круг, имеющий конечный радиус. Радиус видимой Вселенной составляет около 20 миллиардов световых лет или 2×10^{28} см. Так произошло потому, что у света, или у радиосигналов, было всего 20 миллиардов световых лет для распространения с момента рождения Вселенной. Размер нашей карты со временем увеличивается: со скоростью одного светового года в год. Чем старше мы становимся, тем дальше мы видим. Эта карта является кругом (поперечным сечением сферы); именно такой ее видит наблюдатель из любой точки Вселенной и в любом состоянии движения. Предпочтительного направления не существует; в целом, Вселенная однородна и изотропна. Хотя разумный наблюдатель с отдаленной планеты увидел бы другое расположение звезд и представил бы другие созвездия, общая картина все равно осталась бы неизменной. Я использовал произвольный масштаб Млечного Пути, так как при соблюдении точных пропорций он имел бы размер микроскопического вируса, а наша Солнечная система внутри него была бы меньше атомного ядра. Вселенная необъятна.

На нашей в высшей степени схематичной карте Вселенная делится на пять концентрических оболочек. В самом центре расположена Солнечная система, включающая семь небесных тел древних, а также до-

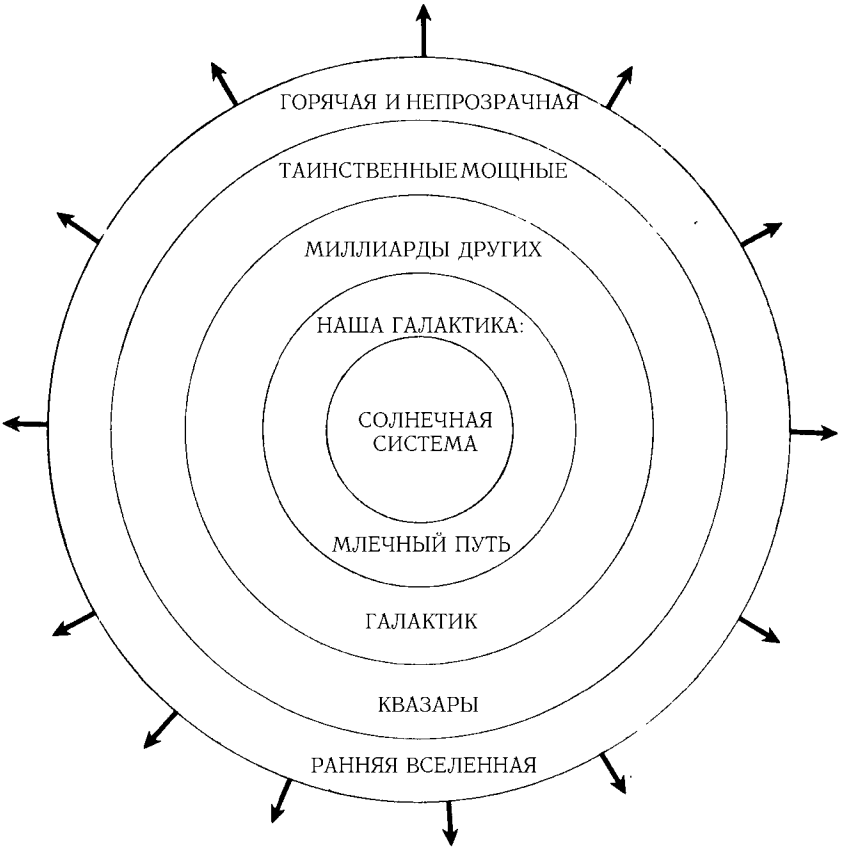


Рис. 4. Вселенная в нашем представлении.

полнительные планеты, спутники, астероиды и кометы, которые были открыты с тех пор. Ее радиус равен примерно одной тысячной светового года. Вторая оболочка содержит Млечный Путь, имеющий радиус порядка 40 000 световых лет. (Земля, безусловно, находится не в центре Солнечной системы, как и Солнце расположено не в центре Галактики.) Практически каждая звезда, видимая в небе невооруженным глазом, лежит в пределах второй оболочки. Третья оболочка включает галактики и простирается на расстояние до миллиарда световых лет. Ве-

роятно, существует много галактик, которые расположены еще дальше, но мы их не видим, даже с помощью своих самых мощных инструментов, из-за огромного расстояния, отделяющего их от нас. Галактик в видимой Вселенной примерно столько же, сколько звезд в Млечном Пути: порядка ста миллиардов. Галактики *не* рассеяны в космическом пространстве беспорядочным образом. Они образуют группы или скопления, состоящие из множества галактик. Млечный Путь, например, является представителем того, что в данной области известно как «бедное неправильное скопление» и с нежностью называется Местной группой галактик. Ширина этой группы составляет несколько миллионов световых лет, и она включает две достаточно крупные галактики (Млечный Путь и Андромеду), а также около дюжины карликовых галактик. Из богатых звездных скоплений самое близкое к нам, расположенное примерно в 60 миллионах световых лет, — это скопление Девы, содержащее сотни галактик. Но не только галактики образуют скопления, скопления галактик, в свою очередь, образуют суперскопления. Скопление Девы и наша местная группа являются частями местного суперскопления протяженностью в сотни миллионов световых лет. Кроме скоплений и суперскоплений во Вселенной присутствуют огромные пустоты, абсолютные пустыни пространства, в которых нет ни единой галактики на протяжении сотен миллионов световых лет (рисунок 5). Почему галактики распределены таким странным образом, придающим крупномасштабной структуре Вселенной своеобразное волокнистое строение? Этого мы пока не знаем.

Четвертая оболочка Вселенной населена мощными и таинственными, а также компактными источниками, которые называют квазарами. В этой далекой части Вселенной, находящейся в миллиардах световых лет от Земли, простые галактики слишком далеки, чтобы их можно было увидеть. Единственными видимыми объектами в этой области являются квазары, способные испускать в тысячи раз больше света, нежели галактики. Эти объекты настолько яркие, что их видели на расстояниях, составляющих до девяноста процентов пути до самого дальнего горизонта, время распространения света от которого равно возрасту Вселенной. Такой объект, будь он расположен в нескольких тысячах световых лет от Земли, был бы столь же ярким, что и Солнце. Свет отдаленных квазаров смещался в красную область спектра на очень большую величину. Длины волн увеличивались на 350 процентов. Это значит, что ультрафиолетовое излучение трансформировалось в инфракрасное. Если бы свет стоваттной лампочки трансформировался подобным образом, то этот свет невозможно было бы увидеть.

По мере приближения к периферии нашей карты Вселенной мы исследуем то, как выглядели различные объекты ближе к моменту созда-

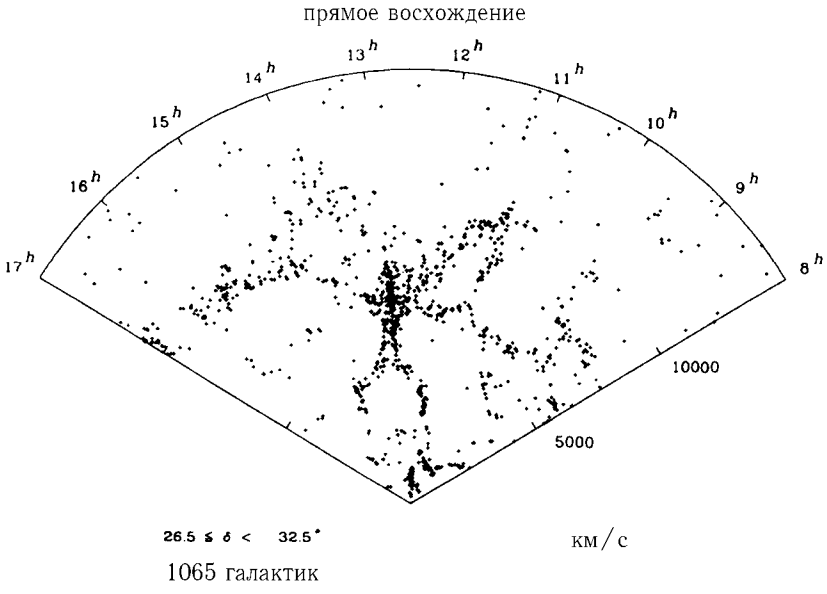


Рис. 5. Поперечное сечение Вселенной, демонстрирующее крупномасштабную волокнистую структуру. Крестики указывают положения галактик, обнаруженных в пределах части Вселенной, имеющей форму куска пирога. Источник: *V. Lapparent, M. J. Geller, J. P. Huchra,* Astrophysical Journal, 302, L1, 1986.

ния Вселенной. Мы сталкиваемся со Вселенной гораздо более молодой, маленькой и горячей, чем она есть сейчас. Когда Вселенной было менее полумиллиона лет, она была настолько горячей, что ни одна знакомая нам разновидность материи не смогла бы выжить. Несмотря на то, что электроны и атомные ядра, составляющие атомов, уже существовали, их движения были слишком быстрыми и резкими, чтобы могли образоваться атомы. При таких крайних температурах световые волны не могли свободно распространяться из одной точки в другую без поглощения или рассеяния. Вселенная была непрозрачной. Внезапно, по мере расширения и охлаждения Вселенной до температуры около 3 000°С, когда стало возможным образование нейтральных атомов, Вселенная стала прозрачной. Тонкий наружный слой нашей карты Вселенной представляет первую половину миллиона лет ее существования — период непрозрачности. В конце этого периода Вселенная была раскалена добела:

она была столь же яркой, как поверхность звезды. Когда Вселенная внезапно стала прозрачной, она наполнилась ослепительным сиянием божественного блеска. Вглядываясь в самые отдаленные уголки ночного неба, разве не суждено нам увидеть свет первичного Большого взрыва? Разве тьма ночи не опровергает теорию огненного творения?

Ответ прост: свет Большого взрыва и по сей день окружает нас. Но при этом он настолько сместился в красную область спектра, что стал для нас невидимым. Согласно современной космологии первичное излучение, исходящее из горячего Большого взрыва, за время своего долгого пути к нам сегодняшним, по длине волны увеличилось в 1 000 раз. Другими словами, Вселенная, в целом, расширилась и остыла с того момента, когда стала прозрачной. В начале Эпохи Атомов она находилась при температуре более 3 000°С. В холодной и темной Вселенной, которую мы населяем сегодня, температура всего на три градуса выше абсолютного нуля. Сильное излучение, созданное Большим взрывом, по-прежнему нас окружает, но оно трансформировалось в невидимое микроволновое излучение.

История предсказания и открытия космического фонового излучения довольно любопытна. Первое экспериментальное свидетельство этого излучения было получено в 1937 году, но важность этой информации не понял никто. В 1948 году Джордж Гамов осознал, что ранняя Вселенная должна была быть очень горячей, чтобы развиться в современную нам Вселенную. Его коллеги поняли, что след первичного огненного шара, в виде повсеместного фонового микроволнового излучения, должен присутствовать и сегодня. Однако, судя по всему, тогда никто не воспринял это работу так серьезно, как она того заслуживала.

Современный теоретический подход к Вселенной, созданной во время Большого взрыва, и его экспериментально наблюдаемым следствиям разработали П. Дж. Э. Пиблс и его коллеги в Принстонском университете. Они вычислили, что Вселенная должна быть наполнена фоновым микроволновым излучением, которое можно найти, если приложить к этому усилия. Экспериментальная группа Принстонского университета вознамерилась найти этот слабый реликт древнего великолепия Вселенной. Однако еще до начала эксперимента они узнали, что, по счастливой случайности, этот куш сорвали два молодых физика, работающих в Телефонных лабораториях Белла.

Для открытия космического микроволнового фонового излучения была использована весьма странная рупорная антенна. Она была сконструирована Лабораториями Белла в Холмделе (Нью-Джерси) для практических целей связи с нашими тогда совсем примитивными спутниками. Когда отпала необходимость в использовании этого прибора при работе со спутниками, Арно Пензиас и Роберт Вудроу Вильсон транс-

формировали его для целей радиоастрономии. Они готовились измерить уровень фоновых электростатических явлений в микроволнах — эффект, который мог помешать наблюдениям удаленных источников радиоволн. Они ожидали, что вообще не зафиксируют подобного радиошума. Их измерение должно было привести к отрицательному результату и всего лишь подтвердить качество их антенны.

Во время первого эксперимента, проведенного 20 мая 1964 года, они зафиксировали неожиданный фоновый сигнал. Но прежде чем принять такой результат как указание на новое астрофизическое явление, Пензиас и Вильсон должны были исключить более традиционные объяснения. Неужели они недооценили загрязнение, исходящее от радиостанции «Биг Эппл», находившейся поблизости? Направив антенну непосредственно на Нью-Йорк-Сити, они показали, что дело не в этом. Имеет ли этот сигнал какой-то другой источник? «Пара голубей забралась в узкую часть рупора, где он входит в теплую кабину, — вспоминает Вильсон. — Они покрыли всю внутреннюю поверхность рупора белым материалом, который знаком всем городским жителям. Мы выселили голубей, отчистили их экскременты, но получили только небольшое понижение температуры антенны». В конце концов, Пензиас и Вильсон убедили себя, что они действительно открыли что-то новое. В 1965 году в *Astrophysical Journal* были опубликованы сразу две работы. Одной из этих работ было описание эксперимента, проведенного в Лабораториях Белла и указывающего на необъяснимое поведение антенны. Другая же работа, написанная группой из Принстона, предлагала объяснение данного эффекта с помощью космологической теории. В 1978 году Пензиас и Вильсон получили Нобелевскую премию по физике за открытие космического фонового излучения.

С 1965 года космическое фоновое излучение измеряли много раз и разными способами. Его обнаруживали на различных частотах радиоволн. Более того, его измеряли в инфракрасной области электромагнитного спектра. Поскольку это излучение не проходит через атмосферу, все эти эксперименты проводились дистанционно: в ракетах или на воздушных шарах. Все данные соответствуют космологической интерпретации: мы наблюдаем последние затихающие отголоски Большого взрыва, породившего все.

Фоновое излучение является однородным в очень высокой степени точности. Это значит, что Вселенная, когда она только стала прозрачной, была почти абсолютно невыразительной и однородной. Из первичного хаоса еще не возникли даже галактики. Однако Вселенная действительно кажется несколько более горячей в общем направлении Девы. Это объясняется абсолютным движением нашей Солнечной системы во Вселенной. Судя по всему, наш Млечный Путь несется в направлении

созвездия Девы с ошеломляющей скоростью — 400 километров в секунду. Этот результат нельзя назвать совершенно неожиданным, поскольку наша галактика находится под влиянием сил гравитации соседних галактик. Это всего лишь последний след антропоцентризма. Далекие от центра Вселенной, мы живем на крошечной планете типичной, и даже маленькой, звезды. Солнечная система находится в захолустье более или менее средней галактики среди миллиардов ей подобных — представителя совершенно непримечательного «бедного и неправильного» скопления галактик. И все это вместе взятое даже не покоится во Вселенной. Его движением управляет достаточно значительное скопление галактик, расположенное в ста миллионах световых лет от нас. Мы можем выглядеть очень особенными в собственных глазах, но мы совершенно определенно не занимаем очень привилегированного положения во Вселенной.

Одиноки ли мы во Вселенной?

В видимой Вселенной существует сто миллиардов галактик, каждая из которых насчитывает сто миллиардов звезд. Разумно ли предполагать, что жизнь существует только на одной, ничем не примечательной планете? Законы физики одинаковы повсюду. Быть может, существует несметное количество других «Землей», таких же гостеприимных как наша, населенных экзотическими растениями и животными. Эволюция, единожды приведшая к способности мыслить, может сделать это снова и снова. Другие общества, живущие на далеких планетах, тоже могут исследовать небосвод, удивляясь тому, что они на нем видят, пытаться создать теорию Природы и понять свою роль в ней.

Подобные мысли не новы; своими корнями они уходят на много веков назад и время от времени возникают снова и снова.

Метродор, живший в четвертом веке до н. э., полагал, что «... считать Землю единственным миром, где существует жизнь, в бесконечном пространстве так же нелепо, как и утверждать, что в целом поле, засеянном просом, взойдет только одно зерно».

В первом веке до н. э. Лукреций признал, что «... мы должны понимать, что в других частях Вселенной существуют другие миры, населенные другими людьми и другими животными».

Другие мыслители тоже представляли жизнь на других планетах и в отдаленных мирах. Джордано Бруно в шестнадцатом веке, Христиан Гюйгенс в семнадцатом веке и так до наших дней. В 1959 году Джузеппе Коккони и Филип Моррисон писали:

... Неподалеку от какой-то звезды, во многом похожей на наше Солнце, существуют цивилизации, обладающие научными интересами и техническими возможностями, гораздо большими, чем те, которые доступны сейчас нам. Членам этого общества наше Солнце должно казаться вероятным местом эволюции нового общества. В высшей степени вероятно, что в течение долгого времени они ожидали развития науки вблизи Солнца. Мы допустим, что уже очень давно они создали канал связи, о котором мы однажды узнаем, и что они терпеливо ждут ответных сигналов от Солнца, которые известят их о том, что в сообщество разума вступило новое общество...

Почему мы должны ждать сигнал от внеземной цивилизации, а не пытаться самостоятельно отправить им свое сообщение? Ответ прост: уровень развития нашей техники позволяет слушать, но не позволяет посылать. Мы, земные мальки, — совсем молодой вид. Подобно маленьким детям, мы должны слушать, а не говорить. Жизнь существовала на Земле в течение большей части ее истории, длящейся четыре миллиарда лет, а мы всего лишь последние из ее жильцов. Неразумные динозавры владели планетой около 300 миллионов лет, а нечто, напоминающее нас, живет на этой планете менее одного миллиона лет. Записанная история насчитывает порядка 10 000 лет, но мы развили умения, которые необходимы, чтобы слушать своих братьев внеземного происхождения всего двадцать лет назад.

Находится ли человеческий род в самом начале своей истории или он приближается к ее концу? Ввиду наших громадных аппетитов в отношении вооружения и войн, пессимист может поверить, что разум опасен для своего собственного здоровья и выживания. Человечество, или нечто ему эквивалентное в любом другом месте, уничтожит себя в ядерном огне, как только обнаружит, как это можно сделать. Я не столь пессимистичен. Я верю, что мы избежим современной ядерной опасности, чтобы расцвести вновь точно так же, как из темного тысячелетия родилось великое Западное Общество. Наша планета изобильна и может служить нам не менее миллиарда лет. Сегодняшняя наука более справедлива, более честна и более гуманна, чем когда-либо. Завтрашний день увидит «жизнь, свободу, поиски истины и красоты», а также «от каждого по способностям, каждому по потребностям». Для оптимиста человечество стоит в самом начале своего пути: оно еще не созрело, но наполнено надеждами молодости.

Принятие оптимистической точки зрения должно преобладать, по крайней мере, в некоторых развитых внеземных обществах. Подумайте о замечательных технологических достижениях только этого века, составляющего менее чем одну миллионную долю времени жизни мыслящего вида: мгновенное появление и распространение по всему миру радио, телевидения и телефона; автомобилей и реактивных самолетов; стереонаушников для аквалангистов; одноразовых часов, идущих с точностью, о которой век назад никто даже не мечтал; полное искоренение оспы и ослабление подагры; карманные калькуляторы, более эффективные, чем тысяча бухгалтеров; живой человек на Луне, и т. д. и т. п. Подумайте о том, что наше общество сможет сделать в следующем веке или через миллион лет. Большинство гипотетических инопланетян намного превзошли нас, так как они накапливают свои знания и умения в течение бессчетного количества веков. Если они обладают чем-то вроде любопытства, присущего нашему собственному виду, — а любо-

пытство непременно является составляющей разума, — то они стремятся связаться с нами.

Если в космосе есть разумные живые существа, то почему они просто не навестят нас, чем терпеливо ждать, пока мы, наконец, удосужимся поднять телефонную трубку? К сожалению, о космическом путешествии проще сказать, нежели его совершить; это касается даже наших более старших и более опытных инопланетян. Марсиане, если бы они существовали, действительно могли бы заглянуть к нам. К сожалению, в нашей Солнечной системе не существует разумных видов, кроме нас самих. Судя по всему, на других планетах нет никаких признаков жизни.

Совсем недавно уважаемые астрономы размышляли о присутствии на Марсе высокоразвитого общества. Персиваль Ловелл, которому удалось вывести существование и орбиту Плутона, полагал, что на Марсе может быть жизнь. Многие исследователи, наблюдавшие Марс, убедили себя, что сложная система искусственных каналов на его поверхности была кем-то сконструирована и возведена. Обсерватория им. Ловелла во Флэгстаффе (Аризона) была изначально построена для более внимательного изучения этой планеты. Но теперь мы знаем, что эти каналы — не более чем оптическая иллюзия. Космический экипаж США высаживался на поверхность Марса, фотографировал ее и искал признаки жизни. Марс — очень холодная планета. Ее атмосфера, состоящая из углекислого газа, очень разрежена, и там нет признаков жизни.

Наши советские коллеги исследовали Венеру с помощью беспилотных аппаратов, опускаемых на ее поверхность, и сообщили, что высокоразвитое общество там тоже отсутствует: Венера — ужасно горячая планета, окруженная оболочкой из сильно сжатого углекислого газа. Судя по всему, Земля — это единственное в нашей Солнечной системе тело, которое взрастило живых существ, поэтому она совершенно определенно является уникальным средоточием знания.

Умные инопланетяне, если они существуют, живут на гипотетических планетах далеких звезд, расположенных, по крайней мере, в нескольких световых годах от нас. Элементарные вычисления, основанные на известных законах, показывают, что для таких существ бесконечно дешевле попытаться связаться с нами, чем прилететь к нам. Не имея ни малейшего представления о внеземной экономике, мы можем определить «дешевизну» через энергетические требования. Пол Горовиц, один из руководителей поиска внеземного разума, аргументирует: «Путешествие к ближайшей звезде и обратно, осуществленное со скоростью, составляющей 70 процентов от скорости света, затратило бы количество энергии, равное полному суммарному потреблению электроэнергии Соединенными Штатами за полмиллиона лет, и это только в том случае, если мы постулируем идеально эффективную ракету, приводимую

в действие аннигиляционным двигателем! С другой стороны, *сообщение* на межзвездные расстояния через радиопередачи оказывается не только достижимым, но и положительно дешевым. С помощью современной технологии мы могли бы связаться с другой цивилизацией типа нашей, расположенной на любой из нескольких миллионов ближайших звезд; межзвездная телеграмма на одну из самых далеких звезд из этого списка (расположенную на расстоянии тысячи световых лет) стоила бы один доллар за слово». Обратите внимание на то, что энергетические затраты на приезд к нам инопланетян рассчитаны на основе в высшей степени гипотетической (и сомнительной) лучшей технологии, а стоимость сообщения основана на существующих электронных возможностях, имеющихся в наличии у мальков-землян. Нам не следует бояться вторжения грубых пучеглазых чудовищ, которые стремятся превратить людей в своих домашних животных или деликатесные блюда; не стоит ждать и щедрых самаритян, предлагающих бриллианты, наркотики и оружие в обмен на нашу землю. В среде наших неземных братьев беседа сто́ит дешево, а путешествие — запрещено.

Прежде чем пускаться на поиски внеземного разума, мы могли бы попытаться убедить себя в возможности того, что жизнь во Млечном Пути — явление, по крайней мере, нередкое. С вашего позволения, я подчеркну, что я говорю о жизни в том виде, в каком она известна нам: жизнь, основанная на химии углерода и зависящая от достаточного количества жидкой воды. При этом мы исключаем возможность существования действительно экзотических форм жизни, типа чисто вымышленных тварей, которые обожают серную кислоту, имеют метаболизм, основанный на селене, или состоят из сложных электромагнитных конфигураций в горячей ионизированной плазме. Подобное исключение сделано без каких бы то ни было предрассудков. Фантастические формы жизни могут где-то существовать и тоже могут пытаться связаться с нами. Да пребудет с ними Сила!

Знакомые формы жизни требуют наличия знакомой окружающей среды. Они могут населять планеты типа Земли, которые обращаются по орбите вокруг звезды, несильно отличающейся от нашего Солнца. Звезды, намного меньшие, чем наше Солнце, попросту не производят достаточного количества энергии, чтобы поддержать обитаемую планету. Звезды, намного большие Солнца, не живут достаточно долго, чтобы при стабильных условиях могла эволюционировать жизнь. Двойные звезды кажутся малопригодными для развития жизни, так как их планетарные орбиты имели бы неправильную форму, вследствие чего на планете наблюдались бы слишком резкие сезонные перемены климата. Единственными подходящими звездами являются звезды класса *G*, одиночные звезды типа Солнца. Из 200 миллиардов сияющих звезд Га-

лактики только порядка 8 миллиардов удовлетворяют этим критериям. Обратите внимание, что я не рассматриваю возможное существование жизни в других галактиках. Межгалактическая связь была бы, в лучшем случае, сложной, поскольку другие галактики находятся в миллионах световых лет от нас. Энергетические требования к межгалактическому сообщению были бы огромными, а временная задержка между их «Привет!» и нашим «Как поживаете?», равная миллионам лет, была бы слишком далека от благоприятствующей продуктивной беседе. Быть может, придет время, когда очень развитое и давно существующее общество начнет искать сообщения из других галактик. Для нас же пока достаточно просто слушать мудрые слова, исходящие от миллиона наших ближайших соседей в нашем собственном Млечном Пути.

Солнце без планет — это все равно что день без солнечного света. Насколько вероятно то, что звезда типа Солнца может быть окружена системой планет? Системой, в которую входит хотя бы одна планета, достаточно похожая на Землю, чтобы позволить накопление и удержание жидкой воды и развитие жизни? Астрономы пока не в состоянии ответить на этот вопрос окончательно и определенно. Они пока не могут обнаружить существование планет, обращающихся по орбите вокруг далекой звезды. Но при этом большинство из них верят, что образование планет — обычное явление. Совсем недавно это мнение получило значительную поддержку, благодаря появлению экспериментально полученного свидетельства. IRAS[1] — это акроним, обозначающий инфракрасный астрономический спутник, — устройство, которое запустили на орбиту в январе 1983 года и которое идеально функционировало в течение 10 месяцев, пока не израсходовало свой запас хладагента. Это был совместный проект Соединенных Штатов, Нидерландов и Великобритании. IRAS состоит из двадцатитрехдюймового инфракрасного телескопа, размещенного на орбите в 560 милях над Землей. Инфракрасное излучение характеризуется волнами, более длинными, чем волны видимого света и более короткими, чем микроволны, обыкновенно находящимися в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-4} см. За исключением узких окошечек, инфракрасный свет не способен проникнуть через атмосферу Земли, поэтому наземная инфракрасная астрономия сложна и ограниченна. Данные, переданные с IRAS на Землю, все еще тщательно исследуются, но предварительные результаты просто экстраординарны. Например, эти данные уже расширили каталог известных источников инфракрасного излучения в космосе от нескольких тысяч до четверти миллиона. Этот спутник обнаружил существование любопытного нового класса галактик, создающих больше тепла, чем света. Один из его

[1]Infrared Astronomic Satellite. — *Прим. пер.*

представителей, известный как Arp 220 и расположенный в трехстах миллионах световых лет от нас, испускает 99 процентов своей энергии в виде инфракрасного излучения. Ученые считают, что эти своеобразные и неожиданные объекты являются результатом столкновений галактик, столкновений, приводящих к подлинному «демографическому взрыву» новых звезд.

Вероятно, самым замечательным открытием IRAS является наблюдение гигантских оболочек, или дисков, макрочастиц материи, окружающих две молодые звезды, Вегу и Фомальгаут. Именно из такого облака материи примерно пять миллиардов лет назад в нашей Солнечной системе образовались планеты. Со времени сообщения IRAS циркуляция похожих протопланетных дисков наблюдалась вокруг полудюжины других звезд. К сожалению, инфракрасные наблюдения могут выявить огромные облака маленьких частиц, но не планеты, в которые эти облака должны превратиться через несколько миллионов лет. Данные говорят о том, что протопланетные диски представляют собой обычное, быть может, даже универсальное, сопровождение образования звезды. Вполне разумно допустить, что эти облака сгущаются и срастаются, образуя планеты. Ученые согласны заключить пари, что из восьми миллиардов подходящих звезд в Галактике, большинство окружены планетами.

Но далеко не каждая планета является подходящей. Из девяти планет Солнечной системы всего одна является убедительно живой. Зарождение и эволюция жизни на планете требуют разумной степени непрерывности и временного периода в миллиарды лет. Некоторые ученые утверждают, что, находись Земля всего на 5 процентов ближе к Солнцу, она подверглась бы быстрому и неудержимому усилению парникового эффекта в возрасте миллиарда лет, задолго до того момента, когда вообще могла бы развиться жизнь. Точно также, будь Земля расположена чуть дальше от Солнца, быстрое оледенение произошло бы сразу, как только атмосфера обогатилась бы кислородом. Планете здорово повезло, что она избежала судьбы наших ближайших соседей Венеры и Марса: одна из которых слишком горячая, а другой — слишком холодный. Ученые подсчитали, что всего пять процентов подходящих солнц имеют планеты, которые, подобно Земле, идеально подходят для возникновения жизни. Итак, мы снизили возможное количество пригодных для жизни планет вне нашей Солнечной системы, но в пределах нашей Галактики всего лишь до 400 миллионов. Кстати, этот вывод удивительным образом согласуется с выводами некоего Томаса Райта, на открытиях которого Иммануил Кант основал свою теорию «островов Вселенной». В 1750 году Райт (на основании не слишком убедительного свидетельства) объявил о существовании в пределах Млечного пути 170 миллионов пригодных для жизни планет.

Пригодная для жизни планета еще не значит обитаемая планета. Каковы шансы на то, что подходящая планета подходящего солнца взрастит на себе жизнь? Это вопрос, на который мы в действительности не можем ответить. Нам известна всего одна пригодная для жизни планета, и на ней действительно существует жизнь. Тем не менее, это нельзя назвать аргументом в пользу того, что на всех пригодных планетах существует жизнь, так как если бы Земля не захотела взрастить на себе жизнь, то нас здесь не было бы.

Что же такое жизнь, как знаем ее мы? Она основана на самовоспроизводящейся ДНК — закрученной, сложной, органической молекуле, — квинтэссенции всех форм жизни на Земле. Могла ли подобная структура возникнуть на юной Земле самопроизвольно?

Когда Земля впервые сгустилась из диска ледяных частичек и каменных зерен, оставшихся после создания Солнца, она была пуста: ни атмосферы, ни океанов, ни гор, ни континентов. Это был невыразительный шар: снаружи, главным образом, каменистый, а внутри — железный. В пределах каменистой части в крошечном количестве — несколько частей на миллион — присутствовали природные радиоактивные элементы: торий и уран. Эти атомы подвержены процессу самопроизвольного распада, при котором они превращаются в свинец с «периодами полураспада», равными четырнадцати и четырем миллиардам лет соответственно. («Период полураспада» радиоактивного материала — это период времени, за который половина его радиоактивных атомов подвергается распаду.) В процессе распада высвобождается тепло. В настоящее время общее количество тепла, генерированного естественными источниками радиоактивности в земной коре, приблизительно равно 3×10^{13} ватт (30 тераватт), что в сто раз превышает электрическую энергию, выработанную во всем мире. Когда Земля была моложе, эта величина была еще больше. Без радиоактивности на Земле не могло возникнуть жизни.

Кстати, естественная радиоактивность сыграла ключевую роль при оценке возраста Земли и Солнечной системы. Атомы урана при распаде превращаются в определенный изотоп свинца, ^{206}Pb, тогда как другие изотопы свинца типа ^{204}Pb не являются детьми радиоактивных атомов. Таким образом, отношение количества атомов ^{206}Pb к количеству атомов ^{204}Pb в данном образце руды зависит от содержания в ней урана и от ее возраста, или того времени, в течение которого уран распадался, превращаясь в свинец. Точные измерения этого отношения проводились при использовании различных каменных пород. На Земле были обнаружены камни, возраст которых насчитывает до 3,8 миллиардов лет. Ученые полагают, что возраст Земли больше этого, но во время первой турбулентной фазы ее существования камни просто не образовались или не выжили. Как ни странно, первые ископаемые признаки

жизни на Земле восходят именно к этим первым камням. Однако при измерении образцов лунного грунта обнаружилось, что им 4,2 миллиарда лет, а возраст некоторых метеоритов установлен как 4,6 миллиарда лет. Поскольку считается, что вся Солнечная система образовалась одновременно за временной промежуток, приблизительно равный миллиону лет, значит, возраст Земли должен составлять порядка 4,6 миллиарда лет, плюс-минус сто миллионов лет или около того.

Интенсивный нагрев внутренней области Земли в результате радиоактивного распада привел к неустойчивости. Радиоактивное тепло, оказавшееся заточенным внутри Земли из-за ее низкой проводимости, привело к плавлению, к химическим преобразованиям и к возникновению огромных давлений. Все произошло так, словно в Земле развился критический вид прыща. Яды и давления изгонялись из недр Земли в виде папул, возникающих на ее поверхности: это была Эпоха Вулканов.

Вулканическая деятельность считается началом возникновения первичной атмосферы Земли. Эта атмосфера очень сильно отличалась от современной, так как она состояла из вулканических газов, в которых полностью отсутствовал кислород, столь важный для жизни. Ее составляющими были азот, углекислый газ, водород, водяной пар, аргон и немного сернистого газа, чтобы атмосфера более убедительно напоминала ад. Повсюду вулканы, непрерывные ливни и грозы и смертоносная атмосфера: не слишком обещающее начало. На самом деле, все было еще хуже. Поскольку отсутствовал кислород, не было и озонового слоя, а следовательно никакой защиты от разрушительных ультрафиолетовых солнечных лучей. Тогда Земля не была благоприятным местом ни для птиц, ни для жучков, ни для людей.

Из той вулканической атмосферы Земли сегодня остались только аргон и немного азота. Аргон является ключом к ранней атмосфере: на Солнце, да и во всем космосе, в изобилии присутствует не изотоп аргона, а изотоп, возникший при радиоактивном распаде естественно возникшего изотопа калия. Очевидно, что он был создан при вулканическом извержении газа из земной коры, а не мог там присутствовать с самого начала.

Появились облака водяного пара, подобно тому, как они образуются сегодня, и в течение миллионов лет лил дождь. Воды собирались в долинах вокруг вновь образовавшихся вулканов. Так на Земле возникли моря и горя. Тем временем, ультрафиолетовое излучение Солнца творило свои чудеса с атмосферой Земли, создавая простые основные газы, вроде метана и аммиака, ставшие предшественниками более комплексных органических соединений, которые, в свою очередь, предшествовали жизни.

Следующий этап эволюции Земли можно экспериментально пронаблюдать в лаборатории. В 1953 году Гарольд Юри и Стэнли Миллер, работавшие в Чикагском университете, изготовили газовую смесь, напоминающую первоначальную атмосферу Земли, — смесь водорода, аммиака, метана и водяного пара. В полученном газе, кроме того, создавались электрические разряды, чтобы стимулировать эффекты ультрафиолетового излучения. Ученые наблюдали обильное образование аминокислот, органических химических соединений, которые являются универсальными составляющими белков, являющихся химическим строительным материалом для всех форм жизни. При экстраполяции от одной лаборатории до всей Земли в целом получается, что реакции Миллера – Юри создавали бы порядка тонны органического материала в секунду на поверхности первозданной Земли, причем весь этот материал накапливался бы и консервировался в океанах. Всего за 200 миллионов лет океан превратился бы в жидкий, но питательный бульон, содержащий эквивалент одного бульонного кубика сложного органического материала на один галлон жидкости.

Следующие этапы эволюции жизни далеко не ясны. В океане или в более защищенной среде мелких приливных бассейнов простые органические молекулы полимеризировали в более крупные и сложные структуры, а в конечном счете, — в самовоспроизводящиеся системы. Нам не известно, как именно это произошло. Мы знаем лишь, что к тому времени, когда Земле исполнилось 800 миллионов лет, океаны кишели примитивными формами жизни: водорослями и бактериями, не сильно отличавшимися от тех, что выжили сегодня. Самые старые камни, найденные на Земле, сохранили следы ранней жизни, которая существовала уже 3,8 миллиарда лет назад.

Метаболизм примитивной жизни зависел, как и сегодня, от готового источника энергии. Фотосинтез развивался как эффективный процесс использования солнечной энергии. Углекислый газ атмосферы превратился в ядовитый побочный продукт, наполнявший по-прежнему стерильную атмосферу: кислород. Сначала кислород вступал в реакцию с аммиаком и метаном, пока, около двух миллионов лет назад, атмосфера не очистилась от этих неприятных газов. Они отлично послужили своей цели, поэтому нужда в них отпала. Благодаря микробам, положившим начало всему живому, Земля медленно и планомерно готовилась к своим возможным жильцам.

Сначала темп эволюции живых существ был очень медленным. Размножение происходило чрезвычайно просто, бесполым образом: обычным делением клеток. При делении количество клеток увеличивается. Случайные мутации, вызванные космическими лучами или химическими ошибками, привели к новым видам, но такие случайности были редкими

и гораздо чаще заканчивались вымиранием вида, нежели его развитием в новый. Затем, около полутора миллиардов лет, назад обнаружился пол. Новые поколения перестали быть всего лишь клонами своих предков; они получали определенную долю генетической совокупности двух отдельных особей. Темп эволюции увеличился, вследствие чего развились сложные многоклеточные организмы. По мере увеличения содержания кислорода в атмосфере и таяния древних ледников на Земле появились ужасные твари. Вскоре после этого, всего через 300 миллионов лет, на Земле развилось человечество, ставшее господствующим видом. По истечении нескольких тысяч лет своего развития, бесчисленных войн, голода и редких мгновений вдохновения наша цивилизация, наконец, пришла к тому, чтобы исследовать небосвод, пытаясь найти, не попал ли куда-нибудь кто-то или что-то еще раньше нас.

Какова вероятность того, что в 400 миллионах пригодных для жизни миров Млечного пути свершилось чудо жизни? Какова вероятность того, что жизнь породила разум, что где-то еще появились высокоразвитые технологические общества и что сейчас они активно ищут способ связаться с нами? Это очень сложные вопросы. Даже на подходящей планете пригодной звезды существует множество препятствий для самопроизвольного возникновения жизни. Вулканы, появившиеся из-за радиоактивного нагрева земной коры, сыграли важную роль при ее дегазации, вследствие которой возникла первая атмосфера Земли. Присутствие в разных частях Галактики урана и тория весьма различно, так как эти элементы образуются исключительно при взрывах сверхновых звезд. Образовывались ли другие солнечные системы достаточно близко к древней сверхновой, чтобы они тоже могли стать достаточно радиоактивными для возможного возникновения жизни? Некоторые ученые утверждают, что приливные бассейны были яслями примитивной жизни. Приливы зависят от Луны. Ни одна другая планета Солнечной системы не имеет столь прекрасной и столь влиятельной луны, как наша. Должны ли другие пригодные для жизни планеты иметь большие и близко расположенные спутники, чтобы на этих планетах возникла жизнь? Являются ли материки универсальной особенностью пригодных для жизни планет или разумные существа могут развиться и в море? Каким образом морское создание, каким бы умным оно ни было, могло обнаружить звезды и из простого интереса вступить на длинный путь научного открытия? Вопросы, вопросы, вопросы. Давайте последуем примеру множества моих выдающихся коллег и скажем, что 10 процентов пригодных планет подходящих солнц рождают жизнь. Далее, допустим, что жизнь неизбежно развивается до уровня появления разума, творческих способностей, любопытства и цивилизации, по крайней мере, столь же великой, как наша. Даже при такой оценке мы по-прежнему насчиты-

ваем порядка 40 миллионов обитаемых планет в Галактике, на каждой из которых эволюционировала жизнь и развилось разумное общество. Но в течение какого времени выживет цивилизованное общество? Чтобы какой-то далекий народ смог связаться с неопытными земными малька-ми, этот народ должен быть терпеливым и давно существующим. Люди ходили по Земле в течение миллиона лет, но мы только теперь убеди-ли сенатора Проксмира[1], что поиск внеземного разума – это разумное и серьезное научное предприятие. Воображаемая нами внеземная цивилизация, прежде чем ей удастся связаться с нами, должна решить свои собственные социальные и экономические проблемы настолько хорошо, чтобы ее высокоразвитая и активная технология смогла выжить в течение миллиона лет. Возможно ли это вообще? Чтобы ответить на этот вопрос, посмотрим на наше общество.

Записанная история человечества насчитывает всего несколько десятков тысяч лет. Однако мы только начали искать сообщения из окружающего нас космического пространства. Римская и Британская империи просуществовали всего несколько сотен лет. Обещанное тысячелетие Третьего Рейха не протянуло и десяти лет. Сколько же лет отведено современному обществу с высокоразвитой технологией? Для неопределенно долгого существования нашего вида есть несколько источников явной угрозы. Некоторые из этих источников, которые в настоящий момент являются очагами внимания (а иногда пагубной небрежности) политиков, представляют собой краткосрочные проблемы, созданные вследствие недальновидности нашего собственного вида.

Ядерная катастрофа

Всего лишь в течение нескольких последних десятилетий человеческое общество обладает способностью самоуничтожения: если не абсолютно полного, то достаточно значительного. Ядерного оружия сверхдержав достаточно, чтобы наградить каждого благословенного человека эквивалентом 10 тонн тротила. Тем не менее, обе стороны продолжают неистовую гонку вооружений, и лишь совсем недавно появились признаки некоторого ослабления напряжения. Их SS20 нужно скомпенсировать европейскими «Першингами», а наши MX нужно просто куда-то поместить. В Восточную Германию введено тридцать тысяч танков, демон-

[1]Бывший американский сенатор Уильям Проксмир изобрел и ежегодно вручал то, что он назвал «Наградой Золотого Руна», за особенно бесполезное или экстравагантное использование денег налогоплательщиков. Например, в 1975 году эту награду присудили Американскому Национальному научному фонду за то, что этим фондом было потрачено 84 000 долларов на проект, определяющий, почему люди влюбляются. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

стрирующих миролюбивый настрой Советского правительства. Странные и неприятные события, происходящие в Афганистане и Сальвадоре, не убеждают нас в том, что руководители сверхдержав посвятили себя миру во всем мире, сохранению безопасности и процветанию. Бóльшая часть происходящего в других точках Земли тоже не внушает особой надежды на лучшее: бесконечная и непонятная война между Ираком и Ираном, репрессии в Южной Африке, коррупция в Заире, экономические катастрофы в Южной Америке и Польше. Мир действительно становится опасным местом, а оружие существует для того, чтобы уничтожить всех нас. Причем его становится все больше и больше. Однако при этом Советское и Американское правительства, спорящие уже 40 лет, успешно избегали прямого военного противостояния, не говоря уже о полномасштабной войне. Они придерживаются ими же подписанных договоров о сокращении ядерных испытаний, запрещении ядерного оружия в космическом пространстве и контроле разработок противоракетного оружия. Быть может, однажды им удастся сократить или вовсе уничтожить свои запасы ядерного оружия. Дай Бог, чтобы это случилось как можно раньше.

Загрязнение и эрозия

Наши родственники-бактерии трудились в течение миллиарда лет, чтобы обеспечить нас чистым воздухом и ясным голубым небом. Жители Мехико и Лос-Анджелеса знают наиболее эффективный способ уничтожения их великого дела. К счастью, проблему смога можно как контролировать, так и ограничивать. С этим отлично справятся контрольные устройства выброса вредных веществ в атмосферу, а также более эффективные автомобильные двигатели. Более того, скорее всего, уже через один-два века у нас начнут заканчиваться запасы нефти, и автомобили в том виде, в каком они известны нам сейчас, очень скоро вымрут. Уголь представляет более серьезную проблему. Мы, в своей стране (в отличие от Франции, Тайвани и некоторых других стран), отказались использовать ядерную энергию для получения электричества. Вина за это неудачное решение лежит на некомпетентности промышленности, бестактности правительства и неправильном представлении этой проблемы общественностью. Как бы то ни было, мы, видимо, будем продолжать зависеть от угля в течение десятков, если не сотен лет. (Наших запасов угля действительно хватит на несколько веков, если мы захотим ради разработки новых угольных карьеров пожертвовать несколькими прекрасными штатами с небольшим количеством населения.) Горение угля, если только оно не происходит в чрезвычайно дорогостоящих условиях,

стоимость которых налагает табу на их использование, создает кислотные дожди. Кислотный дождь, который, вероятно, не особенно опасен для человека, губителен для деревьев. В настоящее время умирает Черный Лес в Германии, а также многие роскошные альпийские леса Швейцарии. Деревья еще живы, но на них видны признаки необратимых повреждений. В пору появления листьев леса Новой Англии по-прежнему великолепны, но сколько еще продлится это великолепие? Быть может, нам действительно не нужны леса; некоторые правительственные чиновники вообще смотрят на них как на бумагоделательные фабрики, а кому нужна бумага в век компьютерных дискет? Но если Мэн потеряет свои леса из-за кислотных дождей, то сколько времени пройдет, прежде чем Айова потеряет свою пшеницу, а наши российские покупатели будут вынуждены вернуться к потреблению капусты и пастернака? А вы, гурманы, ни на минуту не верьте, что канадский рис Миннесоты обладает иммунитетом к загрязнению воздуха и воды.

Рука об руку с загрязнением шествует эрозия. Уничтожьте деревья, и почва под ними будет безвозвратно потеряна. Сицилия, которая когда-то была главным зерновым районом Римской империи, превратилась в мелкого производителя оливок и винограда из-за нескольких поколений кораблестроителей, вырубивших все ее леса. Некоторые арабские общества, считающие неплодородные деревья бесполезными и грешными, успешно уничтожили большую часть когда-то плодородного Среднего Востока, превратив ее в пустыню. Этот процесс продолжается и по сей день в части Африке ниже Сахары, в большей части Китая и на плодородных равнинах Америки. Чистый воздух, чистая вода и хорошая почва — необходимые составляющие эффективного сельского хозяйства. Если не будет их, то никакие синтетические удобрения нас не спасут. Как все это будет выглядеть через тысячу или через миллион лет? Готовы ли мы остаться на Земле, пока она поддерживает нас, или мы очень скоро сделаем всю нашу планету непригодной для жизни человека?

Размножение

Размножение, в результате которого появляются не птички и пчелки, а человеческие дети. При современном темпе роста население мира удваивается каждые 40 лет или около того (рис. 1). Это относительно новая тенденция, которая возникла два или три столетия назад. В 1798 году Томас Роберт Мальтус, наблюдая эту тенденцию, заключил, что скорость роста населения обязательно превысит скорость роста производства, вследствие чего бедность станет неизбежной судьбой человечества. По большому счету, несмотря на чудо зеленой революции и модернизации мирового сельского хозяйства, Мальтус оказался прав.

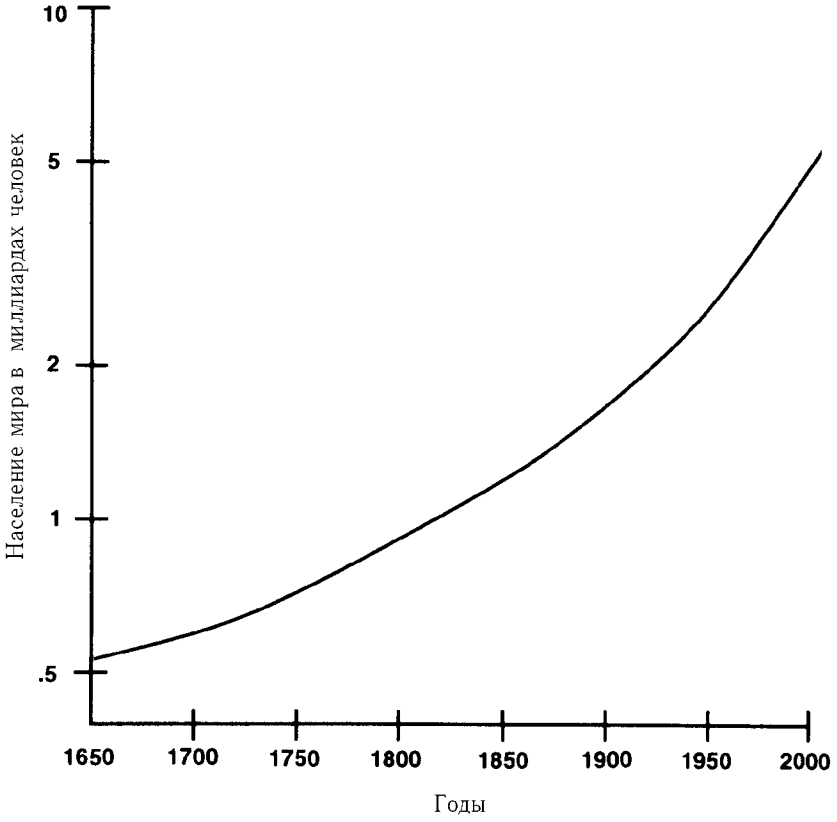


Рис. 1. Рост населения мира с 1650 г. Скорость роста превышает экспонециальную.

Сегодня, видимо, можно утверждать, что три четверти населения мира голодают в течение трех четвертей времени. Ясно, что кривая роста населения не может продолжать увеличиваться в том же темпе в течение более чем одного века. Так или иначе, она выровняется. Я сомневаюсь, что каких-то достижений в сельском хозяйстве будет достаточно, чтобы накормить население в 25 миллиардов (в 2100 г. н. э.) или более чем в 100 миллиардов (в 2200 г. н. э.) человек. Что-то должно произойти. Одна из возможностей стабилизации роста населения мира состоит в контроле над рождаемостью. Этот контроль роста населения можно

установить с помощью сурового закона (как в Китае), с помощью стерилизации, воздержания, контрацептивов, пилюль, абортов, убийства новорожденных или сексуальных предпочтений. Каждая процедура имеет как своих сторонников, так и ярых противников. Второй, laissez faire[1], сценарий состоит в том, чтобы позволить Природе следовать своим путем. По мере того как население мира начнет превышать предел, установленный природой, рост смертности будет компенсировать высокую рождаемость. Голод, нищета и короткая тяжелая жизнь станут судьбой обычного человека: вряд ли в подобной ситуации сохранится цивилизованное общество. Контроль роста населения кажется абсолютно необходимым условием возникновения действительно долго живущего общества. Неразумные динозавры благоденствовали на Земле в течение 300 миллионов лет. Если Homo sapiens[2] намерен выиграть это пари на долговечность, то мужчинам и женщинам нужно научиться получше контролировать функции своего тела.

Истощение природных ресурсов

Бóльшая часть энергии, необходимой обществу, зависит от ископаемого топлива. Уголь, нефть и природный газ существуют в ограниченных количествах. При современной скорости потребления ископаемого наследия уже через несколько веков от него ничего не останется. Правда, скорее всего, мы разработаем альтернативные стратегии получения энергии: использование безопасного ядерного синтеза и солнечной энергии, а также сокращение потребления энергии на душу населения. Однако нефть является уникальным и незаменимым источником великого множества химических продуктов, играющих важную роль в промышленности. Проматывая свои запасы нефти только ради энергии, которую она может дать, мы совершаем ужасное преступление, которое отзовется в будущих поколениях. Технологическое общество без нефтехимической промышленности возможно, но гораздо более сложно, чем в ее присутствии. Подобная ситуация сложилась и вокруг природного газа. Природный газ, состоящий из смеси достаточно сложных химических газов, не представляет особой важности для химической промышленности. Он сгорает, не образуя вредных веществ, поэтому, в принципе, его можно сжигать и сейчас, чтобы удовлетворить современным энергетическим требованиям. Однако природа позаботилась и об этом: природный газ — наш единственный природный источник гелиевого газа. Нет никаких сомнений в том, что в будущем веке гелий станет неотъемлемой

[1]Позвольте сделать (фр.) — *Прим. пер.*

[2]Человек разумный (лат.) — *Прим. пер.*

составляющей нашей технологии. Он представляет идеальный и незаменимый хладагент для сверхпроводящих устройств эффективной передачи и хранения энергии. Более того, ^{3}He, редкий изотоп гелия, скорее всего, станет источником топлива первых генераторов электроэнергии, основанных на ядерном синтезе. Мудрое общество экстрагировало бы ценный гелий из природного газа (достаточно дешевая процедура) и помещало бы его обратно в землю для будущих нужд. Фактически же гелия экстрагируют ровно столько, сколько необходимо для продажи: главным образом, для детских надувных шаров и двух сохранившихся рантовых дирижаблей. Огромная часть нашего гелия, который очень скоро может стать жизненно необходимым для разрешения *истинного* энергетического кризиса, просто-напросто уходит в атмосферу, где исчезает навечно. Нефть и гелий — это лишь два примера невозобновимых ресурсов, которые сейчас расходуются беспечно и впустую. Существует еще несколько довольно скудных ресурсов (вроде хрома), которых в не слишком далеком будущем, несомненно, останется совсем немного. Если только мы не изменим свое отношение ко всем этим проблемам, то заработаем заслуженное проклятие своих потомков.

Может показаться невероятным, что человечество выживет под угрозой этих катастроф: ядерная война, загрязнение атмосферы и эрозия почвы, демографический взрыв и истощение ресурсов. Согласно современным оценкам мы, в лучшем случае, можем надеяться еще на век будущего прогресса, но не на тысячелетие, не на миллион и не на миллиард лет. По истечении этого времени та или другая проблема выйдет из под нашего контроля, и мы начнем медленно деградировать, превращаясь в нечто меньшее, чем многообещающая человеческая цивилизация. Каждое последующее поколение может ожидать несколько более сложная, бедная и короткая жизнь. Родители будут описывать своему неверящему отпрыску утраченные чудеса света, вроде телевидения, стиральных машин и сухих завтраков, которые они знали, когда были детьми. Может начаться век движения вниз. Возможно, он уже начался. Единственное, на что способна цивилизация скорее умная, чем мудрая; более плодовитая телом, нежели разумом; более озабоченная поисками счастья, чем исполнением обещаний, — это прийти в упадок.

Но, быть может, нам удастся избежать своей, на первый взгляд, неизбежной судьбы. Средние века сменились эпохой Возрождения. Многие наши граждане начинают осознавать хрупкость окружающей нас среды и работают с тем, что их беспокоит. Все эти проблемы создали люди. Чудеса возможны и в сфере деятельности человека. Что касается наших гипотетических инопланетян, давайте представим, что они преодолеют свои социальные препятствия и создадут стабильные, давно живущие и любознательные общества.

Я допущу, наугад, что среднее время выживания инопланетного общества равно пяти миллионам лет: это маленький период по сравнению с пребыванием на Земле динозавров и большой период по сравнению со временем жизни приматов. Время выживания, равное пяти миллионам лет, предполагает, что цивилизация может справиться как с природной катастрофой, так и с ненамеренным самоубийством всего народа. К примеру, на Землю ледниковый период вернется где-то через 20 000 лет. Бóльшая часть Соединенных Штатов и Европы будет похоронена под слоем льда толщиной в сотни футов. Не слишком серьезная проблема для действительно высокоразвитого общества: мы просто переберемся на юг. Гораздо более серьезное событие произойдет через 13 миллионов лет от настоящего момента. Судя по всему, каждые 26 миллионов лет или около того Земля подвергается опустошающему обстрелу кометами. Два последних были достаточно мягкими, но обстрел, имевший место в $6,5 \times 10^7$ г. до н. э., привел к сценарию, напоминающему ядерную зиму, когда в течение нескольких лет не было видно Солнца. Именно тогда вымерли динозавры. Сейчас невозможно определить, сумеет ли человечество выжить в подобной обстановке, но у нас достаточно времени, чтобы подготовиться к этому.

Давайте обобщим свои соображения по поводу внеземного разума. В Млечном пути существует 200 миллиардов звезд; из них 8 миллиардов очень похожи на наше Солнце. Скорее всего, все они, или почти все, имеют свои планеты. Четыреста миллионов этих солнечных систем включают в себя планеты, похожие на нашу Землю, а на 40 миллионах из этих планет появилась жизнь, которая эволюционировала и превратилась в высокоразвитую технологическую цивилизацию. Однако, по оценкам, время жизни высокоразвитого общества составляет всего пять миллионов лет — одну тысячную долю времени жизни звезды. Далекое от нас общество может жить и преуспевать настолько, чтобы послать нам телеграмму, и, по нашим оценкам, сейчас в нашей галактике может существовать всего 40 000 таких обществ. Принимая во внимание плотность звезд неподалеку от Солнца, мы заключаем, что в пределах одной тысячи световых лет от Земли может существовать лишь *несколько* выживших внеземных цивилизаций. Возможно, они общаются друг с другом. Возможно, они пытаются установить связь и с нами. Что мы должны сделать, чтобы начать беседу с внеземной цивилизацией?

Вопрос о личных визитах, как мы уже видели, не стоит. В принципе, мы могли бы передавать сообщения на другие звезды с помощью радиоизлучения. Однако в пределах тысячи световых лет от Земли существует 40 000 звезд, похожих на Солнце, и направить антенну на каждую из них было бы невероятно дорого на современном этапе развития технологии, созданной людьми. Мы создали технологическое общество

совсем недавно, а они живут в подобном обществе сотни тысячелетий. Мы для них как дети, а ребенок должен слушать, а не говорить.

Первый современный и серьезный научный подход к поиску межзвездных сообщений осуществили в 1959 году Джузеппе Коккони и Филип Моррисон. По их словам: «... Значит отсюда следует, что неподалеку от какой-то звезды, во многом похожей на наше Солнце, существуют цивилизации, обладающие научными интересами и техническими возможностями, гораздо большими, чем те, которые доступны сейчас нам. Членам этого общества наше Солнце должно казаться вероятным местом эволюции нового общества. В высшей степени вероятно, что в течение долгого времени они ожидали развития науки вблизи Солнца. Мы допустим, что уже очень давно они создали канал связи, о котором мы однажды узнаем, и что они терпеливо ждут ответных сигналов от Солнца, которые известят их о том, что в сообщество разума вступило новое общество. Каким же был бы этот канал?»

Почти несомненно, что единственным практически осуществимым методом межзвездного сообщения будет передача электромагнитных волн. Поскольку высокоразвитый инопланетянин пытается связаться с недавно развившимся (развивающимся) обществом, он, вероятно, попытается сделать прием своего сигнала максимально простым. Он выберет радиовещательный канал, который проходит через атмосферу Земли и может быть принят радиослушателями на Земле. Инопланетный сигнал должен находиться в пределах одного из двух электромагнитных окон атмосферы: это должен быть видимый свет или радиоволны. Вариант с видимым светом, судя по всему, не годится. Чтобы послать распознаваемый световой сигнал на расстояние десятков световых лет, необходимо располагать огромной энергией, и, кроме того, нам было бы невероятно сложно выделить этот сигнал среди огромного количества фонового света, исходящего от инопланетного солнца. Таким образом, связь будет устанавливаться с помощью радиосигналов, длина волны которых лежит в пределах имеющегося в атмосфере окна: от одного сантиметра до тридцати метров.

В 1967 году некоторые ученые полагали, что обнаружили межзвездный радиомаяк инопланетного общества, пытающегося связаться с нами. Жокелин Белл Бернелл, которая в то время была аспиранткой в Кембриджском университете, наблюдала очень быструю и правильную серию импульсов, исходящих из точечного источника, расположенного за пределами Солнечной системы. Импульсы поступали через равные промежутки времени, равные точно 1,3373011 секунды. В течение какого-то времени этот источник называли LGM[1], Маленький Зеленый Человечек

[1]Little Green Man.

(Мужчина), ибо кто кроме инопланетного общества способен создать столь точные часы? (Почему его назвали Маленьким Зеленым Человечком (Мужчиной), а не Большой Сиреневой Дамой остается тайной женоненавистников.) Однако очень скоро Бернелл обнаружила другие LGM в других точках неба; их импульсы поступали через 0,253065, 1,187911 и 1,2737635 секунд. Стало ясно, что это совсем не Маленькие Зеленые Человечки, а всего лишь новый класс естественных астрономических объектов. Сейчас мы знаем их как пульсары и полагаем, что они состоят из быстро вращающихся нейтронных звезд, остатков недавно вспыхнувшей сверхновой. Для поисков внеземного разума это была всего лишь ложная тревога.

На какую длину волны нам следует настроить свои радиоприемники, чтобы обнаружить сообщение от звезд? Эдуард Перселл, мой коллега в Гарварде и лауреат Нобелевской премии по физике, очень хорошо ставит вопрос:

Если вы хотите передать кому-либо сообщение и никак не можете договориться о частоте, это почти безнадежно. Чтобы проверить весь спектр радиочастот в поисках слабого сигнала, необходимо затратить огромное (но вычислимое) время. Это все равно, что пытаться встретить кого-то в Нью-Йорке, не имея возможности предварительно связаться с этим человеком и договориться о месте встречи. Однако вам известно, что вы хотите встретить его, а он — вас. В Нью-Йорке лишь два или три главных места, и среди них — Большой Центральный Вокзал. В данном же случае существует всего один Большой Центральный Вокзал, а именно: линия с частотой в 1420 мегагерц, которая с коэффициентом, равным, по крайней мере, тысяче или немного больше, является наиболее заметной радиочастотой во всей галактике. Не возникает вопроса, куда передать сообщение, если вы хотите, чтобы вас услышал кто-либо, так как в этом случае вы выбираете известную ему частоту. И наоборот, он выберет частоту, которую, как ему известно, знаем мы, поэтому именно на эту частоту нужно настраивать свои приемники. Если вы будете аккуратно играть в эту игру, то найдете эти выводы неизбежными. Мы знаем, что делать; мы знаем, где слушать.

Что же это за излучение с частотой 1420 мегагерц (или длиной волны 21 см), о котором говорит Перселл? Это частота, однозначно характеризующая атом водорода. Путем очень грубого упрощения мы можем рассматривать атом водорода как планетарную систему, в которой один электрон обращается вокруг центрального протона. Каждая составляющая частица вращается подобно волчку и воздействует на другую

частицу. В результате этого два спина оказываются в состоянии прецессии, вращаясь друг вокруг друга со скоростью 1 420 405 751,768 оборотов в секунду, или с частотой, примерно равной 1 420 мегагерц. Обратите внимание, что это число известно со смехотворной точностью 13 разрядов. Известная под названием *сверхтонкой частоты водорода*, эта величина является одной из наиболее точно измеренных в физике. Ее измеренное значение полностью совпадает с ее значением, вычисленным из основной теории. Это одна из причин того, почему современный физик торжественно и оправданно верит в то, что понимает структуру атома.

Поскольку собственная частота колебаний атома водорода равна 1 420 мегагерц, оказывается, что атомы водорода в пространстве должны испускать электромагнитное излучение именно на этой частоте. Поскольку водород пока является самым распространенным элементом космического пространства, не удивительно, что его характеристическое 21-сантиметровое электромагнитное излучение является уникальной особенностью, преобладающей во всей радиоастрономии. Тот факт, что 21-сантиметровую линию радиоизлучения из космического пространства можно обнаружить с помощью радиоастрономии, отметил Х. С. Ван де Хальст в Голландии в 1944 году. Впервые линию с длиной волны в 21 см наблюдал не кто иной, как профессор Эдуард Перселл, работая в Гарварде со своим аспирантом Гарольдом Эвеном, в 1951 году. Это положило начало важной дисциплине *спектральной радиоастрономии*. Несмотря на париетальный интерес Перселла к 21-сантиметровому излучению, его убеждение в том, что оно (или одно из небольшого количества соседних и родственных длин волн) является очевидным каналом, который может быть выбран для межзвездной связи, тем не менее, является бесспорным.

Первый серьезный поиск внеземного разума (SETI[1]) осуществил в начале шестидесятых годов Фрэнк Дрейк в ходе исследовательского эксперимента, известного под названием Проект Озма. Исследовались несколько близлежащих звезд, поэтому неудивительно, что никакого сигнала зафиксировано не было. Гораздо более амбициозные (хотя и не слишком дорогие) поиски проводятся в наше время. Например, сейчас SETI занимается мой гарвардский коллега Пол Горовиц с помощью скромного восьмидесятичетырехфутового радиотелескопа в Ок-Ридже. Каждая минута его работы развивает чувствительность, эквивалентную тысяче лет действия Проекта Озма. В конечном счете, мы сможем направить свою антенну на все подающие надежду звезды, находящиеся в пределах сотен или тысяч световых лет от Земли. Если маяк существует, то рано или поздно мы его найдем.

[1]Search for Extraterrestrial Intelligence. — *Прим. пер.*

Никто не спорит, что SETI — несколько сомнительное предприятие. Невозможно заключить хоть с какой-то степенью вероятности, существует ли внеземной разум. Тем не менее, этот поиск все же необходим. Я согласен со словами Горовица: «Связь с внеземным разумным видом стала бы величайшим открытием в истории человечества, равных которому не было бы». Только подумайте о том, чему мы могли бы научиться у внеземной цивилизации, которая настолько ужилась со своей средой, что процветает уже миллион лет. Представьте ее искусство, музыку, историю или науку. Даже Альфред Адлер, безудержно рациональный критик программы SETI, вынужден заключить: «Получение сообщения из галактики было бы важным, главным образом потому, что оно заменило бы человеческие ожидания полной определенностью. Оно доказало бы человечеству, что мы не одиноки во Вселенной, чем, возможно, уменьшило бы самосознание и эгоизм людей. Это могло бы привести только к благоприятным последствиям. В этом и состоит вся выгода, которую можно ожидать». Смерть, налоги и *соседи*! Одно лишь знание того, что мы не одиноки, было бы достаточной наградой, так как тогда мы знали бы, что и мы сможем все это преодолеть.

Большая картина

Самыми основными науками являются те, которые глубже других проникают в структуру материи, в природу пространства и времени, в происхождение, эволюцию и судьбу Вселенной. Такими научными областями являются космология и физика элементарных частиц. Под различными масками эти дисциплины сопровождали нас с самого рождения человеческой цивилизации. Быть может, открытие огня стало первым шагом на пути к современной физике элементарных частиц; а наблюдение смены дня ночью и лета зимой привело к первым размышлениям космологического характера. Мы прошли длинный, длинный путь, во время которого ответили на многие глубокие вопросы.

Сегодня мы ни капли не сомневаемся в том, что наша Вселенная расширяется. Миллиарды галактик, составляющие наблюдаемую Вселенную, разбегаются подобно осколкам, образованным гигантским взрывом. Большинство удаленных галактик и таинственных квазаров удаляются от нас почти со скоростью света. Исходный взрыв, в котором родилась не только материя, но и само пространство-время, произошел очень и очень давно. Мы не можем установить день его рождения совершенно точно, но мы знаем, что это случилось примерно 15 миллиардов лет назад. Мы называем его «Большой взрыв».

Современная нам Вселенная, если ее рассматривать в целом, — чрезвычайно холодная и разреженная. Часть космического пространства размером с нашу планету содержит, в среднем, всего около одного микрограмма материи. (Безусловно, Земля далека от типичного предмета недвижимости.) Средняя температура Вселенной была впервые измерена в шестидесятых годах. Она оказалась всего на 3°С выше абсолютного нуля. (И опять Земля — особое место, где температура в сто раз выше средней температуры Вселенной.) Однако по мере расширения наша Вселенная становится еще более разреженной и холодной. Раньше она была более горячей и плотной. Когда Вселенной был всего лишь миллион лет, ее средняя температура была равна температуре поверхности Солнца. В нежном возрасте около трех минут ее средняя плотность равнялась плотности воды, а температура составляла миллиарды градусов Цельсия. В еще более раннее мгновение вы, я, наша Солнечная система и каждая часть известной Вселенной без труда уместились бы на

булавочной головке! Каким образом наша Вселенная эволюционировала с момента Большого взрыва до настоящего момента? Каким образом из первой печи появились звезды и галактики? Когда и каким образом образовались различные химические элементы? Что произойдет с нашей Вселенной в отдаленном будущем? Почему у природы именно такие законы? Почему пространство трехмерно? Какова конечная связь между гравитацией, определяющей структуру макромира, и квантовой механикой, правящей в микромире? Это лишь некоторые вопросы, с которыми работает современный космолог.

Нам известны многие тайны структуры материи. В современной теории существует ровно 17 элементарных частиц — строительных кирпичиков, образующих все известные виды материи, и переносчиков всех наблюдаемых сил, действующих между частицами. Современные «материальные частицы» можно представить в виде периодической системы — таблицы кварков и лептонов, приведенной в таблице 1.

Таблица 6. **Кварки и лептоны**

Заряд =	-1	$-1/3$	0	$+2/3$
I	Электрон	d-кварк	электронное нейтрино	u-кварк
II	Мюон	s-кварк	мюонное нейтрино	c-кварк
III	Тау	b-кварк	тау-нейтрино	t-кварк

Данная модель включает шесть разновидностей кварков и шесть разновидностей частиц, известных под названием лептонов. Эти 12 частиц разделены на колонки в соответствии с их электрическими свойствами, или, более конкретно, с их электрическим зарядом. Ряды соответствуют трем «семействам» основных материальных частиц. Первое семейство включает те составляющие, которые необходимы для создания атомов. U- и d-кварки объединяются в группы по три частицы, образуя «нуклоны». Последние, в свою очередь, являются основными составляющими каждого известного атомного ядра. Отрицательно заряженные электроны притягиваются к ядрам, образуя электрически нейтральные системы — атомы. Атомы объединяются друг с другом, образуя молекулы, а огромные скопления молекул образуют знакомые нам объекты повседневной жизни: жучков, птичек, кирпичи, бомбы, двойные звезды.

А как насчет электронных нейтрино? Играет ли какую-то роль этот последний оставшийся представитель «первого семейства»? Его роль ни в коей мере не связана с материей, уж будьте уверены. Нейтрино играют

основную роль в одной из трех разновидностей естественной радиоактивности, так называемом «бета-распаде». Именно в ходе этого процесса нейтроны и протоны могут превращаться друг в друга. В частности, это необходимый механизм превращения водорода, который присутствует в недрах каждой звезды, в более тяжелые ядра – процесс, имеющий колоссальную важность для жизни на Земле по двум причинам. Материал, из которого состоит наша планета, сформировался в недрах звезд очень и очень давно. Теплые солнечные лучи создаются в Солнце при ядерном синтезе. Если бы не было электронных нейтрино, то ничего подобного не могло бы и быть. Космическая Земля была бы твердым шаром, состоящим из замороженного водорода. Таким образом, первое семейство кварков и лептонов, во всей своей полноте, необходимо для существования мира в том виде, в каком мы его знаем.

В чем же состоит основная цель второго и третьего семейств? Судя по всему, они не играют никакой существенной роли в повседневных явлениях. Технология не нашла никакого применения ни мюону, ни *c*-кварку (очарованному кварку). Тем не менее, эти любопытные частицы *существуют*. Они создаются космическими лучами и получаются на ускорителях частиц. Именно они преобладали во Вселенной на ранней стадии ее развития. Почему же существует три семейства частиц, когда, казалось бы, хватило и одного? Эту проблему специалисты по физике частиц называют «вопросом избыточного копирования». Точного ответа на этот вопрос у нас пока нет, но есть одна подсказка.

В природе существует несколько любопытных асимметрий. Одной из них является нарушение «инвариантности относительно обращения времени», существование *даже в микромире* четко определенной стрелы времени. В повседневном мире прошлое и будущее совершенно определенно отличаются друг от друга. Люди, например, сначала рождаются, а потом умирают, и никогда не наоборот. Это мы понимаем. Это связано с тенденцией сложных систем, состоящих из большого количества частей, приходить в беспорядок в отсутствие активного вмешательства — фундаментальный принцип, известный как «второй закон термодинамики». Но атомы и элементарные частицы не являются такими сложными системами. Когда-то мы считали, что для них вообще нет никакой разницы между прошлым и будущим. Но мы ошибались. Группа экспериментаторов из Брукхейвенской национальной лаборатории обнаружила, что даже самые простые системы способны «чувствовать» стрелу времени.

Другая природная асимметрия связана с материей и антиматерией. Каждой материальной частице соответствует античастица, имеющая точно такую же массу и диаметрально противоположные электрические свойства. При нормальных условиях материя и антиматерия сосуществовать не могут. Земные объекты состоят исключительно из материи, но,

в принципе, они точно также могли бы состоять из антиматерии. Антиматерия может создаваться в крошечных количествах в лабораториях физики высоких энергий. Причем во всех лабораториях мира за все время было создано не более миллиграмма антиматерии. Вся наша Солнечная система состоит из материи. То же самое касается Млечного Пути и соседних галактик. Ученые полагают, что вся известная Вселенная состоит из материи и вряд ли содержит даже малую долю антиматерии. Почему? За что природа так несправедлива к антиматерии?

Андрей Сахаров, лауреат Нобелевской премии мира 1975 года, известен во всем мире как мужественный защитник прав человека в Советском Союзе и не только. Гораздо меньшее количество людей знает, что он также является одним из величайших ныне живущих физиков[1]. На его ранней работе по ядерному синтезу основаны современные попытки приспособить механизм солнечной печи к получению электричества на Земле. В 1967 году он увидел связь между двумя асимметриями: между материей и антиматерией и относительно обращения времени. В контексте теорий, которые тогда еще не были разработаны, он показал, как из одного может создаваться другое. В очень молодой и горячей Вселенной действие асимметрии относительно обращения времени состояло в том, чтобы превратить ее в место, где преобладает материя (а не антиматерия). Однако Сахаров не только указал путь к разгадке сложной головоломки, он одним из первых показал, насколько глубоко связаны космология и физика частиц: в данном случае, как открытие, сделанное в физике частиц, может объяснить возможную эволюцию Вселенной.

Но как все это связано с тремя семействами кварков и лептонов? Аргумент Сахарова основан на современной «теории великого объединения», согласно которой симметрию относительно обращения времени очень легко нарушить, причем, на самом деле, это вообще происходит автоматически — только если существуют, по крайней мере, три семейства основных материальных частиц. Дополнительные семейства могут оказаться не такими избыточными, какими кажутся. Без них не произошло бы естественного нарушения симметрии относительно обращения времени, вследствие чего Вселенная находилась бы в равновесии между материей и антиматерией. В такой Вселенной не было бы ни Солнца, ни Земли, ни людей, интересующихся тем, как же все это работает.

Иногда связь между физикой частиц и космологией принимает обратное направление; астрономические наблюдения накладывают некоторые ограничения на свойства микромира. Удивительный пример связан с наблюдениями присутствия во Вселенной большого количества гелия. Грубо говоря, три четвертых материи во Вселенной находится в виде во-

[1] *Примечание автора*. Сахаров умер в 1989 году.

дорода, а бóльшая часть оставшейся — в виде гелия. Другие элементы, например, те, которые составляют бóльшую часть Земли, присутствуют во Вселенной в количестве, не превышающем один процент. Бóльшая часть гелия первична, то есть была создана во время Большого взрыва. Скорость образования гелия в ранней Вселенной полностью зависит от количества различных видов существующих нейтрино. Астрофизики настаивают на том, что может существовать максимум четыре вида нейтрино.

Собирая все это воедино, мы видим, что космологические аргументы требуют существования трех или четырех семейств материальных частиц. Пока физики-экспериментаторы открыли только три таких семейства[1].

Основная структура материи содержит две логических составляющих, которые можно назвать *бытием* и *становлением*. Пока мы перечислили 12 видов материальных частиц, составляющих аспект бытия. Эти частицы должны объединяться друг с другом для образования всего, что есть во Вселенной. Они должны взаимодействовать, чтобы превратиться в более высокоорганизованные формы материи; они должны воздействовать друг на друга. Именно процессы становления и описывает их взаимодействие. В нашей современной и эффективной мифологии каждому отдельному виду взаимодействия соответствует его переносчик. Пять известных переносчиков взаимодействий сведены в таблицу 2.

Таблица 7. **Известные переносчики взаимодействий**

Гравитон	Переносчик гравитационного взаимодействия
Фотон	Переносчик электромагнитного взаимодействия
Глюон	Переносчик сильного взаимодействия
$W^{\pm}$ и Z^0	Переносчики двух разновидностей слабого взаимодействия

Две из этих частиц были совсем недавно созданы и наблюдались в лаборатории. Именно за работу, которая привела к этому великому открытию, физик Карло Руббиа и инженер Симон Ван-дер-Мер получили Нобелевскую премию по физике за 1984 год.

Выбор в качестве лауреатов Руббиа и Ван-дер-Мера не слишком удивил научное сообщество. Эти люди спроектировали, построили и пустили в эксплуатацию огромную экспериментальную установку в CERN,

[1] *Примечание автора.* Последние эксперименты, проведенные в CERN и Стэнфордском центре по линейному ускорению частиц, показывают существование именно трех семейств материальных частиц.

Европейском центре ядерных исследований. Она начала работать в 1981 году и создавала одно великое открытие за другим: сначала W-бозон, затем — Z-бозон. Что удивило *меня*, так это приглашение на церемонию вручения Нобелевской премии в декабре 1984 года. Нобелевский комитет пожелал отметить глубокую связь между премией 1984 года и премией 1979 года, которую получили Стивен Вайнберг, Абдус Салам и я.

Почему Нобелевский комитет принял столь необычное решение: пригласить прежних лауреатов премии? Абдус, Стив и я получили премию за свои различные вклады в создание объединенной теории слабых и электромагнитных взаимодействий. Основными предсказаниями этой теории были существование и свойства в то время гипотетических частиц W и Z. У некоторых возникали сомнения, а что если наша теория окажется ошибочной? Эксперименты, проведенные в CERN, представили окончательное доказательство нашей теории и оправдание получения нами премии. Предсказанные частицы существуют и обладают именно теми свойствами, которые мы предсказали.

Семидесятые годы и начало восьмидесятых стали временем переворота и перестройки в мире физики элементарных частиц — временем развития новой и мощной теоретической системы. Шестидесятые были десятилетием тайн. Тогда было обнаружено так много новых и загадочных элементарных частиц, что физики были вынуждены носить с собой буклеты, содержащие названия и свойства обитателей «зоопарка» элементарных частиц. Появились две различные философии.

Джеффри Чу, из Калифорнийского университета в Беркли, был ярым защитником «ядерной демократии» — мнения, что каждая частица вправе претендовать на то, что она является элементарной. Но демографический взрыв создал буквально сотни подобных частиц, и если бы все они были в равной степени элементарными, тогда ни одну из них вообще нельзя было бы назвать элементарной. Мюррей Гелл-Манн, из Калифорнийского технологического института, придерживался противоположной точки зрения. Он представлял, что существуют более простые вещи, из которых каким-то образом должны создаваться элементарные частицы. Свои гипотетические составляющие частицы он назвал «кварками».

Выбирать между этими двумя мнениями было сложно, так как ни одно из них не подкреплялось конкретной и реалистичной теорией.

Сегодня эта ситуация радикально изменилась. У нас есть новая и согласованная теория слабых и электромагнитных взаимодействий, которая называется, без особых ухищрений, *теорией электрослабых взаимодействий*. Многие эксперименты, проведенные за последние несколько лет, подтвердили состоятельность этой теории: открытие нейтральных токов в 1973 году, W и Z в 1983 году в Европе и открытие J/ψ-частицы

в 1974 году и нарушения закона атомной четности в 1978 году в Соединенных Штатах. Кроме того, мы располагаем мощной новой теорией, претендующей на объяснение так называемых сильных взаимодействий. Она объясняет, каким образом кварки объединяются, образуя частицы, и как объединяются эти частицы, в результате чего образуются ядра атомов. Эта теория, называемая *квантовой хромодинамикой*, вместе с теорией электрослабых взаимодействий образует то, что сейчас называют «стандартной теорией». Об этом синтезе я писал, что «он предлагает полное, правильное и согласованное объяснение всех явлений, наблюдаемых в области элементарных частиц». Я предался было размышлениям о том, что мы подошли к концу открытий неожиданных новых элементарных частиц или основных взаимодействий. Меня обвинили в том, что я утверждаю, будто сама физика элементарных частиц пришла к своему естественному завершению.

Я уверен и надеюсь, что я не прав. Искусным экспериментаторам еще, несомненно, предстоит открыть совершенно неожиданные и новые объекты. Природа не могла так быстро истощить запас своих хитростей. Очень часто при поиске основных составляющих материи и законов природы ученые выражали мнение, что мы уже пришли к концу пути. Так произошло, например, в самый расцвет эпохи классической физики в конце девятнадцатого столетия. Великие достижения механики Ньютона, электромагнитной теории Максвелла и новой тогда науки термодинамики заставили всех думать, что конец близок. Затем, очень быстро, сменяя друг друга, последовали несколько неожиданных экспериментальных открытий, которые привели к низвержению классической системы и появлению радикально новых теорий квантовой механики и относительности.

И вновь, в конце сороковых годов, некоторым физикам казалось, что мы достигли полного понимания или, по крайней мере, подошли к нему совсем близко. Джордж Гамов был великим ученым-исследователем, а также популяризатором науки. Его книга «Раз, два, три... бесконечность», опубликованная в 1947 году, немало поспособствовала тому, чтобы я стал физиком. В этой книге он писал:

«Но конец ли это? — можете спросить вы. — Какое мы имеем право допускать, что нуклоны, электроны и нейтрино действительно элементарны и не могут быть разделены на еще более мелкие составляющие? Разве всего полвека назад атомы не считали неделимыми? И при этом какую сложную картину они являют собой сегодня!» Ответ состоит в том, что, несмотря на безусловную невозможность предсказания будущего развития науки о материи, сегодня мы располагаем гораздо более здравыми причинами, чтобы считать, что наши элементарные ча-

стицы действительно являются основными единицами и не могут быть разделены далее. Тогда как якобы неделимые атомы проявляли очень и очень разнообразные и довольно сложные химические, оптические и прочие свойства, элементарные частицы современной физики обладают чрезвычайно простыми свойствами; в действительности, по своей простоте, их даже можно сравнить со свойствами геометрических точек. Кроме того, вместо достаточно большого количества «неделимых атомов» классической физики, сейчас в нашем распоряжении остались всего три существенно различные категории: нуклоны, электроны и нейтрино. И несмотря на сильнейшее желание и стремление свести все к самой простейшей его форме, все невозможно свести к ничему. Таким образом, мы, судя по всему, действительно достигли цели своих поисков основных элементов, составляющих материю.

Сразу после того как были написаны эти слова, была открыта первая из предположительно элементарных частиц, называемых *мезонами*. Вскоре после этого ученые увидели странные частицы. С развитием новых экспериментальных методов и применением больших ускорителей частиц тонкая струйка вскоре превратилась в мощный поток. Три элементарные частицы Гамова превратились в сотни таких частиц. Совершенно ясно, что мы не только не попали «в десяточку», но вообще промазали.

Поиск основной структуры материи — очень древняя дисциплина. Некоторые древнегреческие философы считали огонь, землю, воздух и воду основными составляющими материи. Очень скоро выяснилось, что вещества типа золота, серы или ртути невозможно объяснить с помощью четырех классических элементов. Химия, или ее темная сестра, алхимия, оставалась запутанной и беспорядочной дисциплиной до времен Лавуазье. Именно Лавуазье больше, чем любой другой ученый, уточнил смысл греческого понятия химического элемента.

В два последующих века наш поиск строительных кирпичиков, образующих материю, следовал по замечательно циклической траектории. Четыре раза в истории нашей науки нам казалось, будто мы «попали в десяточку». И четыре раза мы ошибались. Абсолютно неясно, удалось ли нам сегодня наконец-то определить самый глубокий слой луковицы. Однако поучительно рассмотреть историю этого поиска.

Четыре раза нам казалось, будто мы определили самые элементарные частицы: сначала это были атомы, потом ядра и электроны, затем «элементарные частицы», а теперь кварки и лептоны. В каждом случае поиск следовал логически похожему пути:

- Открывается или выводится новый слой луковицы. Появляются кандидаты в основные составляющие материи.

- Развивается теоретическая система, необходимая для понимания частиц. Она появляется как «физика элементарных частиц» своего времени.
- Возникает «демографический взрыв» якобы элементарных частиц. Кажется, что их слишком много, чтобы считать их воистину элементарными.
- Ученые обнаруживают среди элементарных частиц правильную модель. Эти частицы группируются в системы или таблицы и выказывают систематические разновидности химических или физических свойств.
- Эксперименты указывают на существование более глубокой структуры. Якобы элементарные частицы ведут себя как сложные системы, образованные еще более простыми составляющими. Когда мы обнаруживаем существование этих гипотетических составляющих, мы устанавливаем сложность якобы элементарных частиц и вновь переходим к этапу 1.

Продолжим свой краткий обзор физики элементарных частиц вместе с Джоном Дальтоном, которого обычно считают основателем атомизма. Он показал, каким образом законы химического соединения требуют существования атомов. Началось быстрое развитие науки *химии*, описывавшей взаимодействия между основными атомами. По мере усложнения химических технологий обнаруживалось все большее и большее количество разновидностей атомов. Список Лавузье, состоявший из 30 химических элементов, к середине девятнадцатого века удвоился. Кто мог поверить, что для образования материи природа задействовала такое огромное количество различных фундаментальных строительных кирпичиков?

В 1859 году изобрели периодическую таблицу химических элементов. Она точно предсказала свойства элементов, которые еще предстояло обнаружить. В то время многим ученым казалось, что дни атомов как воистину фундаментальных систем сочтены. Атом каждого типа обладал целым множеством внутренних свойств, например: массой, размером и химическим сродством. Более того, каждый химический элемент при нагревании создавал характеристический спектр испущенного света, что привело к появлению мощного аналитического инструмента — *атомной спектроскопии*. В действительности атом представлял собой некоторую сложную структуру, состоящую из отдельных частей.

В 1896 году открыли электрон, а в 1911 — атомное ядро. Резерфорд осознал, что атом состоит из нескольких электронов, обращающихся по орбите вокруг маленького и плотного ядра, расположенного в центре. Мы опять вернулись к этапу 1.

Началось развитие новой науки — *атомной физики*, объясняющей структуру атомов. Новая и революционная методология, квантовая механика, дополнила раннюю и лишь приблизительную классическую теорию. Новый синтез объяснил многие свойства материи. Однако проблема большого количества разновидностей атомов осталась нерешенной. В самом деле, открытие изотопов показало, что атомных ядер гораздо больше, чем химических элементов. Опять начал вырисовываться систематический образец. Каждое атомное ядро обладает электрическим зарядом определенной величины. Его заряд всегда является *в точности* целочисленным кратным заряда электрона. Для ядра водорода он равен единице; для ядра урана — 92. Это целое число называется «атомным номером». Существует еще одно целое число, связанное с каждым ядром, — его масса. Каждое атомное ядро имеет примерно целочисленную массу, измеряемую в единицах массы ядра водорода. Например, ядро кислорода весит примерно в 16 раз больше ядра водорода, тогда как преобладающий изотоп урана имеет атомную массу, примерно равную 238.

В процессе радиоактивного распада и атомный номер (Z), и атомная масса (A) изменяются согласно некоторым закономерностям. Существует три процесса радиоактивного распада. При «альфа-распаде» A уменьшается на 4, а Z — на 2. В процессе «бета-распада» A остается без изменений, а Z увеличивается на единицу. При «гамма-распаде» не изменяется ни A, ни Z, что и указывает на то, что ядро не является элементарной частицей.

В год моего рождения, 1932, был открыт нейтрон. Его открытие отмечает новое возвращение к этапу 1 нашей циклической истории. Нейтроны и протоны (ядра водорода) оказались несомненными составляющими всех атомных ядер. Родилась новая наука — *ядерная физика*, которая подарила миру ядерное оружие (что плохо) и ядерную электроэнергию (что просто здорово). Закралось самодовольство, которое и чувствуется в словах Гамова. Конечно, мы наконец-то открыли основные составляющие материи.

И снова произошел демографический взрыв. К нейтронам и протонам присоединилось множество других частиц, которые тоже имели право претендовать на то, чтобы быть элементарными. Однако никто из находившихся в здравом уме не мог поверить, что все эти частицы являются элементарными. Вскоре во всем этом хаосе начали вырисовываться некоторые системы. В пятидесятых годах было создано много конкурирующих схем организации этих частиц в аналог периодической таблицы. В 1961 году Мюррей Гелл-Манн и Юваль Нееман изобрели систему под названием «восьмеричный путь». Вместо знакомого расположения периодической таблицы элементов в виде прямоугольника новая схема

состояла из таинственных треугольников и шестиугольников. Но, подобно периодической таблице, она предсказывала существование новых и пока ненаблюдаемых частиц. *Эти частицы были найдены* и обладали именно теми свойствами, которые были предсказаны.

Но дело не только в том, что элементарных частиц было слишком много, чтобы они могли быть элементарными, и не только в том, что они, судя по всему, объединялись в группы и схемы восьмеричного пути: они, кроме того, выказывали характеристические свойства сложных, структурированных систем. Они не были точечными, а обладали измеримыми размерами. Их электрические и магнитные свойства распределялись в конечном и измеримом объеме. Распределялись на чем? Более того, каждая так называемая элементарная частица обладала богатой структурой возбужденных состояний. Казалось, будто они образованы более простыми составляющими, способными вращаться или совершать колебания друг относительно друга.

В 1967 году эксперименты, проведенные в Стэнфордском университете, показали, что протон, видимо, состоит из нескольких частей, или составляющих. Их, в шутку, назвали «партонами»[1] — составляющими, из которых состояли бы протоны, будь они образованы составляющими. Скоро стало ясно, что партоны и есть те самые кварки, существование которых Гелл-Манн предположил несколько лет назад.

Одно из самых больших достижений атомной физики двадцатых годов состояло в ее способности объяснить периодическую таблицу. Свойства химических элементов можно было объяснить, а в действительности, вычислить, с помощью квантово-механической теории ядерного атома. Подобным образом в семидесятых годах появилась теория кварковых взаимодействий. Таинственные успехи восьмеричного пути можно было объяснить с помощью новой теории «квантовой хромодинамики». Она показывала, например, что три кварка объединятся вместе, образуя протон или нейтрон. Как ни странно, эта же теория утверждает, что невозможно создать одиночный изолированный кварк. Так же как не существует веревки лишь с одним концом или магнита с одним только северным полюсом, не может быть и изолированного кварка. Таким образом, кварки — это составляющие совершенно нового вида, которые могут существовать исключительно как части единого целого. Тем не менее, свидетельство их существования неоспоримо, а безошибочный знак присутствия кварка проявляется в любых экспериментах физики высоких энергий.

И вот мы опять на этапе 1. Кварки являются составляющими ядерных частиц и выказывают все признаки того, что являются действи-

[1] В английском языке слово «part» означает «часть». — *Прим. пер.*

тельно элементарными. Вместе с другим классом частиц, лептонами, они являются современной версией основных составляющих материи. Частицы, называемые лептонами, не принимают участия в сильных взаимодействиях. Подобно электронам, они являются внеядерными частицами. В плане квантовой хромодинамики они инертны.

Но при этом мы уже наблюдали демографический минивзрыв. В 1984 году в CERN была открыта шестая разновидность кварков[1]. Быть может, это последний кварк, который предстоит обнаружить, а может и нет. Известно также шесть видов лептонов. Вместе эти 12 частиц образуют современную периодическую таблицу кварков и лептонов, или материальных частиц, или основных фермионов. Двенадцать основных частиц: много ли это? Указывает ли регулярность таблицы на более глубокий структурный слой?

Физики-теоретики уже придумали множество названий для абсолютно гипотетических составляющих кварков и лептонов: ришоны, стратоны, преоны, маоны, дионы и т. д. — названия, которыми воистину можно жонглировать. Другие физики-теоретики предположили, что истинная периодическая таблица содержит гораздо большее количество колонок, соответствующих еще не открытым частицам, например, скваркам и слептонам. Тем не менее, в настоящий момент нет ни одного свидетельства существования еще одного слоя луковицы. Кварки и лептоны, насколько это можно определить, являются действительно точечными частицами. Они никогда не наблюдались в возбужденном состоянии, в отличие от атомов, ядер или нуклонов. Несмотря на многочисленные попытки экспериментаторов, не появилось ни одного свидетельства существования скварков и слептонов. Быть может, мы действительно добрались до дна бочки. А может быть и нет.

По мере прохождения через все стадии наших поисков: от атомов к ядрам, частицам и кваркам — эксперименты становились все более сложными и более дорогими. Существующие ускорители частиц стóят сотни миллионов долларов. Эксперименты в физике высоких энергий в настоящее время проводят группы ученых, состоящие из сотни, а то и больше, докторов философии. Позвольте мне попытаться объяснить, почему все происходит именно так. Ключевой концепцией является *энергия*, которая, согласно квантовой механике, тесно связана с *размером*. Высокоэнергетический ускоритель играет роль микроскопа с высокой разрешающей способностью. Отдельные частицы ускоряются до высоких энергий, что позволяет им действовать в микромире подобно зонду. Чем выше энергия — тем меньше зонд.

[1] *Примечание автора.* «Открытие» в 1984 году t-кварка оказалось ложной тревогой. Его еще не нашли, но найдут непременно.

Нормальные люди измеряют энергию человеческими единицами, типа калорий или киловатт-часов. Специалисты по физике частиц, которых называют даже физиками «высоких энергий», работают с гораздо меньшими единицами, подходящими для отдельных частиц. Нашей единицей измерения энергии является электрон-вольт (сокращенно эВ). Один киловатт-час, например, равен 2×10^{25} электрон-вольт!

Каждая молекула воздуха находится в быстром и хаотическом движении. Средняя скорость молекулы воздуха примерно равна скорости звука: около 300 метров в секунду. При комнатной температуре ее средняя энергия составляет порядка 1/40 эВ. Химические реакции создают гораздо большее количество энергии на частицу. При сгорании атома углерода высвобождается несколько электрон-вольт энергии. Вот почему костер является относительно драматическим событием. Каждая частица видимого света, или фотон, переносит энергию в несколько электрон-вольт. Электрон-вольт является характеристической единицей измерения в химии, в оптике и во внешней части атома. Ускоритель с энергией, равной одному эВ, — знакомое всем устройство: батарейка карманного фонарика. Он не слишком дорог. Но при этом именно исследование явлений при нескольких электрон-вольтах показало, что атом является структурированной системой. Квантовая механика и атомная физика родились из наблюдения, что пламя становится желтым, если из кипящей кастрюли выливается жидкость. Подобный эксперимент, проведенный при немного более точных условиях, стал началом атомной спектроскопии и неминуемо привел к развитию химии.

Внутренняя часть атома гораздо меньше самого атома. Ее изучение требует использования зонда с гораздо большей энергией. Видимый фотон вообще бесполезен для столь тонкого анализа. Необходимы энергии в тысячи электрон-вольт, килоэлектрон-вольт, или кэВ. Подобные фотоны называются *рентгеновскими лучами*. Они тоже относительно недороги. Даже ваш сосед-стоматолог может позволить себе приобрести рентгеновский аппарат. Именно с помощью рентгеновских лучей Мозли, перед самым началом Первой мировой войны, открыл тайны внутренней области атома. Мозли показал, что химическая тождественность определяется зарядом ядра. Он установил ключевую концепцию атомного номера.

Какими бы энергетическими ни были рентгеновские лучи, их все же недостаточно для исследования внутренней структуры самого ядра. Здесь необходимы частицы с энергией, в тысячу раз большей. Ядерные свойства измеряются в миллионах электрон-вольт, или МэВ. И опять природа в изобилии предоставляет частицы с энергией в МэВ. Такие частицы создаются в процессах естественного радиоактивного распада. Именно ими воспользовался Эрнест Резерфорд, чтобы в 1911 году от-

крыть само ядро. Именно с помощью радиоактивных зондов в 1932 году был открыт нейтрон. Физикой энергий, измеряющихся в МэВ, занимаются и сегодня. Ядро атома еще не раскрыло все свои секреты. Маленькие специальные ускорители, создающие пучки частиц с энергией в МэВ, действуют по всему миру, где занимаются ядерной физикой. Состоятельный университет или развивающаяся страна без особых усилий могут позволить себе построить подобное устройство (и делают это).

Для изучения структуры протонов и нейтронов необходимо создать гигантское, тысячекратное увеличение энергии. Энергии физики частиц измеряются в миллиардах электрон-вольт (или ГэВ). Антипротон обнаружили вскоре после создания синхротрона в Беркли. Он создавал около 3 ГэВ энергии на столкновение.

Современный нам синтез, стандартная модель квантовой хромодинамики и теории электрослабых взаимодействий — с «элементарными» кварками и лептонами, — возник из открытий, сделанных во время экспериментов при энергии в несколько ГэВ. Теперь мы, наконец, подошли к Большой Науке. В Соединенных Штатах четыре лаборатории работают на границе мульти-ГэВ: Брукхейвенская национальная лаборатория в Нью-Йорке, Лаборатория им. Ферми в Иллинойсе, Стэнфордский комплекс ускорения частиц в Калифорнии и более скромная, но очень продуктивная установка в Корнеллском университете.

Нашим поискам может прийти конец, если мы не сделаем еще один гигантский шаг. Чтобы узнать, почему кварки и лептоны ведут себя именно так и являются ли они основными частицами природы, нам нужны энергии, равные многим триллионам электрон-вольт (или ТэВ). Наши друзья из Европы первыми добились энергий столкновения, равных половине ТэВ, которые привели их к открытию W-частицы и Z-частицы. Начиная с 1988 года, американский коллайдер лаборатории Ферми работал при энергии почти в 2 ТэВ. Однако стало очевидно, что даже такой энергии недостаточно, чтобы ответить на наши самые спорные вопросы. Ввиду этого американские физики высоких энергий своим высшим приоритетом поставили создание гигантского ускорителя, создающего энергии столкновений в 40 ТэВ. Эта машина нашей мечты может иметь окружность в сотни миль, а на ее строительство уйдут миллиарды долларов. Ясно, что пограничная физика стала не столь дешевой, какой она была раньше. Построит ли правительство США наш Сверхпроводящий суперколлайдер, как называют эту гигантскую машину? Разумный ли это способ тратить деньги американских налогоплательщиков, заработанные с таким трудом? Приведет ли создание, введение в эксплуатацию и использование такой дорогой установки к новому технологическому и научному прогрессу, который сделает свой вклад в развитие современной цивилизации?

Работа теоретика: элементарные частицы

Что такое элементарная частица?

«Занимаемся ли мы физикой элементарных частиц, чтобы объяснить окружающий нас мир?» — такой вопрос задают нередко. Ответ однозначен: НЕТ! Окружающий нас мир объяснили уже 50 лет назад или около того. С тех пор мы поняли, почему небо голубое, а медь — красная. Это элементарная квантовая механика. Слишком поздно объяснять, как работает обыденный мир. Это уже сделано. Необъясненными остались лишь вещи типа нейтрино, мюонов и K-мезонов — частицы, известные уже полвека, по-прежнему не нашли практического применения и, вероятно, никогда его не найдут. Это маленькие тайны, подобные тому, с чего началась Вселенная и чем она закончится.

Так что мы не пытаемся изобрести новый вид зубной пасты. Мы всего лишь пытаемся понять рождение, эволюцию и судьбу нашей Вселенной. Мы пытаемся понять, почему вещи должны быть именно такими, какими они являются. Мы стремимся раскрыть конечную простоту природы. Ибо в самой природе физиков, работающих с элементарными частицами (и некоторых других), заложена вера в простоту; убеждение, противоречащее самому здравому смыслу, что основные законы физики в действительности достаточно просты и понятны. Пока что эта вера приносила чрезвычайно многочисленные плоды: те, кто ей обладает, часто достигают успеха; те же, кому она несвойственна, всегда терпят неудачи.

Эту область можно разделить на три части. Одной из них является физика частиц и предмет данного эссе. Другой — изучение гравитации от Ньютона до Эйнштейна и далее; в частности, общая теория относительности, которую должен знать каждый физик-аспирант. Наконец, космология являет собой изучение происхождения Вселенной в Большом взрыве. Частицы, гравитация и космология — вроде бы совсем разного поля ягоды. Гравитация объясняет движения небесных тел; космология работает с рождением и смертью Вселенной; а физика частиц занимается, главным образом, самыми микроскопическими и бесполезными частицами в мире. В конечном итоге эти три науки сливаются воедино. Мы, затаив дыхание, стремимся к объединенной и истинной (мы надеемся) теории, основной теории природы, которая объяснит все. Пока мы ее не достигли.

На рисунке 1 изображена змея, глотающая свой собственный хвост, — иллюстрация, которая, как мне сказали, имеет огромное мифологическое значение. Это змея относительных размеров. Числа, расположенные внутри змеи, соответствуют размерам объектов: от очень маленьких (в данном случае 10^{-18} сантиметров) до очень больших (в данном случае 10^{+18} сантиметров). Мы находимся в середине змеи, в ее животе. Так происходит потому, что мы имеем промежуточный размер: не очень большой и не очень маленький. В змее по возрастающей расположены горы, сама Земля, затем вся Солнечная система протяженностью примерно в один световой час. Гораздо бóльшими являются расстояние до ближайшей звезды, размер нашей галактики, расстояние до галактики, родственной нашей, — Андромеды и, наконец, размер всей Вселенной. Спускаясь же по этой лестнице вниз, мы приходим к блохам и вшам, затем к бактериям, к цепочкам большой молекулы ДНК и, наконец, к самому атому. Ядро атома еще меньше: в 10 000 раз. Еще меньше кварки, образующие отдельные нейтроны и протоны. В сто раз меньше W- и Z-частицы, а еще меньше по-прежнему гипотетические составляющие нашей теории великого объединения.

Как ни странно, оказывается, что при изучении физики очень маленьких объектов магическая сила гравитации снова приобретает важность. Именно сила гравитации управляет всеми большими объектами. Гравитация важна для Земли, для нашей Солнечной системы, для звезд и для Галактики. И для чрезвычайно маленьких объектов гравитация снова оказывается значимой. Поэтому змея действительно проглатывает свой хвост. Эта тайна — красота современного синтеза физики частиц и космологии — есть изучение одного конкретного факта: гравитация необходима как физике очень малого, так и физике очень большого.

Я пытаюсь обучить этой связи на своем Гарвардском курсе, который, по сути, можно назвать физикой для враждебно настроенной аудитории. Весь Гарвард, как вам должно быть известно, делится на три части. Одна его часть посвящает себя науке, и эти студенты известны как *сайанситы*[1]. На противоположном полюсе — *гуманоиды*[2], которые изучают английский язык, литературу и классические языки. Между ними расположились неопределившиеся: социологи, экономисты и последователи политической «науки», короче: *социопаты*[3]. Моя группа состоит из равных частей гуманоидов и социопатов. Я рассказываю им сказку о второй змее, которая спиралью скручивается внутрь, встречая

[1]От английского *science* — «наука». — *Прим. пер.*

[2]Ироническое название гуманитариев. — *Прим. пер.*

[3]Английское слово *sociopath* на русский язык также может переводиться как «психопат», поэтому в данном названии явно присутствует доля иронии, но дословно его можно перевести и как «общественная стезя». — *Прим. пер.*

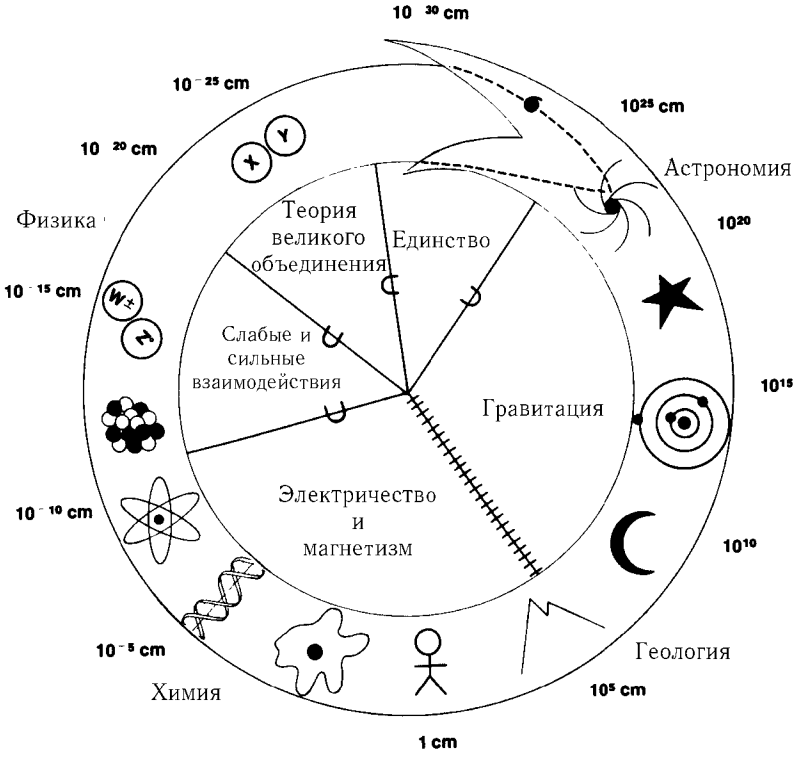


Рис. 1. Великая змея относительных размеров.

еще более правдоподобных претендентов на роль основных составляющих материи. Об этом и пойдет речь в данном эссе. Это периодическая прогрессия. Начнем с атомов.

Давным-давно атомы считались элементарными и неделимыми. Однако существовало слишком много видов атомов, или элементов, чтобы все они могли быть элементарными. Затем ученые показали, что атомы имеют периодические и закономерные свойства, как это видно из периодической таблицы. Успех периодической таблицы привел ее создателя, Менделеева, к мысли о том, что атом является структурированной системой, образованной более простыми составляющими. Полвека спу-

стя стало ясно, что он был прав. Атом состоит из электронов, которые обращаются по орбите вокруг расположенного в центре ядра; это открытие привело к появлению квантово-механического взгляда на ядерный атом и к новому уровню структуры. Атом оказался отнюдь не элементарным. Это сложный объект, состоящий из атомного ядра и электронов.

Так, может быть, в таком случае элементарными были ядра атомов? Конечно же, нет. Были открыты изотопы. Оказалось, что атомных ядер больше, чем разных видов атомов, и очень скоро были открыты некоторые закономерности. В данном случае именно странные целочисленные значения атомных номеров и атомных масс привели к новому уровню структуры. Когда в 1932 году открыли нейтрон, всем стало ясно, что ядро состоит из нейтронов и протонов. Ранее ученые ошибочно полагали, что ядра состоят из протонов и электронов — единственных элементарных частиц, которые тогда были известны. Затем изобрели мезоны, чтобы обеспечить силы, удерживающие протоны и нейтроны вместе. Мы пришли к новой дисциплине: мезонной теории ядерных сил, — и к новой категории элементарных частиц: нейтронов, протонов, мезонов и их многочисленных родственников.

С началом использования в шестидесятых годах больших ускорителей элементарные частицы вошли в эпоху демографического взрыва. Оказалось, что существуют сотни таких частиц. Так же как существуют сотни различных атомов и 399 различных видов атомных ядер, живущих, по крайней мере, год, так существует и, как минимум, пара сотен различных видов элементарных частиц — слишком много, чтобы все их можно было считать элементарными. Чтобы что-либо было элементарной частицей, оно не должно существовать в слишком большом количестве разновидностей.

И опять в новых видах периодических таблиц начал восстанавливаться порядок; появилась система, известная под названием *восьмеричного пути*. В конечном счете, эта система привела к новому видению, новой структуре, которая сейчас называется *стандартной теорией*. Современная догма называется «квантовая хромодинамика и теория электрослабых взаимодействий». Эти теории, судя по всему, достаточно удачно объясняют окружающий нас мир на новом уровне элементарных частиц, называемых кварками.

Но все дошло до такого момента, когда для этих частиц тоже настал демографический взрыв. В настоящее время известны шесть видов кварков — количество, которое не является ни угрожающе большим, ни удовлетворительно малым.

Само изучение физики — явление периодическое. Мы начали с атомов, перешли к ядрам, частицам, кваркам, и в каждом случае, как толь-

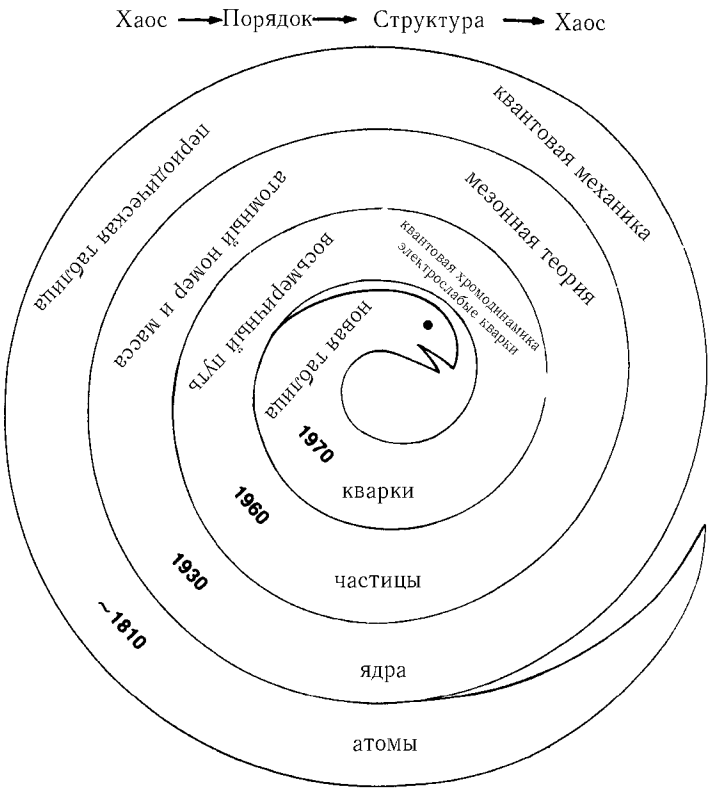


Рис. 2. Змея, которая в виде спирали сворачивается внутрь в поисках плода познания.

ко появляется претендент на право быть элементарной частицей, за ним следует некоторый хаос (демографический взрыв), а за ним — новый уровень порядка (периодические свойства этих потенциально элементарных частиц). Затем появляются некоторые признаки структуры, и предлагается новый кандидат в элементарные частицы. Сегодня этим кандидатом является кварк. Эту логическую структуру тоже можно представить в виде змеи — змеи, которая в виде спирали сворачивается внутрь в поисках плода познания (рисунок 2).

Вернемся в прошлое — в 1869 год, к созданию периодической таблицы, — чтобы проследить, как развивалась ее структура. На рисунке 3

мы видим часть периодической таблицы — фрагмент, имеющий немаловажное историческое значение. На рисунке показаны даты открытия некоторых элементов: иттрий (Y), например, был открыт в 1843 году, цирконий (Zr) — в 1824 году, а алюминий (Al) выделили только в 1825. Менделеев, который создал свою периодическую таблицу в 1869 году, заметил, что она обладает очень любопытным свойством: в ней присутствуют пробелы, соответствующие еще не открытым элементам. Чтобы завершить свою таблицу, он предсказал существование трех новых элементов и свойства отсутствующих элементов. Действительно, в 1879 году был открыт скандий, в 1875 году — галлий, а в 1886 году — германий.

Периодическая таблица оставалась тайной: Как она работает? Почему она работает? Мы не понимали этого до двадцатых годов, когда ее, наконец, поняли, объяснили и обобщили с помощью элементарной атомной теории. Те, кто изучал химию, знают, что сейчас мы понимаем структуру атома и периодическое поведение элементов: как строится последовательность от лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода, фтора и т. д. с увеличением валентности и согласно закономерностям химических соединений. Теперь мы знаем, как эти факты объясняются через количество электронов в атоме и как само это количество объясняется электрическим зарядом ядра. Периодическая таблица объясняется через тяжелое маленькое ядро (которое принимается как данное химиками) и его целочисленный атомный заряд (чтобы обращающиеся по орбите электроны точно его нейтрализовали). Весь этот ансамбль подчиняется законам квантовой механики, датированным 1926 годом. С тех самых пор таблица перестала быть тайной; она стала полезна нашим друзьям-химикам, которые изобретают очаровательные новые продукты вроде дурацкой оконной замазки. Химия больше не является столь передовой и фундаментальной наукой, какой она была век назад.

Теперь обратимся к ядру, которое когда-то было предметом изучения физики элементарных частиц. В ядерной физике мы опять-таки задаемся несколькими вопросами: Существует ли какой-то аналог периодической таблицы? Что означает тот факт, что электрический заряд ядра является целым числом? Почему происходит так, что каждый атом имеет массу, которая является приблизительно целочисленным кратным атома водорода? В самом деле, благодаря открытию изотопов, выяснилось, что все легкие ядра имеют приблизительно целочисленную атомную массу. Если масса ядра атома водорода равна единице, тогда ядро гелия весит четыре, бора — одиннадцать, а углерода — двенадцать. Бедный хлор имеет атомную массу, равную 35,5 — настолько далекую от целого числа, насколько это возможно. Однако этому было найдено объяснение: оказывается (это открыли в двадцатые годы), что хлор на 75 процен-

	Mg	Al 1825	Si	P	S	
	Ca 1808		Ti 1791	V	Cr	
	Zn			As	Se 1817	
	Sr 1808	Y 1843	Zr 1824	Nb	Mo	
	Cd	In 1863	Sn	Sb	Te	

Рис. 3. Часть периодической таблицы, на которой приведены даты открытия некоторых элементов.

тов состоит из хлора-35, а на 25 процентов — из хлора-37, причем оба изотопа имеют примерно целочисленные атомные массы.

Так что же означают эти целочисленные массы и целочисленные заряды? С 1932 года нам известно, что это значит, что ядро не является элементарным объектом. Это маленький мешочек с бобами, содержащий две их разновидности: протоны и нейтроны, — с приблизительно равной массой. Протон имеет электрический заряд, а нейтрон — нет. Поэтому мы можем распрощаться с ядром. Пусть физики-ядерщики играют с свои детские и опасные игры: нас заботит воистину элементарное.

Перейдем к изучению так называемых элементарных частиц. Когда я учился в средней школе, список этих частиц был очень коротким: протоны, нейтроны, электроны и предполагаемые, но еще никем не виденные нейтрино. В то время Джордж Гамов написал «Один, два, три... бесконечность»; она стала одной из книг, благодаря которым я заинтересовался физикой частиц. Он писал, что существуют только эти четыре вида элементарных частиц, причем каждый настолько прост, что напоминает математическую точку. Хотя четыре — конечно, не одна,

это было лучшее, что мы могли сделать; как-никак четыре устраивало даже древних греков. Мы достигли цели, полагал Гамов, наших поисков основных кирпичиков, образующих материю. Конечно же, Гамов ужасно ошибался, также как ошибались древние мыслители, которые утверждали, что атомы являются элементарными, неизменными и не образованы чем-то более простым. В тот самый год, когда Гамов написал свою книгу, начался демографический взрыв элементарных частиц, стимулом которому послужило открытие британцами полудюжины «странных частиц».

Оказалось, что существуют не четыре «элементарные» частицы, а буквально сотни таких частиц. Каждая имела равное право претендовать на элементарность. Мюррей Гелл-Манн в Калифорнийском технологическом институте, а также независимо от него Юваль Нееман в Израиле изобрели теорию, которая стала известна под названием «восьмеричного пути». Она внесла некоторый порядок в беспорядочную кучу вновь открытых частиц. Их теория предсказывала, что элементарные частицы должны образовывать четко определенные мультиплеты, состоящие из восьми членов (при должном представлении образующими шестиугольник) или из десяти членов (образующих треугольник). Три таких совокупности изображены на рисунке 4. Существование всех частиц в двух шестиугольных массивах уже было известно, но три частицы из треугольника еще не наблюдали. В 1962 году были открыты Ξ^{*0} и Ξ^{*-}, и Гелл-Манн немедленно предсказал, какими свойствами должна обладать одна отсутствующая частица.

И вот! Ник Самиос и его друзья увидели Ω^- в Брукхейвенской национальной лаборатории. Она вела себя именно так, как предсказал Гелл-Манн. История повторялась: теория Гелл-Манна была сродни периодической таблице Менделеева. Сначала никто не воспринимал эти великие достижения всерьез. Потом, когда пробелы в моделях заполнились, еретики обратились в веру, а атеисты обрели Бога. Аналог периодической таблицы Гелл-Манна и Неемана оказался правильным. Предсказанные ими частицы существуют в природе. Люди начали подозревать, что, должно быть, существует следующий уровень структуры. И он действительно существует.

Сегодня нам известно, что эти частицы не так элементарны, как когда-то казались. Сейчас мы знаем, что они состоят из кварков и выполняют их заповеди. Наблюдаемые ядерные частицы состоят из этих и только из этих разновидностей: барионов, каждый из которых образован тремя кварками; антибарионов, каждый из которых образован тремя антикварками; и мезонов, каждый из которых содержит один кварк и один антикварк. Мистический треугольник Гелл-Манна содержит частицы, состоящие из субчастиц. Одна частица, например, Δ^{++} состоит из трех u-кварков; другая Δ^- образована тремя d-кварками; частица Σ^{*0}

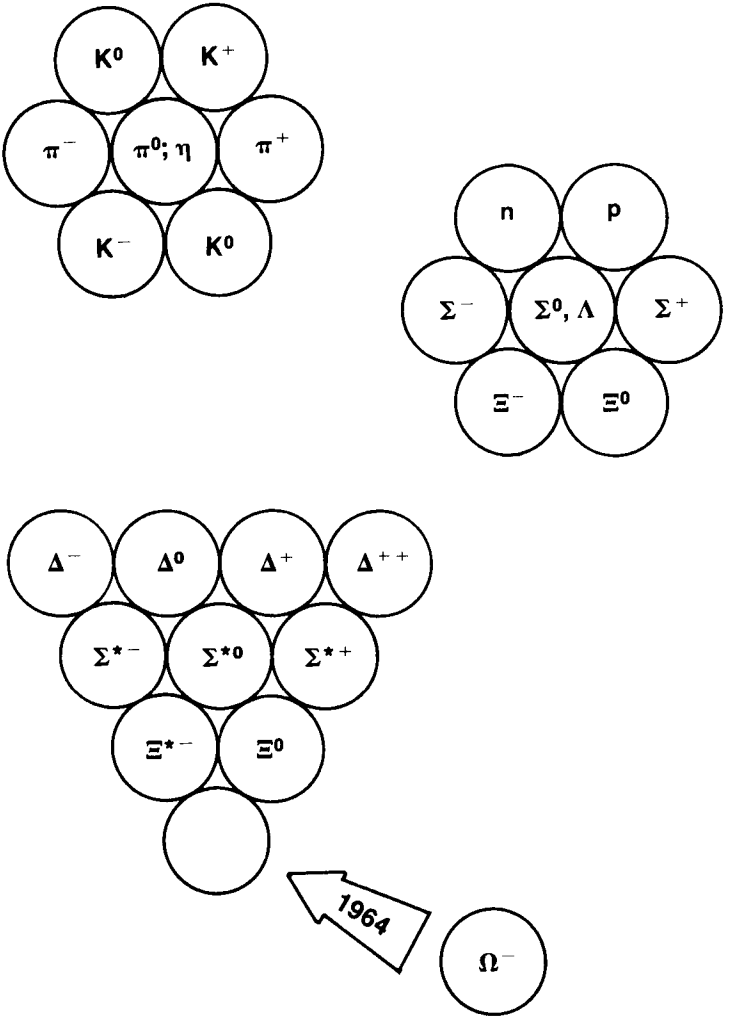


Рис. 4. Три из совокупностей частиц, предсказанных «восьмеричным путем». Отсутствующая частица Ω^- была открыта в Брукхейвенской лаборатории в 1964 году.

в центре состоит из одного u-кварка, одного d-кварка и одного s-кварка; а самая странная из всех частиц Ω^- образована тремя s-кварками. (Я должен извиниться за названия кварков, которые придумал Гелл-Манн.) Почти вся материя, которая присутствует в комнате, состоит из кварков, за исключением небольшого остатка, образованного электронами. Нуклоны и мезоны, которые когда-то считали элементарными формами материи, сейчас считаются просто составными. «Элементарные частицы» далеко не элементарны, а их изучение свелось к своего рода химии: простая детская игра.

Протон состоит из двух u-кварков и одного d-кварка. Нейтрон образован двумя d-кварками и одним u-кварком. Отсюда следует, что кварки переносят дробные электрические заряды. U-кварк переносит заряд, равный 2/3, а d-кварк — заряд, равный -1/3. Если бы наблюдался изолированный кварк, то его характеристической и поразительной чертой был бы его дробный электрический заряд. Многие экспериментаторы искали дробно заряженный кварк. Помимо группы из Калифорнии, которая настаивает на том, что видит то, чего она видеть не должна, в лаборатории изолированный кварк никто не видел. Его не видели, да и увидеть его невозможно. Современная кварковая теория утверждает, что кварки невозможно создать по отдельности. Они существуют только как части одного целого и не могут существовать как самостоятельные частицы.

Например, представьте попытку убрать кварк из адрона, используя, допустим, кварк-штопор. Сила, удерживающая кварки вместе, не уменьшается с увеличением расстояния: чтобы убрать кварк, нужно растянуть пружину, которая в некоторый момент порвется. Когда это происходит, создается новая пара кварк-антикварк. В ходе этой процедуры нам не удается отделить кварк. Мы, скорее, создадим мезон.

Наконец, мы пришли к современным претендентам на право быть основными кирпичиками материи: к самой последней «периодической таблице», таблице кварков и лептонов. Четыре различные частицы необходимы, чтобы построить космический корабль Земля и его гигантскую электростанцию Солнце и управлять ими. Два вида кварков, u и d, образуют нейтроны и протоны. Вместе они представляют бóльшую часть Солнца и Земли. Электроны, соединенные с этими совокупностями нейтронов и протонов, называемыми атомными ядрами, завершают образование атома. Наконец, в игру вступает неуловимое нейтрино. Несмотря на то, что оно *не* входит в состав атома, оно играет жизненно важную роль в процессе, известном как бета-распад. В ранней Вселенной благодаря бета-распаду появилась возможность синтеза из первичного водорода более тяжелых ядер. Кроме того, именно этот механизм дает Солнцу возможность разжигать свою ядерную печь, чтобы обогревать Землю и ее обитателей. Без нейтрино космический корабль Земля, если

бы даже вообще существовал, был бы замороженным шаром, состоящим из твердого водорода, на котором не могла бы возникнуть жизнь. Всего четырех элементарных частиц оказалось достаточно, чтобы сотворить все чудеса нашего земного рая. Это *два кварка* с электрическими зарядами 2/3 и -1/3, один отрицательно заряженный *электрон* и сопутствующее ему *нейтрино*.

Четыре — число маленькое, но, к сожалению, все оказалось не так просто. Специалисты по физике частиц сделали большой скачок в сторону. Они обнаружили частицы, которые ни в коем смысле не являются составляющими обыкновенной материи. И эти любопытные частицы появлялись семействами, по своей структуре мучительно напоминающими первое семейство из четырех «существенных»[1] частиц.

Гигантский скачок в сторону начался в 1938 году, когда в космических лучах была замечена новая частица. Во многом напоминающая электрон, за исключением того, что она в 200 раз тяжелее, эта частица сейчас известна как *мюон*. «Кто это заказал?» — вопросил Изидор Раби, услышав об этом открытии во время обеда в китайском ресторане, в тот момент еще не понимая, что мюон — это первый член будущего второго семейства элементарных кварков и лептонов.

При распаде нестабильные частицы часто создают электрон или мюон в сопровождении нейтрино. В 1961 году экспериментаторы из Брукхейвенской национальной лаборатории доказали, что нейтрино, сопровождающее мюон, отличается от нейтрино, сопровождающего электрон. За открытие мюонного нейтрино, второго члена второго семейства, в 1988 году Леон Ледерман, Мел Шварц и Джек Стейнбергер получили Нобелевскую премию по физике.

Некоторые частицы, которые впервые наблюдались в космических лучах в 1947 году, ведут себя очень своеобразно и известны как *странные частицы*. Сегодня мы знаем, что странная частица — это не что иное, как частица, содержащая странный кварк (s-кварк). Странный кварк просто-напросто представляет собой тяжелого родственника d-кварка. В отличие от u- и d-кварков, он не является необходимым компонентом земной материи. В 1963 году, когда Гелл-Манн изобрел понятие кварков, второму семейству недоставало только тяжелого родственника u-кварка. В таблице снова зияла брешь, могущая быть заполнена лишь частицей, которую еще только предстояло открыть. В 1964 году мы с Бьеркеном предположили существование *очарованного кварка* (c-кварка), но его открытия нам пришлось ждать целых десять лет.

[1]Здесь и далее термин «существенные частицы» употребляется в смысле необходимости данных частиц для определенных процессов, например, для образования материи. Термин «несущественные частицы» не означает, что эти частицы вообще не нужны или излишни, просто в описываемом процессе они не играют никакой роли. — *Прим. пер.*

Когда в семидесятых годах были открыты очарованные частицы, казалось, что таблица закончена. В ней присутствовали два симметричных семейства элементарных фермионов: существенные и несущественные. По крайней мере, так думали мы.

Мартин Перл, работающий на Стэнфордском электрон-позитронном коллайдере, известном как SPEAR, обнаружил первое свидетельство существования *третьего* семейства элементарных частиц. Он открыл таулептон, более тяжелый вариант мюона. За прошедшие с тех пор годы косвенное свидетельство заставляет нас считать, что тау-частица имеет свое собственное сопутствующее нейтрино. Более того, Ледерман и его коллеги в Лаборатории им. Ферми доказали существование пятого кварка, для разнообразия названного *b*-кварком (нижним, прелестным или двухсотлетним кварком[1]) в честь года его открытия и народа, который его открыл. Он похож на *d*- или *s*-кварки, но гораздо более тяжелый. И опять таблица почти завершена. Она содержит шесть известных лептонов, но всего пять известных кварков. Должен существовать более тяжелый родственник очарованного кварка, но он пока не показался, несмотря на беспрестанные усилия экспериментаторов во всем мире. Его называют *t*-кварком, что значит верхний или истинный и, к счастью, не трехсотлетний[2].

Ну и хватит о материальных частицах. Теперь мы подошли к взаимодействиям, которым они подвержены и посредством которых они образуют наблюдаемые проявления природы. Физикам известны всего четыре основных взаимодействия. Возможно, самым знакомым из них является *гравитация*. Она удерживает планеты на их орбитах вокруг Солнца, и ей почти удается удерживать человечество в ловушке на поверхности нашей планеты. Почти, но не абсолютно, поскольку нам, как-никак, удалось прогуляться по Луне и невредимыми вернуться на Землю. В современном изучении микромира гравитация практически несущественна. Будучи самым слабым из всех взаимодействий, она не оказывает заметного влияния на элементарные частицы.

Одно и только одно взаимодействие несет ответственность почти за все, что мы можем видеть, ощущать, обонять, пробовать и осязать. Оно называется *электромагнетизмом*. Именно электромагнитное взаимодействие в чистом виде удерживает электроны вблизи их ядер. Все химические и механические силы проистекают из электромагнетизма. Это все, что нам нужно знать, пока мы не захотим «прощупать» структуру самого ядра. Квантовая теория электромагнетизма — чрезвычайно успешная дисциплина. Она позволяет нам вычислить наблюдаемые

[1] В английском языке все эти три слова начинаются с буквы «b»: bottom, beauty, bicentenary. — *Прим. пер.*

[2] Та же игра слов: top, truth, tercentenary. — *Прим. пер.*

явления с точностью до многих десятичных разрядов. Это парадигма теории всех природных явлений. Квантовая электродинамика работает с электронами и фотонами, или частицами света. Фотон является переносчиком электромагнитного взаимодействия.

Изучение частиц и ядер открыло существование двух других взаимодействий, которые называются очень просто: *сильное* и *слабое*.

Теория сильного взаимодействия была разработана в семидесятых годах и известна под названием *квантовой хромодинамики*. Именно сильное взаимодействие удерживает кварки вместе, в результате чего образуются нейтроны и протоны. Сильное взаимодействие переносится частицей, называемой *глюоном*, которую могут испускать или поглощать только кварки. Подобно кваркам, глюоны не могут существовать по отдельности. Их область существования ограничена внутренней областью элементарных частиц. Свидетельство реальности глюонов было получено в Германии в 1981 году, где потоки глюонов впервые наблюдались на большом немецком электрон-позитронном коллайдере PETRA.

Современная теория слабых взаимодействий появилась в шестидесятых годах. Согласованная теория таких взаимодействий требовала, чтобы слабое взаимодействие объединилось с электромагнитными взаимодействиями. Эта, когда-то очень гипотетическая, «теория электрослабых взаимодействий» сделала три эффектных предсказания. Она утверждала, что в природе должна существовать новая разновидность явлений, называемых «нейтральными токами». Действительно, существование этих предсказанных явлений было доказано экспериментально. Впервые они наблюдались в CERN в 1973 году, а вскоре после этого их наблюдала группа Руббиа, тогда работавшая в Лаборатории им. Ферми.

Кроме того, теория электрослабых взаимодействий требовала существования новых частиц — переносчиков слабых взаимодействий, частиц, известных как W и Z. Эти частицы настолько тяжелы, что их существование не могло было быть установлено ни на одном из существующих ускорителей. Именно поэтому мой коллега Карло Руббиа предложил сконструировать новое устройство, чтобы открыть эти загадочные частицы. По каким-то причинам США не смогли, или не захотели, вовремя создать это устройство. Но наши европейские коллеги немедленно начали строительство машины, о которой мечтал Карло, — протон-антипротонного коллайдера в CERN. Вскоре после того как эта машина была построена, Карло удалось установить существование обеих частиц: W и Z. За это великой открытие в 1984 Руббиа получил часть Нобелевской премии по физике. Другую ее часть присудили голландскому инженеру Симону Ван-дер-Меру, благодаря гению которого стал возможным успешный ввод в действие коллайдера в CERN.

А что же представляют собой наши элементарные частицы сегодня? У нас есть двенадцать материальных частиц (кварки и лептоны) и четыре частицы-переносчика взаимодействий (фотоны, глюоны, W и Z). Помимо t-кварка, существует еще одна экзотическая частица, которая пока отсутствует и которую еще предстоит открыть, — любопытный объект, называемый бозоном Хиггса. Таким образом, наш «зоопарк» насчитывает всего 17 «элементарных» частиц. Но наша теория содержит не только 17 частиц, она включает еще 17 свободных чисел или параметров. Должна ли основная теория содержать столько различных видов частиц? Приходится ли нашему творцу регулировать 17 каналов, чтобы должным образом «настроить нас»? Нет, черт побери! До последнего слова мы пока не добрались. Запас хитростей Природы еще не истощился, и она вновь удивит нас. Безусловно, в области физики элементарных частиц многое еще предстоит сделать. Ни один ученый, обладающий хорошим вкусом, не сможет принять 17 истинно элементарных частиц. Змея еще не добралась до центра плода.

Обратимся же за руководством к истории нашей дисциплины. Древние греки верили, что существует всего четыре основных элемента: огонь, вода, земля и воздух. Это количество было достаточно малым, но теория, в том виде, в каком она существовала, была абсолютно «сырой». Когда два века назад Лавуазье разработал современную химию, ему удалось определить около 30 различных химических элементов. За прошедшие годы этот список увеличился до 110 элементов. В действительности различных химических элементов так много, что химики уже перестали придумывать им названия. Элементы зачастую называют по их атомному номеру точно так же, как налогоплательщиков узнают по их номерам социального страхования.

Интересно изучить график увеличения количества известных химических элементов за два прошедших столетия. Это число возрастает от 30 до 110 равномерно, но не абсолютно линейно. Периоды резкого увеличения количества элементов отражают развитие новых технологий: электрохимии, спектроскопии и радиохимии. Тем не менее, меня учили, что существует 92 химических элемента. Однако количество известных элементов равнялось 92 лишь в течение краткого периода времени. Каким-то образом это число стало догмой, принятой в узком кругу преподавателей химии средней школы. Это весьма напоминает претенциозность медиков, которые слово *сантиметр* произносят на псевдофранцузский манер: «сонтиметр».

Сравните рост количества известных элементов с ростом количества уже установленных «элементарных» частиц. В 1950 году их было полдюжины, а сегодня — уже более 100. И опять рост кривой выказывает несколько рывков, соответствующих развитию пузырьковых камер

в начале шестидесятых и электрон-позитронных коллайдеров в середине семидесятых. Демографические взрывы атомных элементов и элементарных частиц указывали на то, что их нельзя всерьез воспринимать как истинно элементарные частицы. Но обратите внимание, как быстро все происходит сегодня. Рост количества элементов происходил в течение двух веков, а на более свежий демографический взрыв частиц понадобилось всего два десятка лет.

Рост количества кварков был более скромным. Изначально, когда кварки только придумали, существовало всего три аромата кварка. Сегодня их шесть. Достаточно ли подобного демографического взрыва, чтобы убедиться в том, что кварки *не* являются элементарными? Я думаю, что говорить об этом еще рано. Что следует из того, что наш список содержит 17 элементарных частиц? Когда я был аспирантом, из всех этих частиц был открыт только 41 процент. Сегодня существование пятнадцати из них было показано экспериментально; так что, судя по всему, выполнено 88 процентов нашего списка. Однако наш список, безусловно, подвержен изменениям. Никогда нельзя отрицать, что сегодняшняя элементарная частица не окажется завтрашней составной системой.

Сегодня мы располагаем правдоподобным списком элементарных частиц, а также эффективной и способной делать предсказания теорией: квантовой хромодинамикой и теорией электрослабых взаимодействий. Совсем недавно были найдены предсказанные W-частица, Z-частица и t-кварк. Быть может, нам сто́ит гордиться своими успехами и праздновать их? Совсем наоборот. Мы молимся о том, чтобы наши коллеги-экспериментаторы доказали ошибочность нашей теории. Мы живем в ожидании удивительного экспериментального открытия — чего-то, что не подойдет под нашу теорию. Нам нужен свободный конец, чтобы смоделировать дальнейшее развитие, а также новую и лучшую теорию. Наш прогресс зависит от доказательства ошибочности нашей современной теории. Карло Руббиа сделал ряд выдающихся открытий — открытий, подтверждающих нашу теорию. Затаив дыхание, мы ждем неожиданного: доказательства того, что наше видение природы еще не является полным.

Откуда мы знаем, что кварки и лептоны действительно являются элементарными? Каким основным свойством обладает составная система в противоположность элементарной? Одним из ответов является существование квантовых возбужденных состояний, или уровней энергии. Это гораздо проще, чем кажется. В составной системе, состоящей из дискретных частей, одна субструктура может двигаться относительно других. Она может вращаться, совершать колебания или еще как-то трястись и покачиваться внутри этой системы. Именно эти движения создают энергетический спектр. Атомы и молекулы имеют уровни

энергии. На самом деле, именно изучение уровней энергии атомов (или спектроскопия) было необходимым предшественником нашего восприятия атома как структурированной системы. Атомное ядро тоже имеет несколько возбужденных состояний (или уровней энергии), в которых составляющие его нуклоны могут совершать сложные движения. Даже сам нуклон обладает сложной и хорошо изученной совокупностью энергетических уровней, что является следствием того, что он представляет собой сложную и структурированную систему, содержащую три кварка. Таким образом, создается впечатление, будто жизненно важным является ответ на вопрос о том, подвержены ли кварки и лептоны внутренним движениям. Пока что все свидетельства говорят об обратном. Ни кварки, ни электроны, ни нейтрино не выказали никаких признаков наличия внутренней структуры. Быть может, они все-таки действительно элементарны. Или, возможно, мы должны изучать их более тщательно, используя более совершенные инструменты и более высокие энергии.

По мере более глубокого проникновения во внутренние структуры материи мы должны использовать зонды, обладающие все более и более высокой энергией. Это следствие квантовой механики, а также связанного с ней отношения между расстояниями и импульсами. Например, свет имеет характеристический размер, или длину волны, которая намного превышает размер атома. Мы не можем изучать внутреннюю структуру атома, используя видимый свет. Нам нужны волны более короткой длины и более высокой энергии. Внутреннюю область атома помогли увидеть рентгеновские лучи — светоподобные частицы, в тысячу раз более маленькие и обладающие в тысячу раз большей энергией, нежели видимые фотоны. Каждая из этих частиц обладает энергией в *тысячи* электрон-вольт.

Изучение ядра требует использования еще бóльших энергий. Ранняя ядерная физики зависела от существования естественной радиоактивности, которая предоставляет энергии в *миллионы* электрон-вольт. Резерфорд использовал такие частицы, чтобы открыть ядро. Он заметил, что альфа-частицы иногда рассеиваются в обратном направлении от кусочка золотой фольги. Годы спустя Резерфорд сказал, что это выглядело так, словно пушечное ядро, ударившись о кусочек материи, отскочило от него. Из этого опыта он заключил, что бóльшая часть массы атома сосредоточена в точечном ядре.

Интересно заметить, что эксперимент, во многом напоминающий эксперимент Резерфорда, привел к первому убедительному свидетельству существования кварков. Этот эксперимент было проведен в Стэнфорде в конце шестидесятых годов на самом большом ускорителе в мире. Электроны с очень высокой энергией приводились в столкновение с атомами водорода. И вновь наблюдалось, что очень большое количе-

ство электронов отклоняется на большие углы. Ясно, что внутри самого протона существуют маленькие и твердые рассеивающие центры. Сначала эти части протона назвали «партонами». Сегодня мы знаем, что партон — это кварк.

Именно в процессе изучения естественной радиоактивности в 1932 году был открыт нейтрон. Сразу же появилась рациональная доктрина ядерной физики, основными кирпичиками которой были нейтрон и протон. Ядра имели почти целочисленные атомные массы, потому что были образованы именно таким количеством нуклонов. Последние удерживались вместе новой разновидностью взаимодействия, достаточно отличного от гравитации или электромагнетизма. В тридцатых годах Юкава предположил, что это взаимодействие может переноситься гипотетической частицей, масса которой лежит между массами нуклона и электрона.

Многие ранние открытия в физике частиц были сделаны благодаря изучению космических лучей. Эти таинственные частицы обладают чрезвычайно высокой энергией и появляются из отдаленных частей нашей собственной галактики. Эксперименты с космическими лучами предоставили первое свидетельство существования антиматерии: позитрон, античастица электрона, наблюдался в 1932 году. В 1938 году в космическом излучении была замечена частица, масса которой оказалась в нужном промежутке. Был ли это мезон Юкавы — клей, удерживающий нуклоны вместе? Оказалось, что нет. Это был непонятно тяжелый электрон, который мы называем *мюоном*. Частицу Юкавы один из физиков, специализирующихся на космических лучах, наблюдал в 1947 году вместе с несколькими любопытными и неожиданными частицами, которые известны под названием странных частиц.

Хотя космические лучи и обладают огромным количеством энергии, проблема состоит в том, что в действительности их не слишком много. С точки зрения выживания на Земле человека, это хорошо. Однако это также значит, что специалисты по физике частиц нуждаются в искусственном источнике частиц с высокой энергией. Все больше и больше изучение физики высоких энергий начинает зависеть от создания все бóльших и бóльших ускорителей.

По мере ввода в эксплуатацию ускорителей возрос темп открытий. Первое возбужденное состояние нуклона было открыто в 1954 году; в 1955 году впервые наблюдался антипротон, в в 1961 году было продемонстрировано существование, по крайней мере, двух видов нейтрино. Ω^--частица, существование которой доказало обоснованность восьмеричного пути, была обнаружена в Брукхейвенской национальной лаборатории в 1964 году. На самом деле, практически все наше знание о физике элементарных частиц появилось из экспериментов, проведенных на

больших ускорителях. Исключением, которое, вероятно, только доказывает правило, является наблюдение нарушения четности профессором Ц. Ву и ее коллегами в Колумбии. Быть может, это был последний из великих «настольных» экспериментов в физике элементарных частиц.

По мере создания и ввода в работу все более и более крупных ускорителей мы могли бы проникать все глубже и глубже в субъядерную тайну. С помощью машин шестидесятых годов были открыты четвертый (очарованный) и пятый (прелестный) кварк, а также третий заряженный лептон, тяжелый родственник мюона, который известен как тау-лептон. Обратите внимание, что все упомянутые нами открытия, связанные с ускорителем, были сделаны в США. Ускорители частиц — американское изобретение, и американские ученые использовали их наиболее эффективно. Но все это изменилось. За последние десять лет наши западно-европейские друзья не просто догнали нас.

В начале семидесятых годов началась гонка за открытием нейтральных токов — тех предсказанных эффектов, которые подтвердили бы состоятельность теории электрослабых взаимодействий. Это было состязание между CERN (главной европейской лабораторией по физике частиц) и Лабораторией им. Ферми. Европа выиграла гонки, ненамного опередив нас: это была их первая действительно великая победа.

Карло Руббиа одним из первых почувствовал важность этого события, ибо он был одним из руководителей проигравшей команды. Он знал, что самой значительной проверкой этой теории является поиск W- и Z-бозонов, поиск, который невозможно осуществить ни на одном существующем ускорителе. Вместе с двумя американскими коллегами он предложил построить протон-антипротонный коллайдер — смелую модификацию, которую можно было реализовать на существующих ускорителях в CERN или Лаборатории им. Ферми. CERN отреагировал на это с рвением и готовностью. Коллайдер начал работать в CERN в 1981 году, тогда как более крупный, но более медленно создававшийся коллайдер Лаборатории им. Ферми простаивал до 1987 года. Вот почему W-бозон был открыт в 1982 году, а Z-бозон — в 1983 году, причем оба открытия были сделаны в Европе.

Сейчас наш коллайдер работает, но он слишком мал, чтобы чего-то на нем достичь. Американские физики, работающие в области высоких энергий, не намерены сдаваться. Их приоритетом номер один является создание ускорителя, гораздо более амбициозного нежели те, что находятся на стадии проектирования сейчас. Мы мечтаем о Сверхпроводящем суперколлайдере (SSC) — устройстве, в котором сталкиваются пучки частиц с энергией столкновения, почти в 40 раз превышающей ту энергию, которую можно создать в Лаборатории им. Ферми сейчас. Сейчас эта машина строится в Техасе, и она станет самой крупной на-

учной установкой — 52 мили в окружности. Что, как нам кажется, мы узнаем, благодаря этой машине?

За прошедшее десятилетие мы поднялись на ту стадию физики элементарных частиц, где видимого прогресса не наблюдается. Мы создали якобы полный список из 17 «элементарных частиц». Наша теория об их взаимодействиях кажется полной и правильной. Ни один эксперимент не противоречит стандартной теории электрослабых и цветовых взаимодействий.

И все же еще *есть* что открывать, если нам достанет мужества, желания (и денег!), чтобы двигаться дальше. Мы лишь мечтаем *опровергнуть* стандартную модель и заменить ее новой и лучшей теорией. Как и всегда, мы продолжаем искать более глубокое понимание тайны природы: мы стремимся узнать, что такое материя, как она ведет себя на самом основном уровне и как открываемые нами законы могут объяснить рождение Вселенной в первичном Большом взрыве.

В поисках кварка

На великолепное и порой сбивающее с толку проявление чудес природой люди нередко реагируют как на показ фокусов. Некоторые сидят, откинувшись на спинку стула, и наслаждаются представлением, а другие чувствуют побуждение к поискам рационального объяснения происходящего. Ученые — это люди, которые бóльшую часть времени проводят, спрашивая, как получаются чудеса природы; среди них иногда также попадаются представители элитных кругов, не лишенные некоторого снобизма, которые неотвязно преследуют самый главный вопрос: Каковы самые основные составляющие материи и как они соединяются в одно целое? В наши дни таких ученых называют специалистами по физике элементарных частиц или высоких энергий; в прежние времена их называли просто физиками, или натурфилософами, или даже алхимиками.

Физики, работающие с элементарными частицами, следуют традиционным моделям научного исследования: они выдвигают разумные гипотезы о той области реальности, которую надеются понять, а затем пытаются подтвердить свои гипотезы с помощью экспериментальных наблюдений. Такие гипотезы требуют огромного воображения, а наблюдения проводятся очень сложным образом, так как ни одну частицу на самых основных уровнях материи ни в каком привычном смысле увидеть невозможно. Эти частицы попросту слишком малы. Некоторые из них можно увидеть косвенным путем, в процессе их прохождения через различные чувствительные устройства: они оставляют видимые дорожки в пузырьковых камерах, создают вспышки света в электролюминесцентных камерах или искры в искровых камерах. Другие обнаруживаются только тогда, когда мы видим их «распад» — самопроизвольное разложение для достижения более стабильного состояния.

Физика элементарных частиц за последнее столетие пережила несколько революционных всплесков, и не исключена возможность того, что мы и теперь находимся на грани нового прорыва. Теоретические идеи и экспериментальные открытия недавно начали объединяться весьма впечатляющим образом. Судя по всему, мы очень близко подошли к созданию объединенной теории, которая могла бы описать предельную структуру материи. Новости связаны с определенным ростом терминологии: словами типа «очарование» и «странность», словосочетаниями

типа «восьмеричный путь» и «удержание кварка цветными глюонами» изобилует не только профессиональная литература, они проникают уже и в средства массовой информации. И все же причины, которые приводят в восторг физиков, работающих в области элементарных частиц, человеку, далекому от науки, могут показаться абсолютно неясными.

Сейчас я хочу пригласить мирянина на экскурсию по джунглям физики элементарных частиц. Я опишу не только некоторых очень знакомых их обитателей, но и новые причудливые существа, которые уже предсказали, но еще не видели. Я ни в коей мере не претендую на полноту или завершенность своего рассказа, ибо кто может сказать, какая тварь покажется нам в следующий раз?

Джон Дальтон, основатель атомной теории, в 1810 году писал: «Мы попытались показать, что материя, несмотря на то, что она является *чрезвычайно* делимой, все же не является *бесконечно делимой*. Должен существовать некоторый предел, за который мы при делении материи зайти не можем. В существовании этих предельных частиц вряд ли можно сомневаться, хотя они, вероятно, слишком малы, чтобы их можно было увидеть... Для обозначения предельных частиц я выбрал слово *атом*, а не *частица, молекула* или любой другой миниатюрный термин, потому что это слово я считаю гораздо более выразительным; оно включает в себя понятие *неделимого*, чего нельзя сказать о других терминах».

И только в двадцатом веке стало ясно, что атом — кирпичик молекул, образующих всю обычную материю, — не является таким простым, каким считал его Дальтон. Далекий от элементарного, атом является составной структурой, в некоторой степени аналогичной Солнечной системе. Он состоит из маленького плотного ядра, окруженного гораздо бóльшим облаком *электронов*. Бóльшая часть массы атома сосредоточена в ядре, которое, кроме того, переносит положительный электрический заряд. Каждый электрон переносит отрицательный электрический заряд. Явления электричества и магнетизма, которые мы наблюдаем ежедневно, вызваны поведением света и подвижных электронов. Положительный заряд ядра всегда таков, что он может быть (и обыкновенно бывает) точно уравновешен отрицательным зарядом окружающих электронов.

Четыре века назад Ньютон объяснил, каким образом сила тяготения удерживает планеты на их орбитах вокруг Солнца; тем самым он дал нам возможность очень точно предсказывать некоторые события типа затмений. Аналогично, квантовая механика, сформулированная около 50 лет назад, показала, как электрическая сила удерживает атомы вместе; она позволяет нам достаточно подробно предсказать свойства атомов.

Но даже само атомное ядро, определяющее химическую природу атома, не является основной и неделимой составляющей материи. Открытие радиоактивности — выброса частиц из распадающегося ядра — показало, что одно атомное ядро способно превращаться в другое. Мечта алхимиков о превращении одного элемента в другой, в принципе, может быть реализована.

Самое крошечное ядро из всех существующих — это ядро водорода, и оно называется *протоном*. Атом водорода состоит из одного протона и одного электрона. В двадцатых годах ученые надеялись, что все атомы состоят только из протонов и электронов. Если бы это было так, то атомы можно было бы очень просто описывать, определяя количество электронов, отрицательные заряды которых предполагают равное количество положительно заряженных протонов, которые отвечают за массу атома (масса электронов пренебрежимо мала). Например, в электронном облаке атома азота семь электронов. Разве не может его ядро состоять из семи протонов, каким-то образом скрепленных в одно целое? Если бы это было так, то атом азота весил бы в 7 раз больше атома водорода, а на самом деле он весит примерно в 14 раз больше. Тогда было сказано, что атом азота должен состоять из 14 протонов и 14 электронов, причем половина электронов находится в ядре, а вторая половина образует облако вокруг ядра. Однако понятие электронов, находящихся внутри ядра, нарушало как некоторые основные принципы магнетизма, так и другие законы физики, вследствие чего осмысленная теория так и не была найдена.

Ситуация была спасена в 1932 году, когда открыли *нейтрон* — частицу с массой, близкой к массе протона, но без электрического заряда. На первых порах существование нейтрона вызвало некоторое замешательство. Могла ли это быть частица, состоящая из положительного протона и отрицательного электрона, связанных воедино? Или правильнее было бы сказать, что нейтрон является элементарной частицей, а протон лучше описывать как нейтрон, обладающий дополнительным положительным зарядом?

Однако скоро все согласились, что протоны и нейтроны (в общем называемые *нуклонами*) являются единственными составляющими ядра и *в равной степени* элементарны. Чтобы объяснить, каким образом атом азота может весить в 14 раз больше атома водорода, можно сказать, что ядро азота содержит семь протонов и семь нейтронов, которые весят примерно столько же, сколько протоны.

Причина помещать электроны внутрь ядра исчезла. Новая картина обеспечила возможность разумных предсказаний. В течение какого-то времени всем казалось, что существует всего три разновидности эле-

ментарных частиц: протоны, нейтроны и электроны. Путем введения электрического взаимодействия, связывающего электроны с их ядрами, и предполагаемого ядерного взаимодействия, удерживающего нуклоны в ядре, появилась возможность объяснить структуру всей известной материи.

И по сей день электрон продолжают считать истинно элементарной частицей. Он имеет электрический заряд, что означает, что при движении он способен создавать возмущения, известные как электромагнитные волны. Эти волны могут переносить энергию и информацию из одного места в другое. В телевизионном передатчике, например, движение электронов создает волны, которые улавливаются антеннами и преобразуются в звуки и изображения на экранах наших телевизоров. Видимый свет и рентгеновские лучи также считаются электромагнитными волнами. Иногда электромагнитные волны могут вести себя так, как если бы они были частицами. Например, свет ведет себя как частица, когда ударяет атом, вследствие чего вырывается электрон. Такая частица света называется *фотоном*. Электромагнитное взаимодействие, удерживающее электрон атома вблизи его ядра, может рассматриваться как непрерывный обмен фотонами между двумя телами. Мы говорим, что электромагнитное взаимодействие «переносится» фотонами.

Одним из наиболее успешных и далеко идущих достижений физики двадцатого века является теория взаимодействий между электронами и фотонами, называемая квантовой электродинамикой. Ее предсказания согласуются с экспериментальными данными до сверхъестественного уровня точности. В течение последних 25 лет физики сетуют на отсутствие теории, которая столь же точно и эффективно описала бы взаимодействие протонов и нейтронов в ядре.

П. А. М. Дирак впервые сформулировал теорию электрона в 1928 году, и центральным в его теории было предсказанное существование положительно заряженного электрона, имеющего ту же массу, что и обычный отрицательно заряженный электрон. Такая частица была открыта в 1932 году, и ее назвали *позитроном*. На церемонии вручения Нобелевской премии 1933 года Дирак сказал: «Теория электронов и позитронов, которую я только что описал, является самосогласованной теорией, соответствующей экспериментальным фактам, известным на данный момент. Хотелось бы иметь не менее удовлетворительную теорию и для протонов. Кто-то может подумать, что эту же теорию можно применить и к протонам. Но для этого потребовалось бы установить существование отрицательно заряженных протонов, образующих зеркальное отражение обычных протонов с положительным зарядом...».

Двадцать два года спустя отрицательно заряженный антипротон был создан и наблюдался на тогда самом большом в мире ускорителе частиц, находящемся в Беркли. Сейчас ученые считают, что каждой частице соответствует ее античастица, обладающая противоположными электрическими свойствами.

Такие античастицы на Земле нельзя обнаружить нигде, кроме как в физических лабораториях, так как основным свойством *антиматерии* является то, что обычная материя ее уничтожает.

В 1934 году японский физик Хидеки Юкава предположил, что между электрическими и ядерными взаимодействиями должна существовать глубокая аналогия. Он утверждал, что должна быть некоторая частица, переносящая ядерное взаимодействие точно так же, как фотон переносит электрическое взаимодействие. Эту гипотетическую частицу он назвал мезотроном, потому что ее предполагаемая масса находилась где-то между массой электрона и протона. Впоследствии это название сократилось до *мезона*. Сейчас словом мезон называют целый класс частиц, а частица, предсказанная Юкавой, называется *пионом*.

Всем казалось, что пион открыли в 1937 году благодаря космическим лучам. Космические лучи состоят из частиц, обладающих очень высокой энергией: обычно это протоны, передвигающиеся через открытое пространство. Время от времени они вторгаются в земную атмосферу, сталкиваясь в воздухе с атомами и создавая новые частицы. До появления больших ускорителей частиц нашим единственным окном в мир субъядерных явлений очень высокой энергии было изучение таких столкновений.

Большинство физиков сочли, что наблюдаемая частица и есть пион Юкавы и что его мезонная теория триумфально доказана опытом. Увы, все было не так. Обнаруженная тогда частица оказалась *мюоном* — явно страдающим ожирением электроном — и не имела абсолютно ничего общего с ядерным взаимодействием. Однако последним все же смеялся Юкава: в 1947 году предсказанная им частица наконец-то была открыта.

По мере того как физики более глубоко проникали в природу субатомных частиц, они нашли полезным разработать более сложные способы их классификации (смотри рисунок 1). Сейчас эти частицы делятся на два обширных класса: *адроны* и *лептоны*. Адроны — это частицы, участвующие в ядерном взаимодействии. Лептоны — это частицы, безразличные к ядерному взаимодействию.

Адроны подразделяются на три более мелких класса: *барионы, антибарионы* и мезоны. Барионы — это нуклоны: нейтроны, протоны

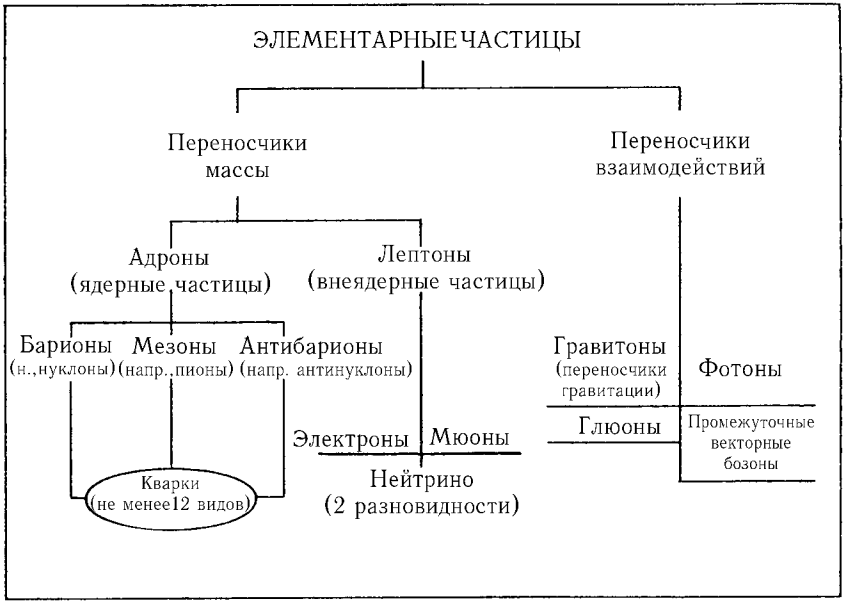


Рис. 1. Классификация элементарных частиц.

и некоторые другие ядерные частицы, — которые удовлетворяют принципу запрета, разработанному физиком Вольфгангом Паули. Этот принцип утверждает, что никакие два бариона не могут находиться в одинаковом состоянии в одно и то же время. Антибарионы являются античастицами барионов и также подчиняются правилу запрета. Мезоны, включая пион, — это адроны, не ограниченные принципом запрета: несколько таких частиц могут одновременно находиться в одном и том же состоянии.

Существует четыре вида лептонов: электроны, мюоны и две разновидности *нейтрино*, связанные с первыми и вторыми. Нейтрино — таинственные и неуловимые частицы, которые свободны не только от ядерных, но и от электрических взаимодействий. Гипотезу об их существовании выдвинул Паули в 1930 году, но обнаружили их только в 1957. Лептоны тоже подчиняются принципу Паули.

Таблица 1. Из микромира, в порядке появления (или непоявления)

Атом: Маленькое плотное ядро, окруженное гораздо большим электронным облаком.
Электрон: Истинно элементарная частица; имеет малую массу и переносит отрицательный электрический заряд.
Протон: Частица, найденная в ядре; переносит положительный электрический заряд.
Нейтрон: Частица, найденная в ядре; не обладает электрическим зарядом.
Нуклон: Протон или нейтрон.
Фотон: Электромагнитная сила, когда она ведет себя как частица, а не как волна.
Позитрон: Античастица электрона. Частица, имеющая массу электрона, но с противоположным зарядом.
Антиматерия: Материя, образованная античастицами, электрические свойства которых обратны свойствам обычных частиц.
Мезон: Один из трех классов адронов.
Пион: Самая легкая разновидность мезона. Создается при столкновениях нуклонов.
Мюон: Частица, очень похожая на электрон, но в 200 раз тяжелее.
Адрон: Частица, подверженная ядерному взаимодействию.
Лептон: Частица, безразличная к ядерному взаимодействию.
Барион: Адрон, удовлетворяющий «принципу запрета», который утверждает, что никакие две подобные частицы не могут находиться в одном и том же состоянии одновременно. Примером барионов являются нуклоны.
Антибарион: Античастица бариона.
Нейтрино: Разновидность лептона, свободная как от ядерного, так и от электрического взаимодействия.
Кварк: Гипотетическая элементарная частица, которая является составляющей всех адронов. Существуют u-кварки, d-кварки, s-кварки и, вероятно, c-кварки.
Антикварк: Античастица кварка.
Странная частица: Разновидность адрона, необычная вследствие своей долгой жизни.
Странный кварк (s-кварк): Обязательная составляющая всех странных частиц.
Цветовое взаимодействие: Взаимодействие, объединяющее кварки в частицы.
Цвет: Ненаблюдаемое, но необходимое свойство кварков.

Хромодинамика: Теория, описывающая цветовое взаимодействие.
Глюон: Термин, описывающий цветовое взаимодействие, когда оно ведет себя как частица (так же как фотон описывает электромагнитное взаимодействие, когда оно ведет себя как частица).
Слабое взаимодействие: Взаимодействие, вынуждающее некоторые частицы распадаться и превращаться в другие.
Промежуточный векторный бозон: Частица, «переносящая» слабое взаимодействие подобно глюону, переносящему цветовое взаимодействие.
Очарование: Абстрактное, но при этом наблюдаемое свойство четвертого кварка.
Чармоний: Адрон, состоящий из одного очарованного кварка и одного очарованного антикварка.
Очарованный адрон: Адрон, содержащий только один очарованный кварк или антикварк.

Дорогой способ узнать, из чего сделаны часы, заключается в том, чтобы ударить двое часов друг о друга и исследовать то, что при этом из них выпадет. Эта одна из нескольких методик, которыми мы располагаем для изучения структуры субатомных частиц, и именно с этой целью создаются «атомодробители», или, что более правильно, ускорители частиц. В этих устройствах потоки протонов или электронов направляются в электрические или магнитные поля, которые увеличивают их скорость до скорости, приближающейся к скорости света. Затем эти частицы выбрасываются и сталкиваются с покоящейся материей. Иногда эти столкновения приводят к рождению новых частиц, типа нейтронов, которые впоследствии могут быть использованы для бомбардировки других мишеней.

Когда нейтрон ударяется о протонную мишень, он может превратиться в протон и пион. А иногда протон, который был мишенью, распадается на нейтрон и пион. Можем ли мы рассматривать нейтрон как комбинацию протона и пиона, а протон — как комбинацию нейтрона и пиона? Чтобы еще больше запутать все дело, столкновение иногда приводит к созданию третьего нуклона — при столкновении двух часов о таком результате думать не приходится.

Эти явления привели к появлению понятия *ядерной демократии*, в рамках которой все субъядерные частицы считаются в равной степени элементарными. Грубо говоря, мы утверждаем, что каждый тип адрона состоит из комбинаций остальных. Сторонники этого взгляда не видят нужды в существовании маленького набора предельных строительных кирпичиков, из которых могут состоять все адроны.

В пятидесятых-шестидесятых годах двадцатого века мы стали свидетелями взрыва популяции адронов. По мере ввода в эксплуатацию

ускорителей, обладающих все более и более высокой энергией, в осколках столкновений частица-частица открывалось все больше адронов, причем они становились все более тяжелыми. В наше время известно около 200 адронов. Хотя большинство физиков согласились бы, что все эти частицы являются в равной степени элементарными, они также согласились бы и с тем, что все эти частицы, вероятно, вообще не являются элементарными.

Среди адронов появились некоторые модели. Правила, которым они подчиняются, были выдвинуты в 1961 году в рамках теории, названной «восьмеричным путем», которая требовала объединения адронов в четко определенные семейства. Согласно этим правилам все известные адроны объединяются в семейства, состоящие либо из одного члена, либо из восьми членов, либо из десяти членов.

Быть может, адроны вообще не элементарны, а состоят из более простых частиц. В 1963 году Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг предположили, что такие адронные составляющие существуют, и назвали их *кварками*, позаимствовав это название из непонятной строчки «Поминок по Финнегану»[1] («Три кварка Мистеру Марку!»). Было принято, что барионы состоят из трех кварков; антибарионы — из трех *антикварков*, а мезоны — из одного кварка и одного антикварка. Ни одна другая комбинация кварков не соответствовала наблюдаемым частицам. На основе различных масс и электрических зарядов кварков их представилось возможным разделить на два типа, которые назвали *u-кварками* и *d-кварками*. Двух видов кварков оказалось достаточно для образования нейтронов и протонов. Все, что находится в обыденном мире, состоит исключительно из этих двух разновидностей кварков, а также из электронов.

Но специалисты по физике частиц знакомы и с другими видами материи. В пятидесятых годах двадцатого века в осколках, образованных столкновениями космических лучей, было открыто несколько адронов. Они выказывали необычайно продолжительное время жизни: на распад у них уходило больше времени, чем у большинства адронов, причем распадались они по-разному и всегда весьма удивительным образом. Скоро их назвали *странными частицами*. В настоящее время их постоянно создают и получают на больших ускорителях. Чтобы объяснить эти частицы, необходимо постулировать существование третьего вида кварка, *странного кварка*.

Таким образом, именно трех этих разновидностей кварков — u, d и s — оказалось достаточно, чтобы создать все сотни адронов, кото-

[1]Последний роман Джеймса Джойса. — *Прим. пер.*

рые открывали до недавнего времени. В действительности, в этой теории сильнее всего смущал тот факт, что она превосходно работала. Количественные успехи, достигнутые этой теорией при описании деталей структуры адронов, намного превзошли то, что ожидали от столь наивной картины.

Однако существовала одна серьезная проблема: сам кварк обнаружен не был. Во многих лабораториях проводились детально разработанные поиски. Несмотря на умения экспериментаторов во всем мире и все их время, посвященное этим поискам, никто не видел ни одного кварка. Чтобы не отказываться от своего элегантного и полезного построения, физики-теоретики предложили замечательную новую теорию, согласно которой кварк невозможно увидеть *в принципе*. Его просто невозможно отделить от адрона, составляющей которого он является. Мезон, образованный кварком и антикварком, считается чем-то вроде магнита. Любая попытка отделить северный полюс магнита от его южного полюса обречена на неудачу. Разрежьте магнит пополам, и каждая его часть вновь станет полным магнитом с двумя полюсами: северным и южным. Точно также и любая попытка разделить составляющие мезона приводит к созданию нового кварка и антикварка. Вместо разделения кварков мы получим два мезона.

В поисках более глубоких уровней структуры материи мы сначала столкнулись с молекулами, состоящими из атомов, затем с атомами, состоящими из ядра и электронов, потом с ядрами, образованными адронами, и, наконец, с адронами, образованными кварками. Кварки кажутся действительно элементарными, ибо как мы можем изучить структуру частицы, которую мы не можем создать? Быть может, через невозможность обнаружения кварка природа дает нам знать, что мы достигли конца цепочки.

Гравитация — это единственное взаимодействие, которое имеет значение для движения планет и звезд. Для более мелких объектов, вроде нас, гравитация тоже важна, но основную роль все же играет электромагнетизм. Все, что мы видим, слышим, пробуем, осязаем или обоняем, есть лишь косвенное следствие основной электрической структуры материи. Сама жизнь, в конечном счете, является электромагнитным явлением, хотя и чрезвычайно сложным.

Третье природное взаимодействие необходимо для удержания нуклонов в атомном ядре. Оно не является следствием электромагнетизма. Когда-то это ядерное взаимодействие считали элементарным взаимодействием, аналогичным электромагнетизму, а его самым основным ядерным «клеем» считались мезоны. Сегодня мы полагаем, что и мезоны,

и нуклоны — это сложные системы, состоящие из кварков. Ядерное взаимодействие рассматривается только лишь как косвенное проявление более основного *цветового взаимодействия*, ответственного за постоянный «конфайнмент» кварков. *Цвет* используется в этом новом техническом смысле без какой-либо связи с обычным значением этого слова.

Теория, стоящая за цветовым взаимодействием, сложна и еще до конца не понята. Некоторые называют ее *хромодинамикой*. Необходимое требование хромодинамики состоит в том, что каждый вид кварков обладает тремя аспектами, названными цветами, которые связаны с тем, как этот кварк объединяется с другими кварками для образования более крупной частицы. Переносчики цветового взаимодействия — в том смысле, в каком фотоны являются переносчиками электромагнетизма, — называются *глюонами*. Когда кварк взаимодействует с глюоном, он может изменить свой цвет. Странное свойство хромодинамики заключается в том, что ни один из ее ингредиентов: ни кварк, ни глюон, ни даже цвет — не имеет никакого смысла вне адрона. Невозможно «показать существование» кварков и глюонов, как мы делаем это для других частиц. Барионы, образованные тремя кварками, содержат кварки трех разных цветов, вследствие чего «кажутся» бесцветными.

Тем не менее, для описания известного мира необходимо еще одно взаимодействие — *сильное взаимодействие*. Если цветовое взаимодействие удерживает ядро в целом состоянии, то слабое взаимодействие может стать причиной его распада. Оно является главным свойством радиоактивных атомных ядер. Ядра бывают радиоактивными в том случае, когда содержат слишком много нейтронов или протонов. Такие ядра ищут состояние равновесия, которого достигают после того, как некоторые их частицы распадаются, испускают лептоны, а также некоторое количество энергии, вследствие чего меняются и сами. Например, свободный нейтрон живет в среднем 10 минут, после чего испускает электрон и антинейтрино, превращаясь в протон.

Слабое взаимодействие — это как раз то взаимодействие, которое стоит за процессом распада, и, подобно гравитационному, электромагнитному и цветовому взаимодействию, оно необходимо для жизни. Оно вызывает ядерный распад, создающий энергию Солнца. Это взаимодействие обусловило синтез химических элементов, который имел место до рождения Земли. В отсутствие слабого взаимодействия Солнце, равно как и другие звезды, давным-давно погасло бы, а космический корабль под названием Земля, если бы и существовал вообще, был бы холодным и жутким местом, состоящим из чистого водорода.

В течение многих лет слабое, электромагнитное, ядерное и гравитационное взаимодействия казались абсолютно различными. Аспиранты

покупали четыре учебника, слушали четыре курса, а затем решали, по какому из взаимодействий они будут специализироваться. Все полагали, что такое состояние дел неудовлетворительно, и мечтали о теории, которая объединила бы все четыре взаимодействия. Эйнштейн провел последние годы своей жизни, пытаясь объединить гравитацию и электромагнетизм. Он потерпел неудачу, равно как и все его последователи.

Однако в настоящее время в объединении всех взаимодействий, за исключением гравитации, происходит некоторый прогресс. Последние теоретические достижения и экспериментальные результаты убеждают в том, что слабое взаимодействие и электромагнетизм — всего лишь разные аспекты одной теории. Предполагается, что носители слабого взаимодействия — это наблюдаемые частицы, называемые *промежуточными векторными бозонами* и имеющие массу примерно в сто раз превышающую массу протона. Существующие ускорители частиц обладают достаточной мощностью, чтобы создать и выявить эти предполагаемые частицы. Следующее поколение ускорителей — если общество сочтет уместным их создать — покажет нам, правилен ли этот великий синтез.

Если объединятся слабое и электромагнитное взаимодействия, намного ли от них отстанет цветовое-ядерное взаимодействие? Кажется, что единая теория всех взаимодействий, за исключением гравитации, почти у нас в руках. И, быть может, наступит тот день, когда мы сможем работать и с гравитацией и добьемся давно искомого сближения между небесным и земным мирами. И только тогда нам нужно будет задуматься над стоном Бертрана Рассела по поводу того, что физика «приближается к тому этапу, когда она подойдет к концу, а потому утратит интерес».

Известно, что природа использует три разновидности кварков (u, d и s), каждая из которых имеет три цвета. В количестве цветов мы уверены: как эксперимент, так и теория требуют, чтобы цветов было три. К сожалению, современная теория не достаточно эффективна, чтобы предсказать количество разновидностей кварков. А эксперимент говорит лишь то, что для описания известных адронов необходимы три кварка. Однако вполне могут существовать и другие виды кварков, образующие еще неоткрытые адроны.

Эстетические соображения привели нас с доктором Дж. Д. Бьеркеном к предположению существования четвертого кварка более десяти лет назад. Поскольку лептоны и кварки являются наиболее элементарными и поскольку существует четыре разновидности лептонов, не должны ли так же быть и четыре разновидности кварков? Свое создание мы назвали *очарованным кварком*, ибо мы были очарованы и довольны симметрией, которую он привносил в субатомный мир.

Доводы в пользу *очарования* — или четвертого кварка — стали гораздо более прочными, когда мы поняли, что в современной трехкварковой теории, которая предсказывала, что странные частицы иногда должны распадаться таким образом, каким они никогда не распадались, присутствует серьезный недостаток. Почти как по волшебству существование четвертого кварка запрещает эти нежелательные распады и приводит теорию в согласие с экспериментом. Таким образом, мои последние коллеги, Джон Илиопулос, Лучано Майани, и я обосновываем другое определение очарования как волшебного устройства для предотвращения зла.

К весне 1974 года многие физики убедились в необходимости существования очарования и адронов, содержащих очарованные кварки. Илиопулос заключал пари на несколько ящиков хорошего вина о том, что его открытие неминуемо; я предложил съесть свою шляпу, если этот кварк не получит экспериментального подтверждения в течение двух лет. Писались длинные статьи, объясняющие, как лучше всего искать очарование.

Первое великое экспериментальное откровение произошло в ноябре 1974 года, причем новый адрон открыли одновременно в Брукхейвенской национальной лаборатории и в Стэнфордском центре линейного ускорения частиц. Сегодня все (но не единогласно) принимают, что новый адрон состоит из одного очарованного кварка и одного очарованного антикварка. Теория очарования требовала, чтобы новый адрон являлся членом семейства частиц, и предсказала приблизительные свойства других его членов. Весной 1975 года экспериментаторы ответили на это открытием предсказанных частиц, тем самым опять подтвердив теорию очарования.

Оригинальный новый адрон люди, его открывшие, называют поразному: J или ψ. Некоторые теоретики, проталкивающие аналогию с позитронием, который является «атомом», состоящим из электрона и позитрона, называют его *чармонием*[1]. (Другие, не в силах сдержать восторг, предлагают назвать его «pandemonium»[2].)

Открытие чармония было событием чрезвычайной важности в физике элементарных частиц. В течение многих лет не происходило события столь волнующего. Для тех, кто верит в кварки, новая частица была первым экспериментальным указанием на реальное существование четвертого кварка. Успешная интерпретация чармония как частицы, образованной комбинацией кварка и антикварка, вместе с невозможностью

[1]В английском языке «очарование» — charm, отсюда производное charmonium — «чармоний». — *Прим. пер.*

[2]Ад, обитель демонов. — *Прим. пер.*

найти привлекательную альтернативную гипотезу, привела многих сомневающихся к пониманию своих ошибок. В результате открытия ψ-J и ее семейства кварковая модель стала ортодоксальной философией.

Согласно правилам игры очарованный кварк должен обладать способностью объединяться с новыми кварками, образуя новый вид материи, а также со своей собственной античастицей, образуя чармоний. *Очарованные адроны* — это адроны, содержащие всего один очарованный кварк или антикварк, и в настоящее время проводятся или придумываются эксперименты с целью их обнаружения.

Если эта теория правильна, то столкновения нейтрино, обладающих очень высокой энергией, с атомными ядрами время от времени должны создавать очарованные частицы. Никто не ждет, что эти частицы будут стабильными; из-за слабого взаимодействия они должны распадаться на другие частицы, оставляя характеристические сигналы своего кратковременного существования. Если столкновение наблюдается в пузырьковой или искровой камере, то продукты распада очарованной частицы можно распознать. За два последних десятилетия в лабораториях как этой страны, так и других скопились подобные косвенные свидетельства существования очарованных частиц. Наблюдалось нечто новое и волнующее, но было ли это именно очарование, оставалось неясным до совсем недавнего времени.

Именно при высокоэнергетических столкновениях электронов с позитронами, движущимися в противоположных направлениях, физики предвосхитили обильное создание очарованных частиц. Существует всего две лаборатории, где можно провести подобный эксперимент: это SPEAR в Стэнфорде, Калифорния, и DORIS в Гамбурге, Германия. Восьмого мая 1976 года Герсон Гольдхабер — один из группы ученых, работающих в SPEAR, — позвонил мне, чтобы сообщить, что наконец-то найдены убедительные доказательства существования очарованной частицы. Эта частица выказывала именно те свойства, которые были предсказаны. Информация была передана мне конфиденциально, так как экспериментаторы еще не были готовы объявить о своем открытии. Я мог сделать все, что угодно, но только не хранить эту тайну. Как-никак, вино Джона и моя шляпа были спасены как раз вовремя. Теперь у экспериментаторов полно работы на несколько лет: они будут искать другие очарованные частицы и заносить их свойства в каталоги.

Филип Хандлер, президент Национальной академии наук, всего лишь в прошлом месяце написал, что за последние 30 лет «люди впервые узнали природу жизни, строение космоса и силы, которые формируют планету, хотя внутренняя область ядра, если с ней вообще что-то произошло, стала еще более загадочной». Эта мрачная оценка моей дисциплины не совсем современна. Когда было найдено очарование, многие

якобы несвязанные кусочки субъядерной головоломки — кварки, цвет, теории объединения — образовали одно целое, и, судя по всему, мы приближаемся к новому синтезу.

Завершив экскурсию по субъядерным джунглям, мы должны заглянуть в будущее. Исходя из принципов педагогики, а также из своего личного убеждения, я сказал, что появляется концептуально простая и эмпирически правильная теория микромира. Это мы еще увидим.

Нам еще предстоит обширный теоретический анализ. Удержание кварка цветовым взаимодействием представляется слишком хорошей идей, чтобы не быть истиной, но ее состоятельность необходимо доказать. Кроме того, без ответа остаются насущные экспериментальные вопросы. Будут ли очарованные частицы вести себя в точности так, как это предсказывает теория? Достаточно ли четырех кварков или нам понадобится еще? Будут ли найдены промежуточные векторные бозоны?[1]

Эти, да и другие «технические вопросы» получат ответ в течение ближайших лет, а мы допустим, что эти ответы подтвердят общую картину мира, которую мы набросали. Но даже тогда история будет далека от своего завершения. Да, адроны состоят из кварков точно так же, как ядра состоят из адронов. Мы спустились еще на один уровень в микромире. Но даже всего четыре кварка, каждый из которых имеет три цвета — и, по крайней мере, четыре лептона, которые им помогают, — кажутся слишком большим количеством, чтобы быть воистину основными.

Последние теоретические достижения были чрезвычайно консервативными, так как они основаны почти исключительно на концептуальных разработках первой трети этого века: квантовой механике и специальной теории относительности Эйнштейна. Ничто, сделанное в физике с тех пор, не сравнится с величием этих достижений. Но мы не можем всерьез верить в то, что природа истощила запас своих трюков. Такие перевороты будут снова. Быть может, семена следующего из них нужно искать в загадочных и незавершенных теориях современности.

[1] *Примечание автора.* Ответы на эти вопросы уже получены. Очарованные частицы ведут себя именно так, как было предсказано. Существует не четыре разновидности кварков, а шесть. Промежуточные векторные бозоны были найдены.

Кварки с цветом и ароматом

Atomos, греческий корень слова «атом», означает неделимый, и было время, когда атомы считали предельными, неделимыми составляющими материи, то есть их рассматривали как элементарные частицы. Одним из главных достижений физики в двадцатом веке было истинное откровение, заключавшееся в том, что атом вовсе не является неделимым или элементарным, но обладает сложной структурой. В 1911 году Эрнест Резерфорд показал, что атом состоит из маленького плотного ядра, окруженного электронным облаком. Впоследствии оказалось, что само ядро можно разделить на дискретные частицы: протоны и нейтроны, — а с тех пор было найдено много родственных им частиц. В ходе прошедшего десятилетия стало ясно, что эти частицы являются скорее составными, нежели элементарными. Сейчас считается, что они состоят из более простых объектов, называемых кварками. Одиночный кварк никогда не наблюдался, несмотря на многочисленные попытки его выделить. Тем не менее, существуют веские причины полагать, что кварки реальны и, что еще более важно, они могут оказаться последним звеном долгой последовательности все более мелких структур. Они кажутся действительно элементарными.

Когда гипотеза кварка была предложена впервые, считалось, что существует три вида кварков. Исправленный вариант теории, который я опишу здесь, требует существования 12 видов. Согласно весьма эксцентричной терминологии, возникшей для обсуждения кварков, они имеют четыре аромата, каждый из которых обладает тремя цветами. (Ясно, что «аромат» и «цвет» — произвольные названия; они никак не связаны с реальным значением этих слов в повседневной жизни.) Один из ароматов кварка отличается свойством, названным очарованием (еще один произвольный термин). Концепция очарования была предложена в 1964 году, но в течение некоторого времени оставалась всего лишь непроверенной гипотезой. Несколько экспериментальных находок, включая открытие частиц, называемых J, или ψ, можно интерпретировать как доказательство гипотезы очарования.

Основная идея, состоящая в том, что субатомные частицы образованы кварками, завоевала всеобщее принятие даже в отсутствие прямых экспериментальных доказательств. Более детальная теория, включающая цвет и очарование, остается гораздо более гипотетической. Здесь

я представляю исключительно свои собственные взгляды, а они далеки от догмы, принятой в настоящее время. С другой стороны, растущее количество экспериментальных данных говорит о том, что эти новые концепции должны играть некоторую роль в описании природы. Они помогают свести воедино многие, на первый взгляд, несвязанные теоретические разработки, вследствие чего возникает изысканная картина структуры материи. Действительно, кварки являются одновременно самым полезным и самым таинственным созданием современной физики частиц. Им замечательно удается объяснить структуру субатомных частиц, но мы пока не понимаем, почему им так хорошо это удается.

Частицы, состоящие из кварков, образуют класс, называемый адронами. Только эти частицы проявляют «сильное» взаимодействие. Сюда же входят протоны и нейтроны, и, в действительности, именно сильное взаимодействие связывает протоны и нейтроны, вследствие чего они образуют атомное ядро. Сильным взаимодействием обусловлен и быстрый распад многих адронов.

Другим классом частиц, определенным в противоположность адронам, являются лептоны. Их всего четыре: электрон и электронное нейтрино, а также мюон и мюонное нейтрино (и их четыре античастицы). Лептоны не подвержены сильному взаимодействию. Поскольку электрон и мюон переносят электрический заряд, они «чувствуют» электромагнитное взаимодействие, которое примерно в 100 раз слабее сильного взаимодействия. Две разновидности нейтрино, не обладающие электрическим зарядом, не чувствуют ни сильного, ни электромагнитного взаимодействий, но, тем не менее, между ними существует третья разновидность взаимодействия, называемого слабым и меньшего на несколько порядков. Считается, что сильное, электромагнитное и слабое взаимодействие, наряду с гравитацией, — это все возможные взаимодействия материи.

Лептоны проявляют все признаки элементарных частиц. Электрон, к примеру, ведет себя как точечный заряд, и даже когда его зондируют при энергиях больших ускорителей частиц, он не выказывает никакой внутренней структуры. Адроны же, напротив, кажутся составными. Они обладают измеримым размером: около 10^{-13} сантиметра. Более того, существуют сотни адронов. И наконец, все адроны, за важным исключением протона и антипротона, по одиночке являются нестабильными. Они распадаются на стабильные частицы типа протонов, электронов, нейтрино или фотонов. (Фотон, переносчик электромагнитного взаимодействия, — это вообще отдельная категория; он не является ни лептоном, ни адроном.)

Адроны подразделяются на три семейства: барионы, антибарионы и мезоны. Барионы включают протон и нейтрон; мезоны содержат ча-

стицы типа пиона. Барионы не могут ни создаваться, ни разрушаться, за исключением тех случаев, когда они существуют в парах барион-антибарион. Этот принцип определяет закон сохранения, и наиболее удобно работать с ним по системе бухгалтерского учета, согласно которой сохраненным свойствам приписываются простые численные значения, называемые *квантовыми числами*. В данном случае квантовое число называется *барионным числом*. Для барионов оно равно +1, для антибарионов — −1, а для мезонов — 0. Таким образом, сохранение барионного числа сводится к правилу, что при любом взаимодействии сумма барионных чисел не меняется.

Благодаря барионному числу барионы можно отличить от мезонов, однако это искусственное средство, которое ничего не говорит нам о свойствах двух видов частицы. Более выразительное отличие можно установить, исследуя другое квантовое число: *спиновый момент*.

Согласно правилам квантовой механики частица, или система частиц, может находиться только в строго определенных состояниях вращения, а потому она может иметь только дискретные значения углового момента. Угловой момент измеряется в единицах $h/2\pi$, где h — это постоянная Планка, равная примерно $6,6 \times 10^{-27}$ эрг-секунд. Барионы — это частицы со спиновым моментом, измеренным в полуцелых единицах, то есть со значениями половины нечетного целого числа, например, 1/2 или 3/2. Мезоны имеют целые значения спинового момента, например, 0 или 1.

Разница в спиновых моментах имеет важные следствия для поведения двух видов адронов. Говорят, что частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна (и потому называются бозонами). Частицы же, обладающие полуцелым спином, подчиняются статистике Ферми – Дирака (и называются фермионами). В данном контексте слово «статистика» относится к поведению популяции идентичных частиц. Частицы, которые подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна, можно привести в одно состояние без каких-либо ограничений; например, неограниченное количество пионов может находиться в одном и том же состоянии. Статистика Ферми – Дирака, напротив, утверждает, что никакие две частицы в пределах данной системы не обладают одинаковой энергией и не являются идентичными по всем своим квантовым числам. Это утверждение эквивалентно принципу запрета, который в 1925 году сформулировал Вольфганг Паули. Он применял свой принцип, в частности, к электронам, спин которых равен 1/2, вследствие чего они являются фермионами. Принцип запрета требует, чтобы на каждом энергетическом уровне атома находилось только два электрона, а их спины имели противоположное направление.

Один из ключей к сложной природе адронов состоит в их большом количестве. Бóльшая часть стремления понять их состояла в поиске некоторого упорядочивающего принципа, который объяснил бы столь большое их количество.

Впервые адроны были распределены на небольшие семейства частиц, называемые зарядовыми или изотопическими мультиплетами. Каждый мультиплет состоит из частиц, имеющих приблизительно одинаковую массу и идентичных по всем трем оставшимся свойствам, кроме электрического заряда. Мультиплеты могут состоять из одного, двух, трех или четырех членов. Протон и нейтрон образуют двойной мультиплет (дублет); обе эти частицы считаются проявлениями одного состояния материи, нуклона, со средней массой, эквивалентной энергии в 0,939 ГэВ (миллиард электрон-вольт). Пион — это триплет, имеющий среднюю массу, эквивалентную энергии в 0,137 ГэВ, и три состояния заряда: +1, 0 и -1. При сильных взаимодействиях все члены мультиплета эквивалентны, поскольку в такого рода взаимодействиях электрический заряд не играет никакой роли.

В 1962 году был открыт еще более строгий порядок: зарядовые мультиплеты были организованы в «супермультиплеты», раскрывавшие отношения между частицами, которые отличаются не только зарядом, но и другими свойствами. Супермультиплеты были предложены независимо Мюрреем Гелл-Манном из Калифорнийского технологического института и Ювалем Нееманом из университета Тель-Авива. Введение новой системы привело к появлению гипотезы кварков.

Группирование адронов в супермультиплеты включает восемь квантовых чисел и называется «восьмеричным путем». Его математической основой является раздел теории групп, изобретенный в девятнадцатом веке норвежским математиком Софусом Ли. Группа Ли, на которой основан восьмеричный путь, называется $SU(3)$, что означает *специальная унитарная группа матриц размера* 3×3. Теория требует, чтобы все адроны принадлежали к семействам, соответствующим представлениям группы $SU(3)$. Семейства могут включать одного члена, трех, шестерых, восьмерых, десятерых или еще больше членов. Если бы восьмеричный путь представлял собой точную теорию, то все члены любого семейства имели бы равную массу. Однако восьмеричный путь — не более чем аппроксимация, поэтому внутри семейств наблюдаются значительные отличия по массе.

Построение восьмеричного пути начинается с классификации адронов на обширные семейства, обладающие общим значением спинового момента. Каждое семейство частиц с идентичным спином затем описывается построением распределения еще двух квантовых чисел: *изотопического спина* и *странности*.

Изотопический спин не имеет ничего общего со спином частицы; он получил такое название, потому что обладает определенными алгебраическими свойствами, которые проявляет также и спиновое квантовое число. Это мера количества частиц в мультиплете, которая вычисляется по формуле, гласящей, что количество частиц в мультиплете на единицу больше удвоенного значения изотопического спина. Таким образом, нуклон (дублет) имеет изотопический спин, равный 1/2; а изотопический спин пионного триплета равен 1.

Странность — это квантовое число, введенное для описания некоторых адронов, которые впервые наблюдались в пятидесятых годах и были названы странными частицами из-за ненормально долгого времени их жизни. Обыкновенно они распадаются через период времени между 10^{-10} и 10^{-7} секунды. Хотя по обыденным нормам это очень короткий промежуток времени, он все же намного превышает время жизни многих других адронов, равное 10^{-23} секундам.

Как и изотопический спин, странность зависит от свойств мультиплета, но измеряет не количество частиц, а распределение заряда между ними. Квантовое число странности равно удвоенному среднему заряду (сумма зарядов, поделенная на количество частиц в мультиплете) минус барионное число. Благодаря этой хитрости данное число равно нулю для всех адронов, кроме странных. Триплет пионов, например, имеет средний заряд, равный 0, и барионное число, равное 0; следовательно его странность также равна 0. Нуклонный дублет имеет средний заряд, равный +1/2, и барионное число +1, поэтому странность нуклонов также равна 0. С другой стороны, лямбда-частица — это нейтральный барион, образующий семейство из одного члена (синглет). Его средний заряд, равный 0, и барионное число, равное +1, дает странность, равную -1.

На графике зависимости странности от электрического заряда адроны образуют упорядоченные массивы. Мезоны со спиновым моментом, равным 0, образуют *октет* и *синглет*; октет графически представлен в виде шестиугольника, в каждой вершине которого расположена одна частица, а в центре — две. Синглет представлен точкой в его начале. Мезоны с единичным спином образуют идентичное представление, равно как и барионы со спином, равным 1/2. Наконец, барионы со спином, равным 3/2, образуют *декуплет* (группу из 10), который графически можно представить как большой треугольник, образованный из синглета, дублета, триплета и квартета. Сначала восьмеричный путь встретили с некоторым скептицизмом, однако открытие в 1964 году отрицательно заряженной омега-частицы — синглета, предсказанного в барионном декуплете, заставило нас всех изменить свое мнение.

Закономерность и экономичность супермультиплетов являются удовлетворительными с точки зрения эстетики, но в то же время они оста-

ются весьма загадочными. Все известные адроны, без исключения, действительно абсолютно точно соответствуют этим семействам. Мезоны появляются исключительно семействами, состоящими из одного и восьми, а барионы — семействами по одному, восьми и десяти. Однако синглет, октет и декуплет — это лишь несколько возможных представлений группы SU(3). Семейства, состоящие из трех или шести частиц, полностью правдоподобны, но не наблюдаются. В действительности разнообразие возможных семейств, в принципе, бесконечно. Так почему же в природе появляются всего три представления? Очень быстро стало ясно, что несмотря на то, что восьмеричный путь, в некотором приближенном смысле, правилен, с самого начала все понимали, что история на нем не заканчивается.

В 1963 году появилось некоторое объяснение: его независимо друг от друга предложили Гелл-Манн и Джордж Цвейг, который также работал в Калифорнийском технологическом институте. Они поняли, что неожиданные закономерности можно было бы объяснить, если бы все адроны состояли из гораздо более элементарных частиц, которые Гелл-Манн назвал кварками. Кварки должны были принадлежать к простейшему, нетривиальному семейству восьмеричного пути: семейству из трех. (Также есть и другое семейство, состоящее из трех антикварков.)

Кварки должны обладать достаточно специфическими свойствами, главным из которых является их электрический заряд. Все без исключения наблюдаемые частицы переносят целые значения, кратные заряду электрона; однако кварки должные иметь заряды, равные долям зарядам электрона. Гелл-Манн обозначил три кварка за u, d и s: от произвольных названий «up», «down» и «sideways»[1].

Механика первоначальной модели кварка полностью определяется тремя простыми правилами. Мезоны неизменно состоят из одного кварка и одного антикварка. Барионы неизменно образованы тремя кварками, а антибарионы — тремя антикварками. Никакая другая комбинация кварков не может существовать в виде адрона. Комбинаций трех кварков при таких правилах было достаточно, чтобы объяснить все наблюдавшиеся или предсказанные в то время адроны. Более того, каждая разрешенная комбинация кварков дает известную частицу.

Многие необходимые свойства кварков можно вывести из этих правил. Например, каждому кварку необходимо приписать барионное число, равное +1/3, а каждому антикварку — барионное число, равное -1/3. Таким образом, любая совокупность трех кварков имеет общее барионное число, равное +1, а потому определяет барион; три антикварка дают

[1]Вверх, вниз, в сторону (англ.) — *Прим. пер.*

частицу с барионным числом, равным -1, — антибарион. Для мезонов барионные числа кварков (+1/3 и -1/3) взаимоуничтожаются, так что мезон, как и требуется, имеет барионное число, равное 0.

Аналогичным образом, угловой момент адронов описывается с помощью придания кваркам полуцелых единиц спина. Частица, состоящая из нечетного количества кварков, типа бариона, вследствие этого должна иметь полуцелый спин, подчиняющийся известным характеристикам барионов. Частица, образованная четным количеством кварков, например, мезон, должна иметь целый спин.

U-кварк и s-кварк образуют изотопический дублет: они имеют примерно одинаковую массу и весьма похожи по всем другим свойствам, за исключением электрического заряда. U-кварку отводится заряд, равный +2/3, а d-кварку — заряд, равный -1/3. Таким образом, средний заряд дублета равен +1/6 и, соответственно, удвоенный средний заряд — +1/3; поскольку барионное число всех кварков равно +1/3, то, по определению, u- и d-кварки имеют нулевую странность. S-кварк весит больше, чем u или d, и образует изотопический синглет. Его электрический заряд равен -1/3, следовательно, его странность равна -1. Антикварки, которые на письме обозначаются чертой над символом кварка, имеют противоположные свойства. $\bar{U}$ имеет заряд, равный -2/3, а $\bar{d}$ — +1/3; странность у обоих нулевая. Заряд $\bar{s}$-антикварка равен +1/3, а странность — +1.

Всего двух кварков, u и d, достаточно, чтобы объяснить структуру всех адронов, которые встречаются в обыкновенной материи. Протон, к примеру, можно описать как совокупность двух u-кварков и одного d-кварка; его состав записывается как uud. Быстрый анализ покажет, что все свойства протона, определенные его кварковым составом, согласуются с измеренными величинами. Его заряд равен $2/3 + 2/3 - 1/3$, или +1. Аналогичным образом можно показать, что его барионное число равно +1, а его спин — 1/2. Положительный пион состоит из u-кварка и $\bar{d}$-антикварка (пишется $u\bar{d}$). Его заряд равен $2/3 + 1/3$, или +1; его спин и барионное число равны нулю.

Третий кварк, s, необходим исключительно для создания странных частиц и действительно дает явное определение странности: странная частица — это частица, содержащая, по крайней мере, один s-кварк, или $\bar{s}$-антикварк. Например, исходя из распределения заряда мультиплета лямбда-бариона, можно показать, что его странность равна -1; этот результат подтверждается его кварковым составом: uds. Точно также нейтральный К-мезон, странная частица, имеет странность +1, что и подтверждает ее состав $d\bar{s}$.

До совсем недавнего времени трех видов кварков казалось достаточно для описания всех известных адронов. Однако эксперименты показывают, что некоторые адроны невозможно объяснить через три исходных

кварка. Эксперименты говорят о существовании четвертого вида кварка, называемого очарованным кварком и обозначаемого c.

Утверждение о том, что u-, d- и s-кварков достаточно, чтобы создать все наблюдаемые адроны, можно уточнить с помощью математического формализма восьмеричного пути. Поскольку мезон состоит из одного кварка и одного антикварка и поскольку существует три вида, или три аромата, кварков, значит, возможны девять комбинаций кварков и антикварков, которые могут образовать мезон. Можно показать, что одна из этих комбинаций представляет синглет, а оставшиеся восемь образуют октет. Аналогично, поскольку барион образован тремя кварками, возможны 27 комбинаций кварков, в результате которых образуется барион. Их можно разбить на синглет, два октета и декуплет. Эти группировки в точности соответствуют наблюдаемым семействам адронов. Таким образом, кварковая теория объясняет, почему лишь несколько возможных представлений $SU(3)$ реализуется в природе в виде супермультиплетов адронов.

Кварковые правила позволяют дать замечательно краткое объяснение образования наблюдаемых семейств адронов. Но какие принципы могут объяснить сами кварковые правила, которые выглядят достаточно произвольными? Почему объединяются три кварка, а не два или четыре? Почему мы не можем создать отдельный кварк? Линия рассуждений, приводящая к ответам на эти вопросы, поначалу казалась недостатком кварковой теории.

Как мы уже видели, кварки должны иметь полуцелые значения спинового момента; в противном случае, известные спины барионов и мезонов были бы предсказаны неверно. Частицы с полуцелым спином должны подчиняться статистике Ферми – Дирака, а следовательно, они подвержены действию принципа запрета Паули: никакие две частицы в пределах конкретной системы не могут иметь точно одинаковых квантовых чисел. При создании бариона зачастую необходимо, чтобы два идентичных кварка находились в одном и том же состоянии. Омега-частица, например, состоит из трех s-кварков, причем все эти кварки должны находиться в одном и том же состоянии. Это возможно только для частиц, которые подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна. Мы оказались в тупике: кварки должны иметь полуцелый спин, но при этом они должны удовлетворять статистике, которой подчиняются частицы, имеющие целый спин.

Связь спина со статистикой являет собой непоколебимый принцип релятивистской квантовой механики. Его можно вывести непосредственно из теории, и его нарушений никогда не наблюдалось. Поскольку он справедлив для всех других известных частиц, кварки невозможно разумным образом исключить из области его господства.

Концепция, оказавшаяся необходимой для решения проблем кварковой статистики, была предложена в 1964 году Оскаром В. Гринбергом из университета Мэриленда. Он предположил, что каждый аромат кварка имеет три разновидности, равные по массе, спину, электрическому заряду и всем прочим измеримым величинам, но различные по дополнительному свойству, которое стало известно под названием цвета. Тогда можно было удовлетворить принципу исключения, и кварки могли оставаться фермионами, потому что в таком случае не все кварки в барионе занимали бы одно и то же состояние. Кварки могут отличаться по цвету, даже если все остальные их свойства абсолютно одинаковы.

Гипотеза о цвете требует введения двух дополнительных кварковых правил. Первое просто-напросто вновь формулирует условие, для удовлетворения которого был введен кварк: барионы должны состоять из трех кварков, обладающих разными цветами. Второе правило описывает применение цвета к мезонам: мезоны состоят из кварка и антикварка одного цвета, но с равным представлением каждого из трех цветов. Действие этих правил состоит в том, что ни один адрон не может выказать общий цвет. Барион неизменно содержит кварки каждого из трех цветов, скажем, красный, желтый и синий. В мезоне можно представить кварк и антикварк как имеющие один цвет в любой данный момент времени, но постоянно и одновременно изменяющие свой цвет, так что за любой измеримый промежуток времени они оба проведут равные отрезки времени в виде красных, синих и желтых кварков.

Ценой гипотезы о цвете стало увеличение количества кварков втрое; вместо трех их стало девять (при этом нельзя забывать об очаровании). На первый взгляд может показаться, что мы намного увеличили количество адронов, но это всего лишь иллюзия. При наличии цвета кажется, будто мезонов стало в девять раз больше, а барионов — в 27 раз больше, но правила создания адронов из цветных кварков гарантируют, что не наблюдается ни одна дополнительная частица.

Хотя кварковые правила утверждают, что мы никогда не увидим цветную частицу, гипотеза о цвете не является простым формальным построением, не обладающим какой-либо предсказательной ценностью. Увеличение количества кварков, которого она требует, можно обнаружить, как минимум, двумя способами. Один из способов — через действие цвета на время жизни нейтрального пиона, который почти всегда распадается на два фотона. Стивен Л. Адлер из Института перспективных исследований показал, что скорость его распада зависит от квадрата числа цветов кварка. При допущении существования трех цветов получается наблюдаемое время его жизни.

Другое действие цвета можно обнаружить при экспериментах, в ходе которых электроны и их античастицы, позитроны, аннигилируют при

высоких энергиях. В результате такого события иногда появляется группа адронов, а иногда мюон и антимюон. При достаточно высокой энергии отношение количества адронов к количеству мюон-антимюонных пар должно приближаться к постоянному значению, равному сумме квадратов зарядов кварков. При тройном увеличении числа кварков втрое увеличивается и ожидаемое значение этого отношения. Экспериментальный результат при энергиях от 2 ГэВ до 3 ГэВ разумным образом согласуется с гипотезой о цвете (которая предсказывает значение 2) и практически несовместим с исходной теорией, в которой кварки не обладают цветом.

Введение цветового квантового числа решает проблему кварковой статистики, но опять-таки требует существования набора правил, которые кажутся произвольными. Однако эти правила можно объяснить, устанавливая другую гипотетическую группу симметрии, аналогичную группе $SU(3)$, предложенной Гелл-Манном и Нееманом. Первая группа $SU(3)$ касается исключительно комбинаций трех ароматов кварков; новая же группа связана только с тремя цветами кварков. Более того, в отличие от ранней теории, которая достаточно приблизительна, $SU(3)$-цвет считается точной симметрией, так что кварки одного аромата, но различного цвета будут иметь одинаковые массы.

В цветовой $SU(3)$-теории все кварковые правила можно объяснить, приняв один постулат: все адроны должны быть представлены цветовыми синглетами; бóльших мультиплетов быть не может. Цветовой синглет можно построить двумя способами: объединяя кварк и антикварк одного цвета со всеми тремя цветами, представленными в равной степени, или объединяя три кварка или три антикварка так, чтобы в комбинацию вошли все три цвета. Эти условия эквивалентны правилам построения мезонов, барионов и антибарионов; они гарантируют, что все адроны будут бесцветны. Не существует других способов сделать синглет $SU(3)$-цвета; частица, созданная любым другим способом, стала бы членом большего мультиплета и имела бы конкретный цвет.

Несмотря на то, что цветовая $SU(3)$-теория адронов может объяснить кварковые правила, она не может полностью исключить из их природы элемент произвольности. Мы можем задать по-прежнему более фундаментальный вопрос: Как объясняется постулат о том, что все адроны должны быть цветовыми синглетами? Один из подходов к ответу на него, явно гипотетический, предлагали многие исследователи; он включает цветовую $SU(3)$-модель адронов в один из классов теорий, называемых *калибровочными*.

Цветовая калибровочная теория постулирует существование восьми безмассовых частиц, иногда называемых глюонами, которые являются переносчиками сильного взаимодействия, точно так же как фотон явля-

ется переносчиком электромагнитного взаимодействия. Подобно фотону, эти частицы не имеют электрического заряда, но имеют спин, равный 1; вследствие этого они называются *векторными бозонами* (бозонами, потому что имеют целый спин и подчиняются статистике Бозе – Эйнштена, а векторными, потому что частица со спином 1 описывается волновой функцией, принимающей вид четырехмерного вектора). Глюоны, подобно кваркам, экспериментально обнаружены не были.

Когда кварк испускает или поглощает глюон, изменяется цвет кварка, но не его аромат. Например, эмиссия глюона может преобразовать красный u-кварк в синий или желтый u-кварк, но не может превратить его в d- или s-кварк любого цвета. Поскольку цветовые глюоны являются квантами сильного взаимодействия, отсюда следует, что цвет является аспектом кварков, который наиболее важен при сильных взаимодействиях. На самом деле, при описании только сильных взаимодействий ароматами кварков, в сущности, можно пренебречь.

Цветовая калибровочная теория предполагает, что сила, связывающая воедино цветные кварки, представляет собой истинный характер сильного взаимодействия. Более знакомые сильные взаимодействия адронов (типа объединения протонов и нейтронов в ядро) являются проявлениями одной и той же основной силы, но взаимодействия бесцветных адронов являются не более чем слабым следом основного взаимодействия между цветными кварками. Точно так же как сила Ван дер Ваальса, действующая между молекулами, является лишь слабым следом электромагнитного взаимодействия, связывающего электроны с ядрами, сильное взаимодействие, наблюдаемое между адронами, — не более чем след взаимодействия, существующего внутри отдельного адрона.

Из этих теоретических аргументов можно вывести интригующее, если не гипотетическое, объяснение конфайнмента кварков. Его сформулировали Джон Когут и Кеннет Вильсон из Корнеллского университета, а также Леонард Зускинд из университета Йешивы. Если оно окажется правильным, то будет доказано, что невозможность наблюдения цветных частиц (типа отдельных кварков и глюонов) не является результатом какого-бы то ни было недостатка эксперимента, а прямо следует из природы сильного взаимодействия.

Электромагнитная сила между двумя заряженными частицами описывается законом Кулона: сила уменьшается с увеличением квадрата расстояния между зарядами. Гравитация подчиняется в принципе похожему закону. На больших расстояниях эти силы убывают до пренебрежимо малых значений. Когут, Вильсон и Зускинд утверждают, что сильное взаимодействие между двумя цветным кварками ведет себя совсем иначе: оно не уменьшается с увеличением расстояния, а остается постоянным вне зависимости от расстояния, разделяющего кварки. Ес-

ли их аргумент правилен, то для отделения кварка понадобилось бы огромное количество энергии.

Чтобы выделить электрон из валентной оболочки атома, необходимо несколько электрон-вольт энергии. Расщепление атомного ядра требует несколько миллионов электрон-вольт. В отличие от этих значений отделение кварка от протона, составляющим которого он является, всего на один дюйм потребовало бы 10^{13} ГэВ — этой энергии было бы достаточно, чтобы поднять автора над Землей футов на 30. Но задолго до достижения такого уровня энергии вмешался бы другой процесс. Из энергии, поставленной для выделения одного кварка, материализовались бы новые кварк и антикварк. Новый кварк занял бы в протоне место удаленного, и частица была бы восстановлена. Новый антикварк прицепился бы к вытесненному кварку, образуя мезон. Вместо отделения цветного кварка мы добились бы лишь создания бесцветного мезона. Этот механизм не дает нам увидеть отдельный кварк, отдельный глюон или любую комбинацию кварков или глюонов, которая имела бы цвет.

Если такая интерпретация конфайнмента кварка правильна, то она обеспечивает оригинальный способ завершения якобы бесконечной регрессии все более мелких структур материи. Атомы можно разложить на электроны и ядра, ядра — на протоны и нейтроны, протоны и нейтроны — на кварки, но теория конфайнмента кварка говорит о том, что здесь цепочка прерывается. Сложно представить, каким образом частица может иметь внутреннюю структуру, если она даже не может быть создана.

Кварки с одним и тем же ароматом, но различным цветом должны обладать всеми одинаковыми свойствами за исключением цвета; именно поэтому и была введена концепция цвета. Однако кварки, которые отличаются по цвету, обладают достаточно отличными свойствами. Именно из-за разных электрических зарядов u- и d-кварка протон имеет заряд, а нейтрон — нет. Аналогично, из-за значительно большей массы s-кварка по сравнению с массами u- или d-кварков, странные частицы обычно являются самыми тяжелыми членами своих семейств. Очарованный кварк, c, должен быть еще тяжелее, следовательно и очарованные частицы, как правило, бывают тяжелее всех прочих. Именно аромат кварков, а не их цвет вносит разнообразие в мир адронов.

Как мы видели, сильные взаимодействия никак не влияют на ароматы кварков. Однако при слабом взаимодействии кварк может поменять свой аромат (но не цвет). Слабые взаимодействия также связывают кварки с лептонами. Классическим примером такого взаимодействия является ядерный бета-распад, в процессе которого нейтрон превращается в протон и происходит эмиссия электрона и антинейтрино. Если гово-

рить на языке кварков, то данная реакция представляет собой превращение d-кварка в u-кварк, сопровождаемое эмиссией двух лептонов.

Считается, что слабые взаимодействия, равно как сильные и электромагнитные, переносят векторные бозоны. Главный из этих бозонов, W, в течение долгого времени называемый промежуточным векторным бозоном, был предсказан в 1938 году Хидеки Юкавой. Электрический заряд этого бозона равен -1, а от фотона и цветных глюонов он отличается наличием массы, причем довольно большой массы. Кварки способны изменять свой аромат, испуская или поглощая W-частицу. Бета-распад, например, интерпретируется как эмиссия W d-кварком, вследствие которой этот кварк превращается в u-кварк; затем W распадается, в результате чего образуются электрон и антинейтрино. Из этого процесса следует, что W также может взаимодействовать с лептонами, что создает связь между двумя группами этих предположительно элементарных частиц.

Поскольку сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия переносятся одной и той же частицей — бозоном со спином 1, — возникает идея, что все эти взаимодействия могут иметь общую основу в какой-то простой и единой теории. Шагом в направлении подобного объединения стало бы примирение слабых и электромагнитных взаимодействий. Юлиан Швингер из Гарвардского университета попытался добиться подобного объединения в середине пятидесятых годов (когда я был одним из его аспирантов и работал над теми же вопросами). Его теория имела серьезные недостатки. Один из них был устранен в 1961 году, когда с целью дополнения электрически заряженного W я ввел второй нейтральный векторный бозон, который теперь называют Z. Остальные трудности оставались неразрешенными в течение еще 10 лет, пока в 1967 году Стивен Вайнберг из Гарварда и Абдус Салам из Международного центра теоретической физики в Триесте независимо друг от друга не предложили решение. К 1971 году, главным образом благодаря работе Герардуса т' Хоофта из Утрехтского университета, с правильностью гипотезы Вайнберга – Салама согласились все.

Благодаря единой теории слабых и электромагнитных взаимодействий кварки и лептоны оказались тесно связанными друг с другом. Эти взаимодействия «видят» четыре лептона и различают три кварковых аромата. W-частица может превратить одну разновидность нейтрино в электрон, а другую — в мюон. Кроме того, W может превратить u-кварк в d-кварк; она может оказать влияние и на превращение u-кварка в s-кварк, хотя и менее охотно.

Отсутствие симметрии в этих отношениях очевидно. Лептоны состоят из двух пар, связанных слабым взаимодействием: электрон с элек-

тронным нейтрино и мюон с мюонным нейтрино. С другой стороны, кварки имеют всего три аромата, так что один из них должен остаться без пары. Эту схему можно было бы улучшить при наличии четвертого аромата кварка, который мог бы стать партнером для оставшегося без пары. Тогда и кварки, и лептоны состояли бы из двух пар частиц, причем каждый член пары мог бы превратиться в другого члена той же пары, просто испустив W. Желательность такой лептонно-кварковой симметрии привела к тому, что мы с Джеймсом Бьеркеном, а также другие ученые в 1964 году постулировали существование четвертого кварка. Мы с Бьеркеном назвали его очарованным кварком. Если кваркам приписываются цвета, то очарование становится четвертым кварковым ароматом, и возникает необходимость в новом триплете цветных кварков. Таким образом, всего получается 12 кварков.

С 1964 года появилось несколько других доводов в пользу существования очарования. Для меня самым неоспоримым из них была необходимость объяснения подавления некоторых взаимодействий, называемых нейтральными токами, изменяющими странность. Объяснение этого явления, основанное на свойствах очарованного кварка, в 1967 году дали Джон Илиопулос, Лучано Майани и я.

Нейтральные токи, изменяющие странность, — это слабые взаимодействия, в которых суммарный электрический заряд адронов не меняется, но меняется их странность; обычно s-кварк превращается в d-кварк и испускаются два лептона. Примером является распад нейтрального K-мезона (странной частицы) на два противоположно заряженных мюона. Эксперимент показывает, что такие процессы чрезвычайно редки. Трехкварковая теория не способна объяснить их подавление, а объединенная теория слабых и электромагнитных взаимодействий вообще предсказывает нормы, которые в миллион раз превышают наблюдаемые.

Добавление четвертого аромата кварка, обладающего тем же электрическим зарядом, что и u-кварк, точно объясняет подавление, хотя механизм его действия может показаться странным. При наличии двух пар кварков возможны два пути взаимодействий, изменяющих странность, а не один, который существует в случае присутствия всего лишь трех кварков. В макроскопическом мире добавление второго пути, или канала, всегда влекло бы за собой увеличение скорости реакции. Однако в мире, где властвует квантовая механика, можно не только складывать, но и вычитать. Происходит следующее: знак в уравнении, определяющем одну из реакций, отрицателен, и два взаимодействия уничтожают друг друга.

Очевидно, что добавление четвертого кваркового аромата должно увеличить количество адронов. Для объединения вновь предсказанных частиц в супермультиплеты восьмеричный путь необходимо расширить.

В частности, к графам, представляющим семейства, нужно добавить еще одно измерение, чтобы плоские фигуры ранней симметрии стали платоновыми или архимедовыми пространственными телами.

К мезонному октету добавляются шесть очарованных частиц и одна неочарованная, в результате чего образуется новое семейство из 15 частиц. Оно представлено кубооктаэдром, одна грань которого содержит шестиугольник исходного октета неочарованных мезонов. Барионные октеты и декуплет должны образовать два семейства по 20 членов в каждом. Они представлены в виде четырехгранника, усеченного в каждой вершине, и правильного четырехгранника. Кроме того, есть еще правильный четырехгранник меньшего размера, состоящий всего из четырех барионов. И опять, каждая фигура содержит одну плоскость из неочарованных частиц (смотри рисунок 1).

Теперь кажется, что первой из новых частиц предстояло открыть мезон, который сам по себе очарованной частицей не является. Этот вывод основан на допущении, что предсказанный мезон — это то же самое, что и частица J или ψ. Об открытии этой частицы одновременно объявили Сэмюэл Тинг и его коллеги из Брукхейвенской национальной лаборатории и Бертон Рихтер младший с группой других физиков, работавших в Стэнфордском центре линейного ускорения частиц (SLAC). В Брукхейвене эту частицу назвали J, а в Стэнфорде — ψ. Я буду называть ее J. Однако для двух возбужденных состояний этой частицы будут использоваться названия ψ' и ψ'', поскольку эти состояния наблюдались только во время экспериментов в SLAC.

J-частица была обнаружена как резонанс — рост при данной энергии вероятности взаимодействия между другими частицами. В Брукхейвене резонанс был обнаружен во многих электрон-позитронных парах, созданных при столкновениях протонов с атомными ядрами. В SLAC он наблюдался в продуктах взаимного уничтожения электронов и позитронов. Энергия, при которой наблюдались резонансы, — то есть энергия массы J-частицы — составляет порядка 3,1 ГэВ.

J-частица распадается примерно через 10^{-20} секунд; это, безусловно, краткий промежуток времени, но, тем не менее, он в 1 000 раз превышает ожидаемое время жизни частицы с такой массой, какую имеет J. Изрядная доля волнения, которое породило открытие J-частицы, была вызвана, главным образом, столь долгим временем ее жизни.

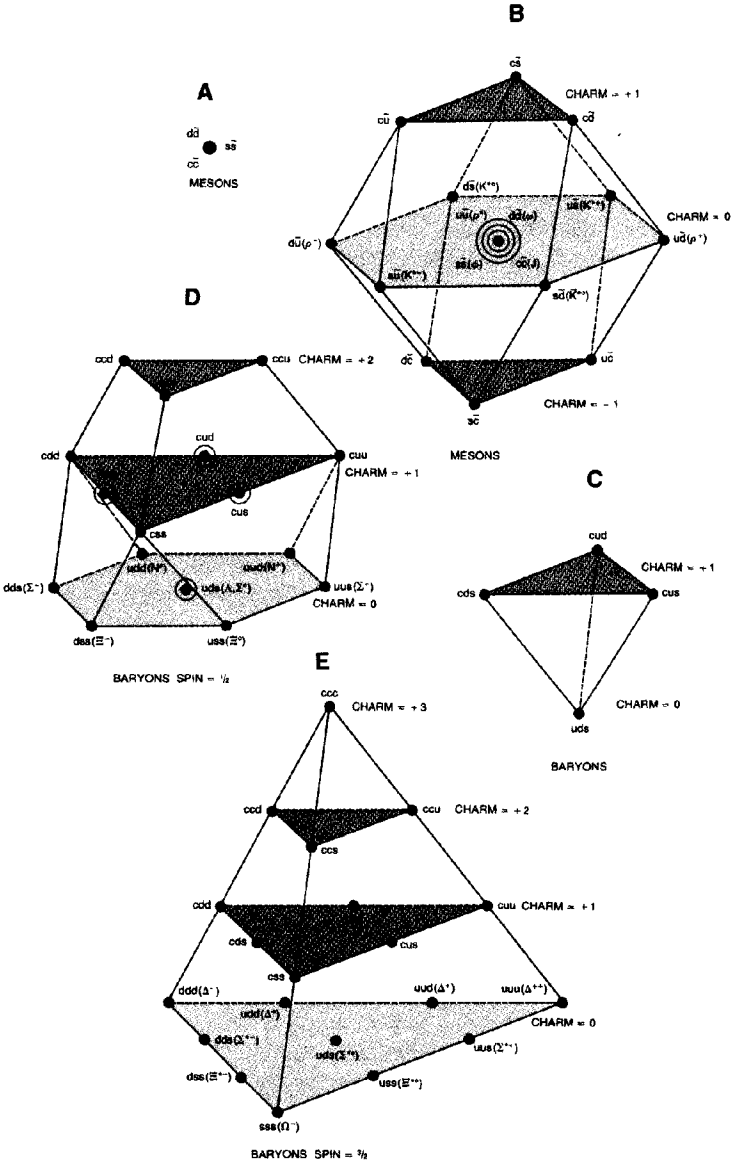
Предлагались многочисленные варианты объяснения этой частицы; например, некоторые предполагали, что это Z-частица. Я считаю, что есть хорошая причина считать J мезоном, состоящим из очарованного кварка и очарованного антикварка, то есть мезоном с кварковым составом $c\bar{c}$. Томас Аппелквист и Дэвид Политцер из Гарварда назвали этот

мезон «чармонием» по аналогии с позитронием — связанным состоянием электрона и позитрона. Чармоний очарованием не обладает, потому что очарованные квантовые числа его кварков (+1 и -1) при сложении дают нуль.

Гипотеза о чармонии может объяснить аномальное время жизни J-частицы, если рассмотреть самую отдаленную судьбу кварков распадающейся частицы. Возможны три варианта: они могут расщепиться на составляющие двух дочерних адронов, они могут стать частью одной дочерней частицы или уничтожить друг друга. Эмпирическое правило, которое впервые заметил Цвейг, утверждает, что распады первого рода разрешены, а все остальные подавляются. Чтобы J-частица распалась единственным разрешенным способом, она должна создать две очарованные частицы, то есть два адрона, один из которых содержит очарованный кварк, а другой — очарованный антикварк. Такой распад возможен только в том случае, если масса J больше суммы масс очарованных дочерних частиц. Существует причина полагать, что масса самой легкой очарованной частицы больше половины массы J, а потому J, видимо, не может распадаться разрешенным образом. J также не может распадаться и по второму способу (оставляя оба своих кварка в одной частице), так как J — это состояние с минимальной массой, содержащее очарованный кварк и очарованный антикварк. Следовательно, J должна распадаться по пути взаимного уничтожения ее кварков, но такой распад подавляется правилом Цвейга. Это подавление дает частичное объяснение столь долгого времени жизни J-частицы.

Правило Цвейга было сформулировано, чтобы объяснить распад ϕ-мезона, состоящего из странного кварка и странного антикварка и имеющего массу порядка 1 ГэВ. Две эти частицы очень похожи между собой, но J распадается явно медленнее, чем ϕ. Почему же правило Цвейга имеет для J бóльшую силу, чем для ϕ? Более того, чем объясняется произвольность правила Цвейга?

Рис. 1. Супермультиплеты из адронов, которые включают предсказанные очарованные частицы, можно представить в виде многогранников. Каждый супермультиплет состоит из частиц с одним и тем же значением спинового момента. Внутри каждого супермультиплета частицы имеют заданные положения, соответствующие трем квантовым числам: положения на темных плоскостях определяются изотопическим спином и странностью, а сами плоскости показывают значения очарования. Мезоны представлены точкой (a) и архимедовым пространственным телом, называемым кубооктаэдром (b) и включающим 15 частиц, среди которых шесть очарованных. Показанные мезоны имеют спин 1, но все мезоны соответствуют одному и тому же представлению в виде точки и кубооктаэдра. Барионы образуют маленький правильный четырехгранник (c) из четырех частиц, усеченный четырехгранник (d) из 20 частиц и больший правильный четырехгранник (e), также образованный 20 частицами. И мезоны, и барионы определяются их кварковым составом, а для наблюдавшихся частиц также приводится установленный символ. Каждая фигура содержит одну плоскость, показанную светло-серым цветом, неочарованных частиц, идентичных более ранним представлениям «восьмеричного пути».


A
MESONS
B
CHARM = +1
CHARM = 0
CHARM = −1
MESONS
C
CHARM = +1
CHARM = 0
BARYONS
D
CHARM = +2
CHARM = +1
CHARM = 0
BARYONS SPIN = 1/2
E
CHARM = +3
CHARM = +2
CHARM = +1
CHARM = 0
BARYONS SPIN = 3/2

Возможный ответ на эти вопросы дает теоретическая концепция, называемая асимптотической свободой и утверждающая, что при высоких энергиях сильные взаимодействия ослабляются. При достаточно высокой энергии протон ведет себя, как если бы он состоял не из трех связанных друг с другом кварков, а из трех свободно движущихся кварков. Название этой концепции проистекает из того факта, что кварки приближаются к состоянию свободного движения асимптотически по мере увеличения энергии. Асимптотическая свобода дает объяснение различного применения правила Цвейга для ϕ- и J-частиц. Поскольку масса, или даже энергия, J так велика, сильное взаимодействие несколько ослабляется, поэтому кварк и антикварк, пытаясь уничтожить друг друга, сталкиваются с определенной сложностью.

Подобно позитронию, чармоний должен появляться в нескольких энергетических состояниях. Два таких состояния были открыты в SLAC вскоре после обнаружения первого состояния; это ψ' с массой порядка 3,7 ГэВ и ψ'' с массой около 4,1 ГэВ. Они представляются простыми возбужденными состояниями самого низкого состояния чармония, J-частицы. Ψ' распадается лишь немногим быстрее J, и в течение половины времени своей жизни продукты его распада являют собой J-частицу и два пиона. Таким образом, ψ' иногда распадается согласно второму подавленному процессу, описанному правилом Цвейга, то есть оба его кварка образуют одну дочернюю частицу. Более долгое время жизни говорит о том, что ψ' также лежит ниже энергетического порога создания пары очарованных частиц.

Ψ'' распадается гораздо более быстро, а потому она должна распадаться некоторым образом, который разрешает правило Цвейга. Продукты ее распада еще не были определены, однако они могут включать очарованные адроны.

Множество других возбужденных состояний чармония неизбежно следует из теории кварковых взаимодействий (см. рисунок 2). Одно из них, называемое p-волновым чармонием, возникает, когда частица приобретает дополнительную единицу углового момента. Через некоторое время ψ' должна распадаться на p-волновой чармоний, который впоследствии должен распадаться до достижения основного состояния, J. При каждом переходе должен испускаться фотон, обладающий характеристической энергией. Недавние эксперименты, проведенные на кольцевом накопителе частиц DORIS Немецкого электронного синхротрона в Гамбурге, совершенно определенно выявили распады, связанные с p-волновой частицей. В нескольких процентах своих распадов ψ' дает J-частицу и два фотона с энергиями 0,2 ГэВ и 0,4 ГэВ. На SLAC было обнаружено, что ψ' распадается на промежуточное состояние и фотон с энергией 0,2 ГэВ. Промежуточное состояние, которое предположи-

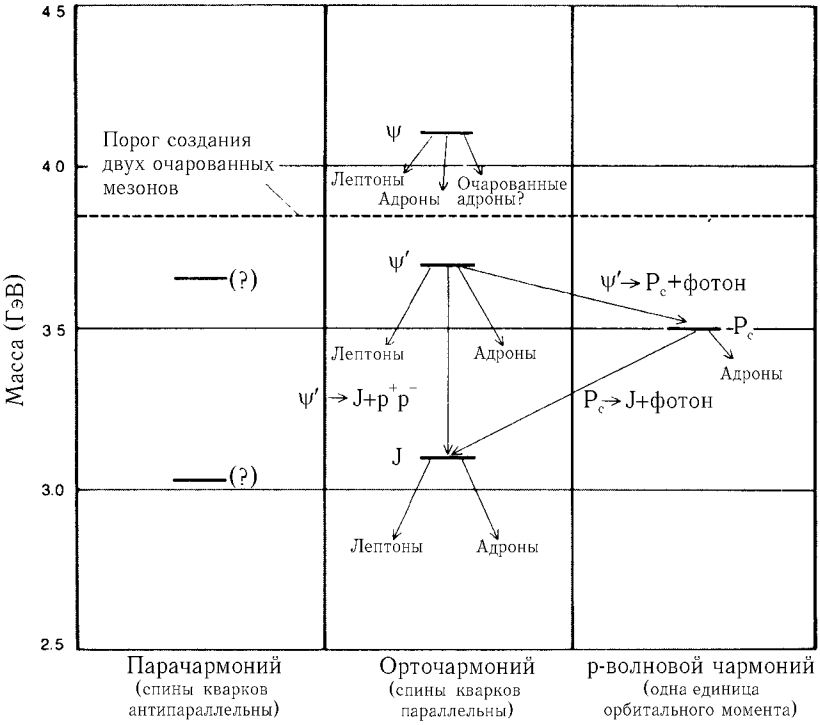


Рис. 2. Чармоний должен существовать на нескольких энергетических уровнях, отличающихся состоянием движения составляющих кварков. J-частица представляет собой основное состояние орточармония, в котором спины кварков параллельны. Два возбужденных состояния орточармония, обозначенные ψ' и ψ'', были открыты в SLAC вскоре после открытия самой J-частицы. Ψ', как и J-частица, видимо, имеет слишком малую массу, чтобы распадаться на два очарованных адрона, но быстрый распад ψ'' говорит о том, что эта частица обладает необходимой массой. Две другие формы частицы, называемые парачармонием, с антипараллельными спинами кварков обнаружены не были. P-волновой чармоний, в котором кварки обладают кроме спинового момента еще и орбитальным, могли быть обнаружены на Немецком электронном синхротроне в Гамбурге и в SLAC.

тельно не отличается от частицы, наблюдавшейся в DORIS, затем сразу распадается на адроны.

Соответствие теории и эксперимента, выявленное открытием p-волновых переходов, внушает нам стойкую уверенность в правильности объяснения J-частицы через чармоний. Существует, по крайней мере, еще одно предсказанное состояние, называемое *парачармонием*, которое должно быть обнаружено, если такому объяснению данной частицы суждено подтвердиться. Оно отличается от наблюдаемых состояний ориентацией спинов кварка: у J, ψ' и ψ'' (которые вместе называются *орточармонием*) спины параллельны; у парачармония они антипараллельны. Пока парачармоний обнаружен не был, но если данное теоретическое описание имеет смысл, то парачармоний должен существовать.

Помимо различных состояний (неочарованного) чармония, также должны существовать и все предсказанные очарованные частицы. Если J действительно является состоянием чармония, то из ее массы мы можем вывести массы всех адронов, содержащих очарованные кварки.

Очень важное изначальное ограничение на диапазон возможных масс наложила интерпретация подавления нейтральных токов, изменяющих странность. Если механизм подавления работает, то очарованный кварк не может быть намного тяжелее, чем его родственники. С другой стороны, он не может быть и очень легким, так как в этом случае мы уже имели бы возможность наблюдать очарованные адроны. Таким образом, опираясь на эти условия, массы очарованных частиц оценили как равные примерно 2 или 3 ГэВ.

После открытия J-частицы я со своими гарвардскими коллегами, Алваро де-Рухулой и Говардом Джорджи, провел более формальный анализ. То же самое сделали и другие. Сделанные нами оценки указывают на то, что очарованные состояния с минимальной массой — это мезоны, образованные c-кварком и $\bar{u}$- или $\bar{d}$-антикварком; их масса должна находиться между 1,8 и 2,0 ГэВ. Величина, находящаяся в пределах этого диапазона, могла бы согласоваться с предположением, что ψ' лежит ниже порога создания пары очарованных мезонов, а ψ'' — выше.

Очарованный барион с минимальной массой имеет кварковый состав udc; мы предсказываем, что его масса около 2,2 ГэВ. Как и следовало ожидать, поскольку c-кварк — самый тяжелый из всех четырех кварков, наиболее тяжелым из предсказанных очарованных барионов является барион с кварковым составом ccc. Мы считаем, что его масса составляет около 5 ГэВ.

Важный принцип, которым мы руководствуемся при выборе направления экспериментальных исследований, заключается в необходимости того, чтобы при большинстве взаимодействий очарованные частицы создавались только парами. Может быть создано два адрона: один, содержащий очарованный кварк, а другой — очарованный антикварк; оче-

видным следствием этого принципа является удвоение энергии, необходимой для создания очарованной частицы. Важное исключение из этого правила составляет взаимодействие нейтрино с другими видами частиц, например, с протонами. Нейтринные события весьма редки, так как нейтрино проявляют только слабые взаимодействия, а в слабых процессах может измениться аромат кварка. В поисках очарования были перепробованы многие экспериментальные методики, но ни одной очарованной частицы однозначно обнаружено не было. Тем не менее, существуют два обнадеживающих эксперимента, связанные с нейтринными взаимодействиями. В обоих экспериментах в конечном итоге может появиться очарование, но даже если это тщетная иллюзия, эксперименты все равно предлагают многообещающие направления исследования.

Один из этих экспериментов проводился в Национальной лаборатории им. Ферми по ускорению частиц в Батавии (Иллинойс) группой физиков, возглавляемых Дэвидом Б. Клайном из Висконсинского университета, Альфредом К. Манном из Пенсильванского университета и Карло Руббиа из Гарварда. При исследовании взаимодействий нейтрино, обладающих высокой энергией, они обнаружили, что в нескольких процентах событий среди продуктов этих взаимодействий обнаруживались два противоположно заряженных мюона. Один из этих мюонов может создаваться непосредственно из падающего нейтрино, но второй достаточно сложно объяснить, используя лишь ансамбль известных неочарованных частиц. Скорее всего, мюон испускается в результате распада тяжелой частицы, созданной в процессе реакции. Этот распад вызван слабым взаимодействием. Наша частица должна иметь массу от 2 до 4 ГэВ, и если она является адроном, то должно существовать какое-то объяснение ее распада, вызванного слабым взаимодействием. Механизм распада большинства частиц с такой большой массой — сильное взаимодействие. Необходимым объяснением могло бы стать присутствие в частице очарованного кварка.

Второй эксперимент был проведен в Брукхейвене группой исследователей под руководством Николаса П. Самиоса. Они сфотографировали треки, получающиеся в результате взаимодействия нейтрино с протонами в пузырьковой камере. В выборке, составленной несколькими сотнями наблюдаемых столкновений, одна фотография, казалось, не имела традиционного объяснения (см. рисунок 3).

Конечное состояние можно истолковать как продукты распада очарованного бариона. Если бы этот процесс подтверждался более чем одним событием, то он обеспечил бы убедительное доказательство существования очарования. Еще несколько наблюдений той же реакции уладили бы данную проблему.

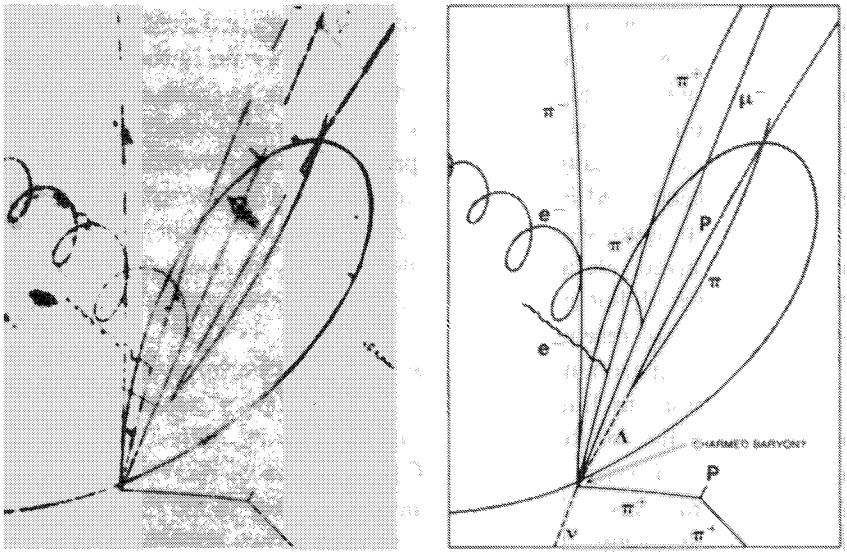


Рис. 3. Возможно, очарованный барион был обнаружен Николасом П. Самиосом и его коллегами в Брукхейвене вследствие столкновения нейтрино и протона. Фотография, приведенная слева, была сделана в пузырьковой камере, наполненной жидким водородом; треки частиц на фотографии показаны на диаграмме справа. Нейтрино входит снизу с левой стороны; его трек не виден, потому что только частицы, обладающие электрическим зарядом, ионизируют молекулы водорода и оставляют в камере пузырьковый след. Возможный очарованный барион имеет электрический заряд, но его трек тоже невозможно увидеть, потому что он слишком короткий; частица должна распасться через 10^{-13} секунды, так что даже при очень высокой скорости она движется недостаточно быстро, чтобы ионизировать более нескольких молекул водорода. Очарованная частица распадается на нейтральную λ-частицу, странный барион. λ-частица следа не оставляет, но продукты ее распада образуют вершину, указывающую в направлении исходного взаимодействия. Также образуются четыре пиона и мюон, а два электрона, оказавшиеся на пути быстро движущихся частиц, движутся по спирали влево в магнитном поле пузырьковой камеры. Присутствие очарованной частицы не определенно; возможны некоторые другие интерпретации данного события, и, несмотря на то, что все они невероятны, их все же нельзя сбрасывать со счетов.

Было бы неправильно создавать впечатление, будто описание адронов через кварки трех цветов и четырех ароматов разрешило все нерешенные проблемы физики элементарных частиц. Например, продолжающиеся измерения отношения адронов к мюонным парам, созданным при электрон-позитронных аннигиляциях, опровергли то, что было предсказано. Данное отношение проводит различие между различными кварковыми моделями, и аргумент в поддержку цветовой гипотезы состоял в том, что при энергиях от 2 до 3 ГэВ это отношение примерно равно 2. При более высокой энергии, достаточно высокой, чтобы очарованные адроны создавались парами, это отношение должно возрастать с 2 до примерно 3,3 ГэВ. Отношение действительно увеличивается, но превышает указанную отметку и стабилизируется при значении около 5. Может быть, очарованные частицы и образуются, однако создается впечатление, что, помимо этого, происходит что-то еще: появляется какая-то частица, отсутствующая в описанной мной теории. Один из моих гарвардских коллег, Майкл Барнетт, считает, что мы были недостаточно амбициозны. Он говорит, что существует не четыре кварковых аромата, а шесть, вследствие чего на долю очарованного кварка приходятся три аромата. Также не исключена возможность существования более тяжелых лептонов, о которых нам ничего не известно.

Наконец, даже если можно было бы изобрести абсолютно согласованную и неголословную кварковую модель, многие основные вопросы все равно остались бы без ответа. Одна из таких дилемм в неявном виде присутствует в кварково-лептонной симметрии, приведшей к гипотезе об очаровании. Как кварки, так и лептоны, являющиеся предположительно элементарными, можно разделить на две подгруппы. В одной группе окажутся u- и d-кварки, а также электрон и электронное нейтрино. Этих четырех частиц достаточно, чтобы построить весь мир; их достаточно, чтобы создать все атомы и молекулы и даже обеспечить сияние Солнца и других звезд. Другая подгруппа состоит из странного и очарованного кварка, а также из мюона и мюонного нейтрино. Некоторые из этих частиц иногда встречаются в космических лучах, но создаются они, главным образом, на ускорителях частиц высоких энергий. Может показаться, что природа могла бы обойтись и половиной основных частиц. Но все же вторая группа не могла быть создана для развлечения или обучения физиков; так какова же цель этого великого дублирования? Пока у нас нет ответа.

Примечание автора. Эта статья была написана перед самым открытием τ-лептона и появлением нового откровения: оказывается, есть еще и третье семейство кварков и лептонов. Таким образом, в природе существует, по крайней мере, в три раза больше элементарных частиц,

чем, казалось бы, необходимо, чтобы управлять космическим кораблем Земля. Существует ли четвертое семейство, которое еще ждет своего открытия? Его членов уже окрестили, а обсуждению этих абсолютно гипотетических частиц уже посвятили несколько конференций (в Калифорнии, где же еще?). Ответ даст новый электрон-позитронный коллайдер по прозвищу LEP, расположенный в CERN. Судя по всему, каждое семейство содержит легкие или безмассовые нейтрино и антинейтрино, на которые должен распадаться Z-бозон. Эти способы распада нейтрино обнаружить невозможно, потому что нейтрино взаимодействуют слишком слабо. Чтобы сосчитать количество семейств, экспериментаторам нужно лишь измерить, как часто Z-бозон исчезает бесследно.

Создание и открытие очарованного кварка

Наука нередко развивается следующим образом. В лаборатории наблюдается удивительный эффект. Чтобы объяснить новое явление, необходимо расширить или усовершенствовать существующую теорию. Именно так наблюдаемые нерегулярности в движении планеты Уран привели к замечательному и правильному предсказанию новой планеты — Нептуна. Гальвани заметил, что отрезанная лапка лягушки дергается, если прикоснуться к ней скальпелем. Это привело к пониманию электрического тока и к построению первой электрической батареи Алессандро Вольта. Удивительные и достаточно непредсказуемые открытия рентгеновских лучей, радиоактивности и странных частиц также подходят под эту модель развития науки.

В редких случаях нормальный исторический порядок меняется на обратный, когда экспериментальному открытию предшествует теоретическое изобретение. Когда Менделеев создал свою периодическую таблицу химических элементов, он заметил в ней несколько пробелов. Он понял, что эти пробелы соответствуют химическим элементам, которые еще не открыты, и описал их ожидаемые физические и химические свойства. Несколько лет спустя предсказанные им элементы были найдены в природе и названы скандием, галлием и германием в честь стран, где они были обнаружены. Менделеева признали великим ученым, у которого хватило мужества выразить свои убеждения.

В 1961 году Мюррей Гелл-Манн и Юваль Нееман изобрели классификационную схему, которая во многом напоминала периодическую таблицу элементарных частиц. В этом так называемом «восьмеричном пути» частицы группировались простыми геометрическими массивами: шестиугольниками и треугольниками. И опять в одной из этих моделей присутствовал пробел, соответствующий еще не открытой частице. Не многие физики восприняли эту странную новую теорию всерьез. Однако в 1964 году экспериментаторы из Брукхейвенской национальной лаборатории, расположенной в Нью-Йорке, все же открыли частицу, предсказанную Гелл-Манном. Открытие «омега-минус» вынудило язычников поменять свои убеждения и сделало восьмеричный путь научной догмой.

В настоящее время успех восьмеричного пути понимается через теорию кварков, а успех периодической таблицы химических элементов — через квантовую теорию структуры атома. Гелл-Манн сам ввел понятие кварков в 1963 году. (Независимо от него это сделал и Джордж Цвейг, который с тех пор стал нейробиологом.) Однако на всеобщее принятие этих идей ушло десять лет.

Гелл-Манн постулировал существование лишь трех видов кварков, которые должны были составлять все субъядерные частицы. Нейтроны и протоны образуют все атомные ядра, которые, в свою очередь, состоят из «u-кварков» и «d-кварков»: протон содержит два u-кварка и один d-кварк; нейтрон содержит один u-кварк и два d-кварка. Существуют также короткоживущие субъядерные частицы, состоящие из трех u-кварков или из трех d-кварков.

Третий вид кварка необходим для создания странных частиц, поэтому он и называется «странным кварком» (s-кварком). Например, «лямбда-гиперон» содержит один s-кварк, один u-кварк и один d-кварк; а «кси-минус гиперон» состоит из двух s-кварков и одного d-кварка. Знаменитая «омега-минус» образована тремя s-кварками.

Основные законы квантовой теории гласят, что мы можем сделать субъядерную частицу из любых трех кварков. Другая разновидность ядерных частиц, мезон, образована одним кварком и одним антикварком. Большая часть разнообразия субъядерной физики проистекает из существования трех различных видов кварков, которыми можно пользоваться.

В 1964 году, вскоре после изобретения кварков, мы с Джеймсом Бьеркеном заявили, что должна существовать четвертая разновидность кварков. Свой предполагаемый четвертый кварк мы назвали «очарованным кварком» (c-кварком). Лишь десять лет спустя в лаборатории была создана и замечена частица, содержащая очарованный кварк.

Мы опять рассуждали по принципу «периодической таблицы»: не таблицы элементов, не таблицы субъядерных частиц, а таблицы кварков и лептонов.

Некоторые элементарные частицы *не* состоят из кварков. Это как раз тот случай, когда была открыта первая элементарная частица — электрон. То же самое касается различных нейтрино. Все эти частицы в совокупности известны под названием лептонов. Считается, что кварки и лептоны являются основными кирпичиками, образующими материю.

В 1964 году были известны четыре разновидности лептонов, образующие две пары, тесно связанные между собой слабым взаимодействием. Это были электрон и электронное нейтрино, а также мюон и мюонное нейтрино. (Мюон — это страдающий ожирением и нестабильный родственник электрона; он весит примерно в 200 раз больше.) Было из-

вестно всего три вида кварков. Партнером d-кварка выступал u-кварк, а странный кварк (более тяжелый родственник d-кварка) был одиноким и холостым. Аналогия между кварками и лептонами была неполной. Как в таблице Менделеева, как в моделях Гелл-Манна, здесь тоже чего-то явно не доставало. Конечно же, u-кварк должен был иметь богатого родственника, чтобы говорить как о двух лептонных парах, так и о двух кварковых парах. Недостающим кварком был изобретенный нами «очарованный» кварк. (Позднее эта партия расширилась, так как теперь нам известно о существовании трех супружеских пар, хотя шестой кварк по-прежнему ускользает от наших наблюдений.)

В 1970 году по-прежнему не было ни крупицы экспериментальных данных, которые свидетельствовали бы о существовании очарованного кварка. Тем не менее, вместе со своими коллегами, Джоном Илиопулосом и Лучано Майани, я вернулся к этому завораживающему размышлению. Мы создали убедительное, но весьма косвенное свидетельство необходимости существования очарованного кварка. Теория без очарования была очень асимметрична и предсказывала некоторые виды асимметрии, которых в природе, по известным данным, нет. Очарованный кварк восстановил бы необходимую симметрию, тем самым устраняя расхождение с опытом.

К апрелю 1974 года я начал раздражаться из-за неспособности экспериментаторов обнаружить очарованный кварк, который, как я знал, должен существовать. На бостонском заседании по мезонной спектроскопии я предсказал, что очарование вот-вот откроют, и пообещал съесть свою шляпу, если его не обнаружат до следующего подобного заседания. В ноябре того же года об открытии новой частицы одновременно объявили ученые из Брукхейвена и экспериментаторы из Калифорнии, работавшие на устройстве, называемом SPEAR. SPEAR — это более крупный вариант электрон-позитронного коллайдера на встречных пучках, который впервые появился во Фраскати. Действительно, ученым из Фраскати удалось подтвердить существование новой частицы вскоре после того, как она была обнаружена.

Группа с Восточного побережья назвала новую частицу J, а группа с Западного побережья — ψ. Сегодня эта частица носит двойное имя — J/ψ. Руководители двух этих групп, Бертон Рихтер и Сэмюэл Тинг, за открытие этой важной новой частицы в 1976 году получили Нобелевскую премию по физике.

Вскоре после открытия J/ψ начались многочисленные споры относительно того, что же это за частица. Мы с моими коллегами считали, что это мезон, образованный очарованным кварком и его антикварком. Но если бы это было так, то должны были бы существовать другие новые частицы, содержащие всего один очарованный кварк. Где же они?

Ник Самиос, из Брукхейвена, был руководителем группы, которая нашла первую частицу омега-минус в 1964 году. В начале 1975 года его группа сообщила о первом наблюдении очарованной частицы — частицы, состоящей из u-кварка, d-кварка и c-кварка. Она была создана в большой пузырьковой камере пучком нейтрино, обладающих высокой энергией. Однако Самиосу удалось установить лишь один пример создания очарованной частицы. Этого было недостаточно, чтобы убедить сообщество физиков в существовании очарования.

Весной 1976 года группа физиков, работавшая в SPEAR, опубликовала статью о том, что им не удалось найти никаких признаков очарованных частиц. Тогда я разозлился по-настоящему и на заседании в Висконсине настоял, чтобы экспериментаторы вернулись в свои лаборатории и нашли новые частицы, которые просто обязаны были существовать. Мои аргументы подействовали. Всего через две недели после заседания мой друг Герсон Гольдхабер позвонил мне из Калифорнии, чтобы сообщить, что его группа из SPEAR наконец открыла неуловимые очарованные мезоны. Очень скоро ученые показали, что эти мезоны обладают точно предсказанными нами ранее свойствами.

Это было долгое ожидание: с 1964 года, когда родилась идея очарования, до 1976 года, когда она стала установленным фактом. Как я был рад поучаствовать в такой авантюре! Нет нужды говорить, что когда в 1976 году состоялась конференция по спектроскопии, мне не пришлось есть свою шляпу. Напротив, организаторы конференции раздали всем участникам леденцы в виде шляп. Именно им пришлось есть свои шляпы.

Антинейтрино и геология

Экзотические частицы физики высоких энергий иногда могут оказаться очень важными в далеких от физики дисциплинах. Всего 35 лет назад мы определили, что пионы и мюоны — это составляющие космических лучей. В настоящее время пучки пионов постоянно используются для лечения некоторых видов рака, а мюоны космических лучей использовались для «рентгена» египетских пирамид с целью поиска спрятанных сокровищ. Нейтрино, призрачная частица, изобретенная Вольфгангом Паули в 1930 году, впервые наблюдалась в лаборатории в 1955 году. Казалось, что нейтрино не имеют практического применения, но ситуация изменилась.

Дисциплина нейтринной астрономии приобретает все бóльшую важность. Нейтрино, исходящие от Солнца, зарегистрировали и измерили в ходе эксперимента, проводимого в глубокой золотоносной шахте в Южной Дакоте. Результаты *не* совпали с теоретическими ожиданиями. В Солнце есть что-то, что по-прежнему озадачивает нас. Космические лучи при столкновении с ядрами атмосферы являются другим источником нейтрино, которые также были зарегистрированы. Они создают нежелательный и сбивающий с толку фон пока безрезультатного поиска распада протона. Другим астрономическим источником нейтрино являются гигантские звездные взрывы, известные как сверхновые звезды. Выброс нейтрино, сопровождающий сверхновую, длится всего несколько минут и может быть замечен, если сверхновая вспыхивает недалеко от нас. К сожалению, такие события происходят не чаще одного раза в сто лет. Поиск выбросов нейтрино в результате взрыва сверхновой требует терпения, выходящего за пределы чувства долга.

Тогда как Солнце является мощным источником *нейтрино*, наша Земля представляет собой более слабый, но более близкий источник *антинейтрино*. Грубо говоря, нейтрино создаются в любом процессе, образующем большие ядра из маленьких, например, при синтезе четырех ядер водорода для образования гелия; именно этот процесс снабжает Солнце топливом. Антинейтрино, с другой стороны, создаются в ходе любого процесса, который разбивает крупные ядра на более мелкие. Атомные электростанции и ядерное оружие — богатые источники антинейтрино, так как они задействуют деление крупных ядер. Однако антинейтрино постоянно создаются и в ходе природных процессов — при

радиоактивном распаде некоторых элементов, присутствующих в земной коре: калия, рубидия, тория и урана. Факт существования на Земле естественно-радиоактивных материалов оказал поразительное влияние на человеческую цивилизацию.

Первым намеком на существование того, что нам известно под названием слабых взаимодействий, стало открытие радиоктивности, которое произошло в конце девятнадцатого столетия. Вскоре после этого мадам Кюри обнаружила радиоактивных детей природного урана: радий и полоний, — а Резерфорд открыл, что радиоактивность является разновидностью превращения. Давняя мечта алхимиков оказалась естественным явлением природы. Используя продукты радиоактивного распада в качестве микрозонда атома, Резерфорд в 1911 году продемонстрировал существование ядер атомов. Изучение естественной радиоактивности в первых десятилетиях двадцатого века привело нас к современному глубокому знанию структуры атома.

Более того, наличие на Земле радиоактивных материалов дало нам возможность оценить возраст нашей планеты. Период полураспада радиоактивного калия, например, равен примерно двум миллиардам лет. При распаде этот элемент превращается в хорошо известный всем кальций. Из известных значений содержания на Земле калия и кальция в настоящее время, а также из подобных соображений в отношении других радиоактивных элементов мы заключили, что Земле примерно четыре с половиной миллиарда лет.

В процессе радиоактивного распада создаются антинейтрино, но, помимо этого, высвобождается и значительное количество тепла. Суммарное количество этого радиоактивного тепла, созданного всеми радиоактивными элементами земной коры, оценивается как равное 20 миллионам миллионов ватт (или 20 тераватт). Для сравнения скажем, что при сжигании топлива всеми людьми и всеми заводами мира высвобождается пять тераватт тепла; эта цифра также в 100 раз превышает производство электроэнергии в целой Америке. Этот источник тепла играет важную роль в истории Земли. Не будь на нашей планете радиоактивных материалов, земная кора замерзла бы много эпох назад, а геомагнитное поле истощилось бы. Не было бы магнитного компаса, да и всплеска морских открытий, произошедшего в пятнадцатом веке, вполне могло не быть. Колумб открыл Америку в 1492 году из-за существования естественной радиоактивности! Но еще более важным является тот факт, что магнитное поле Земли — это щит, которым она укрывается от опустошающего действия космических лучей; нерадиоактивная, а следовательно и немагнитная Земля никогда не смогла бы породить жизнь в том виде, в каком знаем ее мы.

В статье, написанной вместе с Лоренсом Краусом и Дэвидом Шраммом, мы вычисляем количество антинейтрино, созданное известным земным запасом радиоактивных материалов. Вероятно, что наша оценка занижена, так как на самом деле мы не знаем, какое количество радиоактивного материала лежит глубоко в Земле и недоступно нам. Мы нашли, что каждый квадратный сантиметр земли каждую секунду испускает порядка 10 миллионов антинейтрино.

Если провести чувствительный эксперимент, то эти антинейтрино можно обнаружить и измерить, хотя сделать это достаточно сложно. Причем этот эксперимент должен проводиться под землей, чтобы оградить его от воздействия космических лучей. Вероятно, такой эксперимент будет проведен в новой подземной лаборатории, расположенной ниже Гран-Сассо.

Этот эксперимент важен тем, что мы не можем точно вычислить поток антинейтрино. Измеряя антинейтрино, мы можем углубиться в две самые глубокие (прошу простить за каламбур) тайны геологии: каков химический состав тела Земли и сколько тепла создается ее радиоактивными составляющими? Это снова продемонстрировало бы, что физика высоких энергий интересна не только сама по себе (а она действительно интересна), но может быть использована как мощный и эффективный инструмент во всех других науках; в данном случае для изучения последней земной границы — центра мира.

Примечание автора. В 1987 году в Большом Магеллановом Облаке вспыхнула сверхновая. Ее нейтрино наблюдались в лабораториях Японии и Соединенных Штатов. Это был не столько результат терпения, сколько неожиданное достижение. Ученые, искавшие распад протона, вместо него увидели сверхновую.

Физика элементарных частиц как бесполезная трата времени и денег

Физика элементарных частиц стала малопонятной, дорогостоящей и совершенно непрактичной. Каоны, мюоны, нейтрино и им подобные, быть может, никогда не повлияют на будущие технологии. Изучение классической механики необходимо для создания метеорологических спутников. Физика твердого тела принесла нам транзистор. Ядерная физика и релятивистская формула, $E = Mc^2$, привели к получению атомной энергии. Квантовая механика породила современную химию и биологию. Однако физика частиц кажется бесконечной дорогой в никуда. Каждый год ученые открывают все больше и больше частиц с абсурдно коротким временем жизни. Для их систематики уже не хватает алфавита. По мере углубления нашего проникновения в субъядерный мир нам кажется, что все становится даже более сложным, неуместным и хаотичным. Создается впечатление, что многие из модных сейчас «основных кирпичиков природы» — типа мюонов и очарованных кварков — вообще не нужны для создания Вселенной, в которой мы живем. Нам порой даже кажется, что их впихнули сюда назло нам. Знание физики элементарных частиц не является ни необходимым, ни даже полезным для большинства физиков-практиков. И очень многие высококвалифицированные специалисты по физике частиц не могут даже найти работу по выбранной ими специальности. Если, согласно Рудерману, космология является самой несчастной из наук, тогда физика элементарных частиц несет титул самой бесполезной.

Разгадывание головоломок и строительство памятников — это характеристические занятия людей. Физика частиц имеет много общего с каждым из них. Нашу дисциплину нередко сравнивают с мозаикой, в которой несколько кусочков аккуратно подогнали друг к другу, в результате чего начала просматриваться общая картина. Однако в мозаике по-прежнему остается множество пустых мест, а также кусочков, которые, на первый взгляд, вообще никуда не подходят. Кто может устоять перед попыткой сложить мозаику, кусочками которой являются *самые основные составляющие* природы, — мозаику, которая создавалась в течение тысяч лет? Какое личное удовлетворение можно было бы испытать,

поставив еще один кусочек на свое место. Мозаика сама по себе является памятником. Подобно пирамидам, музыке Баха или покорению Эвереста, достижения физики частиц остаются неизменной частью наследия, которое мы передадим будущим поколениям. Мы можем бездумно разбазаривать свои ископаемые богатства, но наше знание об очарованных адронах вечно.

Строители пирамид и соборов имели немалое политическое влияние. Их общества отводили значительную долю своих богатств на строительство памятников, тем самым пренебрегая многими делами, которые мы могли бы счесть гораздо более важными. Наше общество просто не настолько преданно строительству памятников, и еще меньше оно стремится к решению головоломок. Как мы объясняем строительство ускорителей, которые сто́ят сотни миллионов долларов? Это что — просто дружеское состязание с русскими или европейцами? Это чистый дух научного стремления без надежды получить осязаемую прибыль? Это политическое давление специалистов по физике частиц и профсоюзов строителей?

Какой бы далекой не была возможность того, что ученые, работающие с физикой частиц, все же наткнутся на что-то «полезное», такая возможность существует. В течение некоторого, правда короткого, времени существовала ложная надежда на то, что мюоны могут стать ключом к устройствам для синтеза. Ходят слухи, что русские надеются модифицировать ускорители частиц, чтобы приспособить их для военных целей, а *The New York Times* вообще предсказала корабли, (каким-то образом) приводимые в движение магнитными монополями. Тем не менее, я считаю, что наша дисциплина *per se*[1] окажется в высшей степени «бесполезной».

С другой стороны, специалисты по физике частиц могут оказаться чрезвычайно важны для общества не напрямую, а косвенно, через явление, называемое спин-офом. Эксперименты нередко бывают связаны с решениями новых проблем, возникающих в электронике, вычислительной технике, физике низких температур или других науках. Многие успехи в этих науках зародились в лабораториях физики высоких энергий. Ускорители нашли применение вне первоначальных областей их использования: ядерной физики, клинической медицины и исследовании синтеза.

Кроме технологического спин-офа, существует еще и методологический. Релятивистская квантовая механика — язык теории частиц — имеет много общего с теорией коллективных явлений (физикой многочастичных систем) и с ядерной теорией. Достижения в одной области

[1]Как таковая (лат.) — *Прим. пер.*

обычно предвещают и стимулируют достижения в других. В конце концов, подобное перекрестное опыление распространяется через все, зачастую искусственные, границы между науками, что способствует обогащению всех участников такого процесса.

Люди тоже развиваются и переходят из одной области в другую. Можно утверждать, что специалисты по физике частиц пытаются решить некоторые из наиболее сложных и неподдающихся решению проблем. Эксперименты, которые когда-то считались технологически невозможными, проводятся и вскоре становятся обычным делом. Вычисления, которые ранее занимали год, сейчас проводятся за минуты. Но специалисты по физике частиц не только задают сложные вопросы и отвечают на них, они также сталкиваются с еще более озадачивающими вопросами относительно того, какие же вопросы нужно задавать. Поэтому неудивительно, что специалисты по физике частиц, меняющие область своей работы, нередко достигают блестящих результатов: на ум приходит множество примеров из биологии, медицины, вычислительной техники, математики и политологии. Физика элементарных частиц воспитывает характер и оттачивает ум.

Физикой частиц сейчас называют поиск основных составляющих материи, а также законов их объединения. Физика частиц — новая наука, но корни этого поиска уходят в античность. Несколько раз ученым казалось, что они настигли свою добычу, но в результате они обнаруживали, что в ее основе лежат еще более простые структуры. Схема всегда одинакова. Некоторая категория считается элементарной; наблюдается множество разновидностей этой категории; раскрывается предположительная систематика; в конечном итоге, данная категория признается состоящей из элементарных частей, и придумывается динамика, объясняющая, как эти части удерживаются вместе.

В существование атомов многие поверили благодаря работе Дальтона в начале девятнадцатого века. Элементы в точно установленных отношениях объединялись в сложные вещества. Единственное простое объяснение «закона определенных соотношений» включало существование минимальных единиц каждого элемента — атомов. Затем последовали другие аргументы в пользу существования атомов, включая кинетическую теорию газов или явление броуновского движения.

Сколько было известно элементов, столько было и различных видов атомов. Разные атомы имели совершенно разные массы и свойства. Никому не могло даже показаться, что из всего этого может появиться упорядоченная система. Тем не менее, Менделеев был убежден, что природа уготовила очень простой секрет; он верил, что «слава Божия — облекать тайною дело, а слава царей — исследывать дело» (Прит., 25:2).

Шесть лет прошло между созданием им периодической таблицы и ее экспериментальным подтверждением. Открытие элементов галлия, германия и скандия, обладающих в точности предсказанными свойствами, заставило замолчать тех, кто считал, что описательные достижения периодической таблицы — не более чем совпадения.

В начале двадцатого века Резерфорд показал, что атом не является элементарной частицей. Наблюдая упругое рассеяние альфа-частиц золотом, он заключил, что бóльшая часть массы атома сосредоточена в его маленьком плотном ядре. Каждый атом состоял из точечного «партона», окруженного электронным облаком. Динамику этой системы суждено было объяснить квантовой механике, когда она получила должное развитие, и тогда же были до конца поняты таинственные успехи таблицы Менделеева.

Значит, элементарны ядра атомов? Но и этому не суждено было сбыться. Различных ядер было слишком много, чтобы можно было поверить в то, что все они элементарны: по крайней мере, одно ядро должно соответствовать каждому элементу. Открытие изотопов показало, что количество самостоятельных ядер в действительности превышает количество элементов. Масса каждого ядра оказалась примерно целочисленным кратным массы атома водорода. Более того, Мозли показал, что химические свойства каждого элемента можно привести в соответствие с другим целым числом — атомным номером. Наблюдаемая модель атомных масс и номеров была убедительным ключом к пониманию того, что ядро является составной системой. Однако все попытки создать ядра из простейшего ядра (протона) и электронов попросту терпели неудачу.

Единственным экспериментальным открытием, наиболее важным для объяснения структуры ядра, стало открытие нейтрона. Сразу же стало очевидно (непредубежденным людям), что ядра образованы двумя видами «нуклонов»: протонами и нейтронами. Количество составляющих нуклонов — это атомная масса; количество протонов — это атомный номер. Просто, как дважды два четыре. Заключительный этап данной схемы почти завершен. У нас действительно есть достаточно удачная теория структуры ядра: так называемые сильные взаимодействия отвечают за ядерную связь, вследствие чего можно объяснить многие тонкости ядерной физики. В течение некоторого времени кое-кто даже считал, что мы наконец-то нашли основные строительные кирпичики, образующие материю.

В 1947 году Джордж Гамов писал:

«Но конец ли это? — можете спросить вы. — Какое мы имеем право допускать, что нуклоны, электроны и нейтрино действительно элементарны и не могут быть разделены на еще более мелкие составляю-

щие? Разве всего полвека назад атомы не считали неделимыми? И при этом какую сложную картину они являют собой сегодня!» Ответ состоит в том, что, несмотря на безусловную невозможность предсказания будущего развития науки о материи, сегодня мы располагаем гораздо более здравыми причинами, чтобы считать, что наши элементарные частицы действительно являются основными единицами и не могут быть разделены далее. Тогда как якобы неделимые атомы проявляли очень и очень разнообразные и довольно сложные химические, оптические и прочие свойства, элементарные частицы современной физики обладают чрезвычайно простыми свойствами; в действительности, по своей простоте, их даже можно сравнить со свойствами геометрических точек. Кроме того, вместо достаточно большого количества «неделимых атомов» классической физики, сейчас в нашем распоряжении остались всего три существенно различные категории: нуклоны, электроны и нейтрино. И несмотря на сильнейшее желание и стремление свести все к самой простейшей его форме, все невозможно свести к ничему. Таким образом, мы, судя по всему, действительно достигли цели своих поисков основных элементов, составляющих материю.

Однако этой картине очень скоро суждено было измениться. Юкава предсказал существование частиц, которые должны переносить ядерные силы точно так же, как фотоны переносят электромагнетизм. Его «мезотроны» впервые наблюдались в 1948 году и, в конце концов, были названы «пионами». Стало ясно, что нуклоны не имеют ничего общего с простотой геометрической точки. Подобно атомам и ядрам, они обладают широким разнообразием свойств. Нуклоны имеют «аномальные» значения магнитного момента, отличные от предсказанных теорией точечных частиц Дирака. Они проявляют многочисленные электромагнитные свойства, которых мы могли бы ожидать от частиц, имеющих определенный размер. Кроме того, существует много, много частиц типа нуклонов и пионов, которые участвуют в ядерном взаимодействии. Странные частицы были впервые обнаружены в 1947 году.

Затем, в 1954 году, было открыто возбужденное состояние нуклона: первый «резонанс», время жизни которого было слишком коротким, чтобы его можно было измерить непосредственно. Тогда же придумали слово «адрон», которым называли любые из этих сильно взаимодействующих частиц. К началу шестидесятых годов насчитывалось более сотни наблюдаемых адронов. Все эти частицы были четко связаны с нейтронами и протонами. Все они казались в равной степени элементарными или не элементарными. Этот демографический взрыв, а также ядерная демократия, к которой он привел, стали первым явным признаком наличия еще одного слоя луковицы.

Понятие изотопического спина дает частичную классификацию адронов. Его распространение на схему приблизительной симметрии, называемую «восьмеричным путем», сыграло для адронов примерно ту же роль, что и периодическая таблица для атомов. Эта схема тоже оказалась способной делать замечательные предсказания. Наблюдение в 1964 году Ω^- с ожидаемыми свойствами положило конец всем сомнениям. В 1963 году Гелл-Манн и Цвейг придумали кварки, которые были нужны в качестве небольшого набора элементарных составляющих (три), образующих многие адроны. Кварковая теория обеспечила естественное объяснение наблюдаемой систематики адронов. Отклонения от точной симметрии отражали всего лишь спектр масс трех кварков.

Кроме того, усовершенствованная версия эксперимента Резерфорда обеспечила более прямое свидетельство существования кварков внутри нуклонов. Энергия бомбардирующих частиц была выше, причем это были электроны, а не альфа-частицы, однако интерпретация мало чем отличалась. Казалось, что каждый нуклон состоит из трех точечных «партонов», которые каким-то образом удерживаются вместе.

Сегодня все считают, что партоны — это кварки. Неабелева калибровочная теория — хромодинамика — отвечает за взаимодействие между кварками. Более косвенно, хромодинамика лежит в основе сильных взаимодействий между адронами. Данная ситуация имеет близкую параллель в атоме, где электроны связаны электродинамическим взаимодействием, однако взаимодействие между атомами описывает гораздо менее прямая сила Ван дер Ваальса. Сейчас сильные взаимодействия рассматриваются как вторичное следствие гораздо более фундаментального хромодинамического взаимодействия.

Таким образом, сейчас мы используем кварки и лептоны как самые основные кирпичики, составляющие материю. Спустились ли мы до самого элементарного слоя микромира или нет, пока совершенно неясно. Конечно, лептоны во всех отношениях ведут себя именно так, как если бы они действительно были элементарными. Кварки гораздо более загадочны. Согласно современной догме их невозможно получить по отдельности. Каким образом мы можем продемонстрировать структуру кварка, если мы даже не можем отделить его от адрона? Быть может, через невозможность нахождения кварков природа пытается дать нам знать, что мы достигли конца цепочки. Однако сэр Денис Уилкинсон говорит:

Но нам известно, что принять это мы не сможем. Мы знаем, что, независимо от того, сможем мы добраться до кварков или нет, мы все равно будем говорить о них и обсуждать их анатомию и внутреннюю структуру. Мы будем обсуждать их вид и строение, и, несмотря на то,

что мы, быть может, никогда всего этого не узнаем точно, что-то внутри говорит нам, что именно так все и должно быть.

Первый симптом неэлементарности — в случае с атомами, ядрами и адронами — всегда был одним и тем же: неуправляемый рост количества самостоятельных частиц, претендующих на элементарность. Как мы увидим, существуют некоторые данные, показывающие, что это случилось снова. Давайте подойдем к настоящей ситуации в плане исторического контекста лептонно-адронной симметрии. До 1932 года были известны всего один адрон (протон) и один лептон (электрон). Новая эра началась с почти одновременного открытия нейтрона и изобретения нейтрино. В действительности, нейтрино был обнаружен только в 1956 году, но уже в начале тридцатых годов в пользу его существования приводились железные аргументы. Теперь, когда мы знаем, что нуклоны состоят из двух видов кварков, мы можем назвать период с 1932 по 1944 годы эпохой двух кварков и двух лептонов.

И опять два грандиозных открытия возвестили о начале новой эры. Мюон впервые увидели в 1938 году, но приняли за адрон. Ситуация прояснилась в середине сороковых годов, когда впервые были замечены еще и странные частицы. Электроны, нейтрино, мюоны, u-, d- и s-кварки — это элементарные частицы третьей эпохи лептонно-кварковой симметрии 1944–1962 гг.

В 1962 году ученые обнаружили, что мюонное нейтрино отличается от электронного. Это привело к единственному важному периоду лептонно-кварковой асимметрии: междуцарствию 1962–1974 гг. За это время физики настолько свыклись с идей существования всего трех кварков, что аргументами в пользу существования четвертого, в основном, пренебрегали. Эта эпоха завершилась в ноябре 1974 года открытием J/ψ-частицы, которое одновременно было сделано в Брукхейвене и в SPEAR. Очень скоро ученые поняли, что эта частица образована очарованным кварком и его антикварком; ее назвали чармонием, по аналогии с позитронием, описывающим аналогичную лептонную конфигурацию.

Четвертая эпоха лептонно-кварковой симметрии была замечательна тем, что ознаменовала своего рода четность между существенными и несущественными частицами. Двух кварков и двух лептонов было бы достаточно, чтобы создать всю Вселенную, в которой мы живем. Создается впечатление, что не нужны ни очарованный и странный кварки, ни мюоны и их нейтрино. Каждая из существенных частиц играет важную роль в повседневном мире. Даже нейтрино важно: оно необходимо для синтеза элементов и питает Солнце и звезды. В течение некоторого времени нам казалось, будто Природа просто использовала в два раза

больше кирпичиков, чем это было необходимо, и это великое дублирование само по себе можно было рассматривать как ключ к головоломке.

К сожалению для этого понятия, мы перешли в пятую эпоху лептонно-кварковой симметрии. Самое консервативное объяснение данных, недавно полученных Ледерманом, состоит в существовании пятого кварка, примерно в три раза более тяжелого, чем очарованный; этот кварк никто не предсказывал, быть может, никто его не хотел, но он есть. SPEAR и DORIS представили неопровержимое свидетельство существования пятого лептона, который примерно в 17 раз тяжелее мюона. Четвертая эпоха лептонно-кварковой симметрии оказалась очень недолговечной.

Достаточно ли нам лишь пяти кирпичиков каждого вида? Теоретические аргументы утверждают, что нет. Возможно, что новый лептон, называемый таоном, должен иметь свое собственное нейтрино. Почти определенно, что он не может обходиться, используя одно из имеющихся нейтрино. Точно также существование одиночного кварка без пары могло бы привести к проблемам в области адронов. Отсутствие нейтральных токов, изменяющих аромат, которое сейчас более или менее установлено, обычно требует существования пар кварков. Так что мы, скорее всего, еще не пришли к концу. Идея лептонно-кварковой симметрии, которая была так важна в прошлом, может остаться, а может и уйти. В настоящее время она являет собой лишь ключ. Что нам нужно — так это теория, которая скажет, сколько должно быть кварков и лептонов.

Одно кажется несомненным: у нас опять слишком много фундаментальных кирпичиков; по крайней мере, дюжина, а может, и больше. Возникает сильное искушение подумать, что в луковице есть еще слои и что настанет день, когда мы узнаем, что кварки и лептоны состоят из чего-то еще более простого и маленького. Такое мнение поддерживают многие китайские физики. Я бы предложил, чтобы эти чисто гипотетические строительные кирпичики, из которых состоит вся материя, назвали «маонами» в честь покойного председателя Мао[1], который настаивал на фундаментальном единстве природы.

Маоны — это дело будущего. А пока в нашем распоряжении множество видов кварков и лептонов, из которых сейчас только четыре кажутся нам существенными. Полезными частицами являются те, которые по случаю рождения самые легкие. Не только мы происходим из праха и обитаем на неприметном и неважном осколке Вселенной, но и сама Вселенная состоит из небольшого меньшинства наиболее фундаментальных частиц: истинных малышек.

[1]Имеется в виду Мао Цзэдун (1893–1976) — председатель центрального комитета коммунистической партии Китая. — *Прим. пер.*

Есть ли будущее у физики элементарных частиц?

Физики работают с неописуемым диапазоном расстояний: от непостижимо малого масштаба Планка, равного 10^{-33} см, до невероятно огромного размера видимой Вселенной, большего в 10^{61} раз. На этой космической линейке последовательно располагаются многие научные дисциплины: физика частиц, ядерная и атомная физика, затем химия, биология и геология и, наконец, астрономия и космология. Все эти области являются квантово-механическими, а квантовая механика началась с Нильса Бора.

Бор начал не с начала линейки и не с ее конца, что типично, а с путаницы в самой ее середине — с атома. Он увидел, что классические законы не в состоянии описать содержащий ядро атом, поэтому он изобрел новые законы, которым это было по силам. Его законы эволюционировали, образовав теорию, объяснявшую тайны атома и успехи периодической системы. Но квантовая механика — ревностный владыка, который не признает конкуренции. Квантовые законы должны править на всем протяжении линейки.

Квантовый атом привел к квантовому ядру, состоящему из нуклонов, которые удерживаются вместе квантово-механическими силами. Сами нуклоны образованы кварками, квантовую природу которых демонстрирует открытие множества «стационарных состояний» протона. Чем меньше объекты, тем больше они проявляют квантово-механических свойств. По этой причине у физиков несколько десятилетий ушло на то, чтобы признать эти состояния тем, чем они, в действительности, являются.

Для объектов, имеющих размер горы и больше, гравитация является доминирующей силой, а квантовая механика кажется не столь важной. Однако звезды светят по причине сложного взаимодействия всех сил природы в некой игре, которая непременно имеет квантово-механический характер. Не обошлась без квантовой механики и горячая ранняя Вселенная, существовавшая 10 миллиардов лет назад, когда стряпала бóльшую часть легких ядер, которые сейчас нас окружают. Все это работает настолько хорошо, что мы знаем, что тогда законы кванто-

вой механики ничем не отличались от тех, что правят сейчас. Воистину *plus ça change, plus c'est la même chose*[1].

В первые мгновения образования Вселенной все было настолько горячим, что физика частиц и ее «зоопарк», населенный кварками и лептонами, обладали верховной властью во всей Вселенной. Линейка свернулась в клубок — это уже не линейка, а змея, которая проглатывает свой хвост, Ороборос[2]. Физика микромира — это физика всего космоса. Большое и малое едины. Наши земные ускорители одновременно являются и микроскопами с небесным разрешением, и миниатюрными копиями великого ускорителя, в котором все они находятся, — всей Вселенной.

Объединение большого и малого имеет две стороны. Сама гравитация должна быть квантово-механической теорией: в конечном счете, Бор и Эйнштейн должны примириться. Квантовая гравитация господствует только во время, столь раннее, что температура Вселенной приближается к массе Планка, или наоборот, в масштабе самых маленьких расстояний длины волны Планка – Комптона. И опять змея проглатывает свой хвост, но происходит это при энергиях и расстояниях, далеких от любой возможной лаборатории и присущих самой Вселенной.

Скромная область атомных размеров Бора беспрестанно расширялась вследствие высокомерного редукционизма современного физика, пока не охватила все это дело. Мы по-прежнему сталкиваемся с тайнами в масштабах больших расстояний: Что такое темная материя Вселенной? Почему шаровидные скопления кажутся старше самой Вселенной? Как образуются галактики? И так далее. Однако мы достигли замечательного прогресса в отношении более маленьких масштабов. Мы располагаем тем, что кажется правильной, полной и согласованной теорией, описывающей все известные явления микромира: квантовой хромодинамикой и теорией электрослабых взаимодействий.

Во время отпуска, который я провел на прекрасном острове Ямайка, я обнаружил, что жителям этого острова известен всего один сорт сыра. Они используют его для приготовления пиццы, сэндвичей и омлета. Он называется стандартным сыром. То же самое и в физике частиц. У нас есть одна теория, которая работает, и это хорошая теория. Квантовая хромодинамика и теория электрослабых взаимодействий образует нашу стандартную модель физики частиц. Она используется в космологии, астрофизике, ядерной физике и физике частиц. Выбора действительно нет.

---

[1] Чем больше что-то меняется, тем больше оно остается неизменным (фр.) — *Прим. пер.*

[2] Ороборос (Ouroboros, Oroboros) — это древний алхимический символ, имеющий форму круга и изображающий змею, которая пожирает свой хвост. Он означает смерть и возрождение, или, в более общем смысле, конфликт между изменчивостью и постоянством — вечно меняющуюся Вселенную. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

Ни одно известное явление не предполагает существования какой-то структуры за рамками стандартной модели. Ни одна измеренная величина не противоречит стандартной модели. В ней нет ни внутренних противоречий, ни свободных концов. Тем не менее, никто не считает стандартную модель удовлетворительным завершением поиска, которым занимаются специалисты по физике частиц. Во-первых, квантовая хромодинамика (КХД) не обладает той предсказательной способностью, на которую можно рассчитывать. Она не дала наблюдаемый спектр масс адронов. Мы предполагаем, что это вопрос вычислений, который будет решен в процессе дальнейшего изучения и будущего развития вычислительных систем. Но нерешенными остаются другие фундаментальные головоломки.

Почему калибровочная группа является именно тем, чем она является? Почему существует три семейства элементарных фермионов? Существует ли бозон Хиггса или что-то другое? Разве 17 основных частиц и 17 произвольных параметров — не слишком большое количество? Как насчет квантовой теории гравитации?

Вы заметили, что мы сделали большой скачок в сторону? Когда-то мы, специалисты по физике частиц, могли честно претендовать на то, что изучаем предельную структуру обыкновенной материи: от атомов к их ядрам и к различным видам кварков. Ситуация начала меняться около 40 лет назад, когда был открыт мюон. Говорят, что И. А. Раби, как и другие нью-йоркские физики, обожающий китайскую кухню, услышав о мюоне, спросил: «И кто же его заказал?». Это один из немногих вопросов, на которые не удалось ответить студенту Раби, Юлиану Швингеру. И даже студент самого Швингера, искренне ваш автор, еще не знает ответа.

Сегодня к мюону присоединились тау-лептон, странность, очарование, t и b-кварки. Мы уже не изучаем структуру атома, ибо две трети наших частиц не имеют ничего общего с земной материей. Они скорее являются экзотикой, которую можно обнаружить лишь на больших ускорителях или в осколках, образованных столкновениями космических лучей. Они связаны с «обыкновенной физикой» не больше, чем элементы с номерами 108 и 109 связаны с «обыкновенной химией». Судя по всему, мы пытаемся дать ответ на бесконечно трудный и дорогостоящий второстепенный вопрос. Мы что — потеряли основную нить?

Нет, свой путь мы не потеряли. Просто мы с него сошли. Стандартная теория не может быть нашим окончательным ответом просто потому, что она не может обосновать столь большой скачок в сторону. Подобно своему гарвардскому предшественнику, Перси Бриджмену, я (и уверен, что мы) достаточно неоправданно верю в конечную простоту, в существование одной и истинной теории; эту веру оправдать невозмож-

но и, тем не менее, она всегда оправдывается замечательным прогрессом, который происходит в нашей дисциплине. Вопрос, который сегодня представляется нам второстепенным, однажды окажется центральным. Мюон найдет свое место в Солнце рядом со своими братьями.

Да, дети мои, у физики элементарных частиц есть будущее. Тем не менее, сегодня она находится под угрозой, причем, вероятно, под такой серьезной угрозой она не была еще никогда.

Нашей дисциплине угрожает недавний развод, который произошел в физике частиц между экспериментом и теорией. Вероятно, вся эта каша заварилась при появлении квантовой хромодинамики — предположительно правильной теории, лежащей в основе кварковой структуры нуклонов и самой ядерной силы. Это не просто *какая-то* теория, это, в рамках некоторого разумного контекста, *уникальная* теория. В принципе, КХД дает полное описание и объяснение ядерной физики и физики частиц при достижимых энергиях. Несмотря на то, что на большинство вопросов невозможно ответить полно из-за невозможности выполнить необходимые вычисления, эта теория все же получила много качественных (и несколько количественных) подтверждений. Она почти определенно является «правильной». КХД — это не та угроза, о которой я говорю. Она *не* была причиной развода эксперимента и теории; на самом деле, она привела к более гармоничному функционированию и более тесному сотрудничеству экспериментаторов и теоретиков. И все же она посеяла семя, которое взошло и расцвело в другом месте. Она предлагает и утверждает, что критериями истины могут быть изящность и уникальность. Я верю в эти критерии. Однако их необходимо подтвердить и укрепить с помощью эксперимента. Я согласен с лордом Кельвином, который сказал:

> Когда вы можете измерить то, о чем говорите, и выразить это в числах, тогда вы кое-что об этом знаете. А когда вы не можете выразить это в числах, ваше знание ограниченно и неудовлетворительно. Быть может, это начало знания, но вряд ли в своем мышлении вы продвинулись к научной ступени.

И по этому критерию, КХД — наука. Но можно ли сказать то же самое о суперструнах и им подобных?

Квантовая механика заразительна, и в ее контекст необходимо вписать гравитацию. Некоторые из моих друзей теоретиков считают, что они уже нашли уникальную квантовую теорию гравитации: суперсимметричную систему струн, сформулированную в рамках десятимерного пространства-времени. Бóльшая часть физики суперструн лежит при вечно недостижимых энергиях, превышающих массу Планка. В своем

собственном контексте эта теория уникальна. Она может быть даже конечной и самосогласованной. Кажется даже, что она способна описать низкоэнергетические явления, которые мы можем наблюдать в лаборатории, но доказать, что она действительно это делает, сложно. В принципе, она предсказывает, какие частицы существуют. В принципе, количество свободных параметров сведено к нулю. Однако на практике она не сделала ни одного предсказания, которое можно было бы проверить экспериментально, и, возможно, не сделает ни одного такого предсказания еще в течение десятилетий. Специалист по теории струн обратился к внутренней гармонии. Разве можно спорить с тем, что истину определяют изящность, уникальность и красота? Неужели математика вытеснила и превзошла эксперимент, который утратил свою значимость? Неужели земные проблемы, которые я называю физикой, а они — феноменологией, в каком-то далеком будущем сведутся к переливанию из пустого в порожнее? Неужели дальнейшие попытки проведения экспериментов не только сложны и дороги, но еще и *бесполезны* и *излишни*? Быть может, я несколько преувеличил доводы, которые специалисты по теории струн приводят в защиту своей новой версии средневековой теологии, где вместо ангелов используются многообразия Калаби – Яу. Однако угроза очевидна. Впервые за всю историю мы можем увидеть, как наш благородный поиск завершится и как Вера вновь вытеснит Науку. Однако лично я настроен оптимистично. Теория струн, возможно, будет господствовать в течение следующих 50 лет фундаментальной теории, но лишь в том смысле, в каком в течение последних 50 лет господствовала теория Калузы – Клейна. Быть может, нам сто́ит обратить свое внимание на прошлое, чтобы получить руководство в отношении будущего.

Поиск элементарных составляющих материи имеет циклическую историю, которая переходит от хаоса к порядку, к новому уровню структуры и снова к хаосу. За последний исторический период мы прошли через четыре подобных цикла: атомы, их ядра, адроны, а теперь кварки и лептоны.

Вспомните о поиске новых химических элементов, который предшествует Лавуазье и продолжается по сей день. На рисунке 1 показан рост количества известных элементов со временем. Самые последние дополнения, номера 108 и 109, были созданы и наблюдались в Германии в восьмидесятых годах. В течение более чем двух с половиной столетий кривая возрастает почти линейно, выказывая всплески открытий, вызванных созданием новых технологий электрохимии, спектроскопии, а совсем недавно и искусственного синтеза.

На полпути в истории открытий химических элементов была изобретена периодическая таблица. Систематический порядок, выявленный

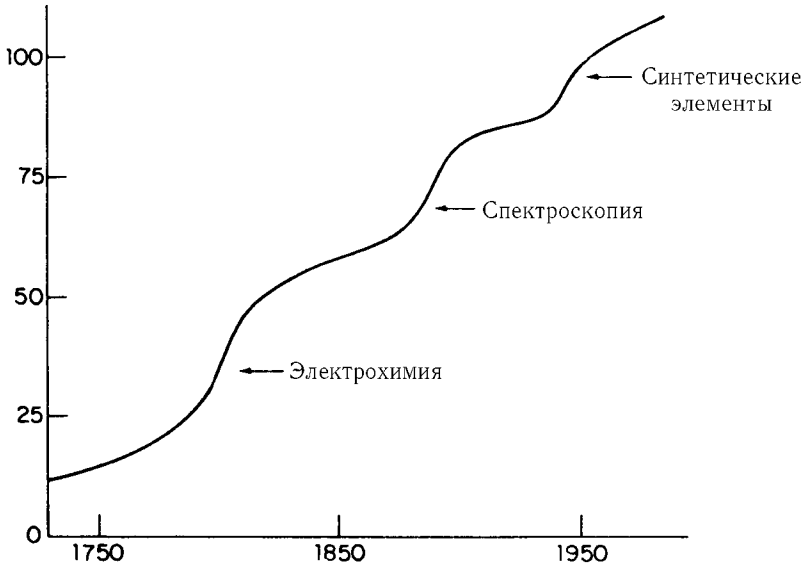


Рис. 1. Первый демографический взрыв. Рост количества известных химических элементов за последние три столетия. Эту кривую можно назвать приблизительно линейной с наложенными всплесками открытий, произошедших в результате развития технологий. Элементы 108 и 109 были получены в восьмидесятых годах. Будут ли созданы новые?

с ее помощью, полностью объяснили с помощью электронов, ядер и квантовых законов Бора. Вскоре ученые обнаружили, что и сами ядра являются составными структурами. Открытие изотопов показало, что разновидностей ядер куда больше, чем химических элементов. Действительно, на рисунке 2 изображен график, отражающий 399 видов ядер, период полураспада которых превышает один год. (Мой коллега Рой Глаубер подумал, что их 400.) Ясно, что нуклидов слишком много, чтобы они могли быть элементарными. Целые значения Z, открытого Мозли, и почти целые значения A представляют второй уровень порядка. Структура ждала открытия нейтрона, которое было сделано в год моего рождения.

Все начинало упрощаться. В конце сороковых годов двадцатого века Гамов писал, что элементарных частиц всего три: нуклон, электрон и нейтрино. Эти точечные частицы считали основными кирпичиками,

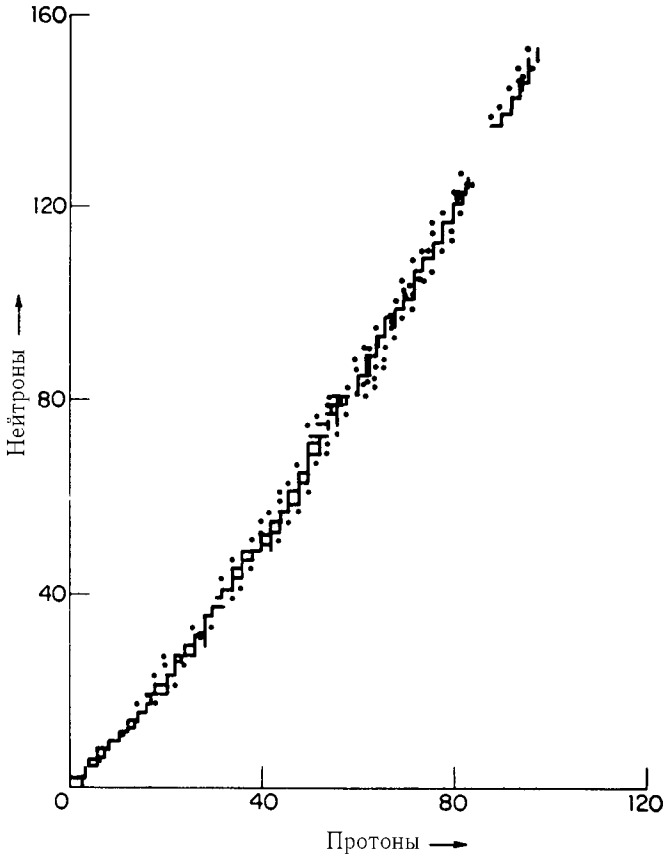


Рис. 2. Второй демографический взрыв. Существует ровно 399 видов ядер, период полураспада которых превышает один год. Большинство из них находятся на едином «полуострове», но некоторые, включая уран, образуют отдельный «остров стабильности». Существует ли второй такой же остров, который еще ждет своего открытия?

образующими материю. Увы, все было не так просто. Вскоре открыли пионы и странные частицы. Когда ввели в эксплуатацию большие ускорители, начался настоящий демографический взрыв ядерных частиц, или адронов. На рисунке 3 показан рост количества известных типов адро-

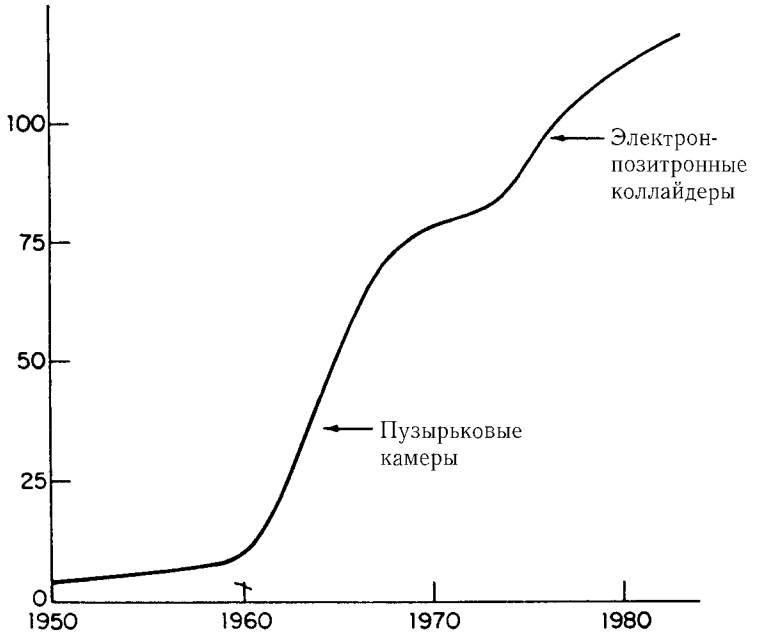


Рис. 3. Третий демографический взрыв. Рост количества известных адронных мультиплетов за три последних десятилетия. И опять, кривая приблизительно линейна и имеет всплески, вызванные вводом в эксплуатацию новых инструментов. Сейчас адронов почти столько же, сколько и химических элементов. А скоро их станет еще больше.

нов со временем. Кривая поднимается примерно линейно от нескольких адронов к более чем сотне этих частиц за временной промежуток, равный всего лишь нескольким десятилетиям. Эта кривая напоминает взрыв известных видов атомов, только по времени она сжата в 10 раз. Как и прежде, всплески кривой соответствуют достижениям экспериментальной технологии: пузырьковым камерам и электрон-позитронным коллайдерам.

И опять, примерно в середине кривой раскрывается новый уровень порядка: восьмеричный путь Гелл-Манна и Неемана. Эта теория предсказала новые частицы с весьма своеобразными свойствами. Открытие знаменитой Ω^--частицы сыграло в этом третьем цикле ту же роль, что и обнаружение скандия, германия и галлия в первом. Гелл-Манн был

ничуть не более безумным, чем Менделеев. В третий раз появление систематического порядка привело к открытию нового уровня структуры. Оказалось, что адроны обладают всеми свойствами сложных систем: было показано, что они состоят из кварков.

Современные претенденты на право быть элементарными частицами пережили более плавный демографический взрыв, нежели их предшественники. Временна́я эволюция количества известных видов кварков, лептонов и переносчиков взаимодействий показана на рисунке 4. В нашей стандартной теории присутствует всего 17 кирпичиков, четырнадцать из которых были однозначно открыты в лаборатории. Косвенное существование тау-нейтрино неоспоримо. Заглушаемые сообщения об открытии t-кварка регулярно появляются в *Physics Today* и других подобных журналах. Пока самой важной из отсутствующих, но предсказанных частиц является бозон Хиггса. Если он достаточно легок, то его откроют на LEP, Большом электрон-позитронном коллайдере, который действует в Европейском исследовательском консорциуме CERN. Если его масса лежит в промежуточном диапазоне, то он покажется в США на предложенном Сверхпроводящем суперколлайдере (SSC) или в CERN на предложенном Большом адронном коллайдере. Бозон Хиггса — это последнее серьезное подтверждение стандартной модели, которое ждет своего открытия.

Несмотря на то, что последний демографический взрыв, или переход к хаосу, был достаточно мягким, ему свойственен глубоко новый и волнующий аспект. В прежние циклы мы изучали природу материи, достаточно обычной материи, которая встречается повсюду на Земле. Из наших элементарных фермионов это относится всего лишь к двум видам кварков, электронам и, быть может, к электронному нейтрино. Ни один другой кварк или лептон не играет в стандартной модели сколь-нибудь важной роли. Этот большой скачок в сторону указывает на то, что великий прогресс у нас еще впереди. Единая и истинная теория, которую мы ищем, быть может, не лучшая; однако этот мир — несомненно, *единственный* возможный мир, и каждая частица в нем должна иметь важную (и заметную!) *raison d'etre*[1].

Следующий уровень порядка, несомненно, раскрывает современная периодическая таблица кварков и лептонов, изображенная на рисунке 5. Элементарные фермионы образуют семейства, каждое из которых обладает одинаковым периодически повторяющимся набором сильных и электрослабых свойств. Этот набор объясняется с помощью великого объединения, но причина, на первый взгляд избыточного, копирования семейств остается неясной.

[1]Причина существования (фр.) — *Прим. пер.*

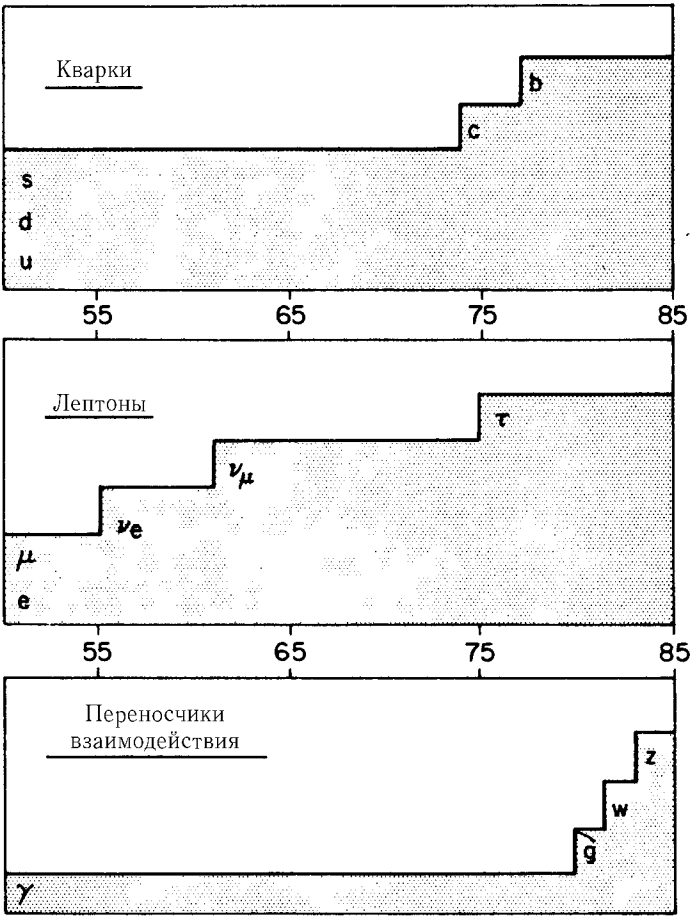


Рис. 4. Современный демографический взрыв элементарных частиц. Согласно нашей канонической теории остается найти по одной частице каждого типа. С t-кварком и тау-нейтрино проблем почти нет. Однако поиск бозона Хиггса — это самая большая проблема для сторонников стандартной модели. Будет ли он найден? Или будет найдено что-то неожиданное?

Со времен Бора до настоящего времени физика частиц пережила грандиозный прогресс. Многие прошлогодние проблемы, и даже

большинство этих проблем, получили решение. В большой степени наш успех является результатом экспериментального открытия. В общем, необходимой эмпирической основой нашей теории являются терпение и усидчивость. Это накопленное знание, существованием которого мы обязаны очень многим ученым, лишь немногих из которых мы вспоминаем, говоря об особенно поразительном или важном открытии. Хотя все это уже история, перемежаемая драматическими и удивительными событиями. Замечательно часто случались вещи вроде непредвиденного открытия рентгеновских лучей или радиоактивности.

Например, в тридцатых годах был открыт нейтрон, затем дейтрон, позитрон и мюон. И не будем забывать о ядерном синтезе.

Сороковые годы были свидетелями приручения ядерной силы, если таковым можно назвать использование атомной бомбы. Был измерен лэмбовский сдвиг, приведший к удивительному развитию согласованной релятивистской квантовой теории. Это было десятилетие пионов и странной частицы.

В пятидесятые годы нарушение четности удивило почти всех. То же самое произошло, когда были выявлены еще более странные свойства странных частиц: связанное с ним создание и нейтральное поведение каона. Нейтрино действительно «увидели» в лаборатории, где, кроме того, было обнаружено первое возбужденное состояние нуклона. Был пущен в действие первый ускоритель, достаточно мощный, чтобы создать антиматерию. Открытие антипротона было серьезным достижением, но вряд ли кого-то удивило.

Швингер ничуть не удивился открытию второго вида нейтрино в шестидесятых годах, чего не скажешь о большей части нас. Демографический взрыв новых видов адронов вышел из под контроля. Словно по мановению волшебной палочки эти новые частицы образовали полные супермультиплеты $SU(3)$-симметричной схемы. Глубоконеупругие электронные рассеивания создали убедительное свидетельство существования точечных «партонов» в протоне, который, как и атом, оказался далеко не рождественским пудингом. А кто предсказывал нарушение симметрии относительно обращения времени?

Так начались семидесятые годы. Сумасшедшая теория, претендующая на объединение слабых и электромагнитных взаимодействий, оказалась перенормируемой, и подозрительные экспериментаторы очень удивились, когда обнаружили, что ее нейтральные токи действительно существуют. Открытие J/ψ-частицы тоже оказалось большим сюрпризом, а некоторые из нас удивились и существованию очарованных частиц. Как будто всего этого было мало, обнаружились еще тау-лептон, ипсилон-частица и связанные с ними прелестные частицы.

-1	-1/3	0	2/3
e	d	ν_e	u
μ 1938	s 1947	ν_μ 1961	c 1974
τ 1975	b 1976	ν_τ	t

Частицы материи

	1980	1983	1984	
γ	g	W	Z	HIGGS

Переносчики взаимодействий

Рис. 5. Периодическая таблица кварков и лептонов и дополнительный список переносчиков взаимодействий. Два десятилетия назад эта таблица предполагала возможность существования очарованного кварка. Сегодня она намекает на более глубокий уровень элементарной структуры. Каждый ряд, или семейство, являет собой минимальную единицу, свободную от аномалий. Почему этих семейств всего три, или их больше, чем три? В первой таблице Менделеева не было места для инертных газов. Неужели мы опять совершили подобное упущение?

Восьмидесятые годы были замечательно спокойным периодом. Удивительным было лишь то, что CERN сумел начать своевременный и эффективный поиск промежуточных векторных бозонов. Любое проявление международного сотрудничества всегда удивляет. Однако существование W- и Z-бозонов (как и существование антипротона) на самом деле нельзя считать чем-то совершенно неожиданным.

Отсутствие фундаментального, но неожиданного открытия в этом десятилетии нельзя назвать результатом отсутствия экспериментальных попыток. За восьмидесятые годы мы получили *сообщения* о нескольких сюрпризах. Беда в том, что, судя по всему, в действительности этих

сюрпризов не было. Возможно, следующего списка подобных неоткрытий будет достаточно:
Магнитный монополь
Нейтринные осцилляции
Массы нейтрино (дважды: в России и в Канаде)
Дзета-частица
Двойной бета-распад без излучения нейтрино
Мюоны из Cygnus X-3 (все еще жива?)
Распад протона
Запрещенные распады типа $\mu \to e\gamma$
Необъяснимые «дилептоны неправильного знака»
Свободные кварки
Анамалоны
Порядка полудюжины аномальных событий, которые наблюдались на коллайдере в CERN и претендуют на то, что показывают существование новой физики за пределами стандартной модели. Ни один из этих эффектов не является установленным. Тем, кто немало потрудился, чтобы подтвердить стандартную модель, пока не удается ее опровергнуть. А как они этого хотят!

В чем смысл этого почти невероятного списка неудавшихся, но благородных попыток? Неужели эпоха великих сюрпризов в физике частиц подошла к концу? Неужели природа истощила свой запас хитростей? Располагаем ли мы сейчас достаточным количеством ключей, чтобы создать теорию всего? А быть может, мы запустили в действие самостоятельное пророчество, в котором никакие новые открытия не приведут к созданию новых машин, а также гарантию того, что завтра новых открытий не произойдет? Это очень опасное время для физики частиц.

Существует два подхода к сложившейся в настоящее время дилемме: наличию теории, которая, с одной стороны, слишком успешна, а с другой стороны, безусловно, незавершена. Один из них скучен, а другой страдает помпезностью: это движение вверх от простого эксперимента к теории и движение вниз, связанное с чисто позитивным мышлением — путь Бора и путь Эйнштейна. Я думаю, что прошлое может *преподать* нам урок. Путь Бора оказался гораздо более успешным, чем этого можно было ожидать. Путь Эйнштейна — поиск полной и единой теории *в настоящий момент* — оказался тягостным путем в никуда.

Однажды, если наш вид доживет до этого момента, мечта Эйнштейна может стать реальностью. Безусловно, связь между гравитацией и другими взаимодействиями природы *существует*. Майкл Фарадей, подобно Эйнштейну и всем нам, верил в существование такой связи.

Но, в отличие от Эйнштейна, он предпочитал двигаться вверх. Почти в конце своей жизни, 19 июля 1850 года, после неудавшегося поиска экспериментально проверяемой связи между взаимодействиями, он написал:

На этом мои попытки пока завершаются. Результаты отрицательны. Они не поколебали моей сильной уверенности в существовании связи между тяготением и электричеством, хотя и не дали никакого доказательства ее существования.

Теория Всего придет в свое время, если мы позволим ей это сделать. Я убежден, что нам еще предстоит узнать много нового о явлениях природы. Одна из причин неудачи поисков Эйнштейна состояла в том, что он знал физику в недостаточном объеме. Современные события не означают, что физика частиц подошла к концу своего пути. Нам еще предстоит сделать удивительные экспериментальные открытия. Если мы будем искать, и только в этом случае, мы найдем. Это лишь вопрос настойчивости. Выживут ли научные традиции, установившиеся в эпоху Возрождения, в современном ненормально материалистическом обществе? Путь ясен, а как насчет Желания?

Большое и малое

Физика элементарных частиц — поиск элементарных составляющих материи и законов их объединения — занимается мельчайшими объектами. Космология — изучение происхождения и эволюции звезд, галактик и самой Вселенной — работает с самыми большими объектами. Между двумя этими крайностями можно расположить и другие науки в порядке изменения размера систем, с которыми они работают. Научная лестница начинается с физики частиц, затем поднимается к ядерной физике, атомной физике, химии, биологии, геологии, астрономии и, наконец, к космологии. Люди, работающие на концах этой лестницы, сталкиваются с самыми обширными из возможных экстраполяций повседневного опыта. Может показаться, что интересы космолога и специалиста по физике частиц расходятся так сильно, как не случается больше ни с какими учеными.

И все же у физики частиц и космологии много общего. Для обеих наук пока не установлены основные правила. Является ли Вселенная уникальным продуктом Большого взрыва или существует бесконечно много вечных и самовоспроизводящихся вселенных? Являются ли кварки и лептоны концом цепочки поисков основных кирпичиков, образующих материю, или они (наряду с фотонами и другими «элементарными» частицами) являются проявлением невообразимо крошечной суперструны?

Нет других наук, которые осаждали бы столь значительные неопределенности. Химия может быть битком набита сюрпризами (типа тефлона, дурацкой шпаклевки или напалма[1]), но все ее основные законы были открыты в начале двадцатого века, и мы почти абсолютно уверены, что они никогда не изменятся. Биология тоже полна чудес, бóльшая часть которых понимается лишь смутно — чудо человеческого знания, например, — однако каждый биолог знает, что жизнь — это, в сущности, химическое явление: продукт электромагнитных взаимодействий между сложными скоплениями электронов и атомных ядер. Космологи и физики, работающие с частицами, — последние пророки радикального переворота.

[1]Зажигательная вязкая смесь. — *Прим. пер.*

За прошедшие десятилетия, и особенно за последнее, две науки, находящиеся на противоположных концах лестницы, превратились в неразрывно связанные. Мы наблюдаем объединение изучения неизмеримо малого с изучением непостижимо большого. Этот союз проистекает из главного принципа науки: законы физики, которые мы изучаем на Земле, применимы во всем пространстве и времени. Изучая атомы и частицы на Земле, мы многое узнали о том, как рождаются звезды, как они светят и как умирают; мы начали понимать происхождение галактик, химических элементов и самой Вселенной.

И наоборот, наблюдаемые свойства Вселенной дают нам значительную информацию о физике частиц. Например, простой факт, что Вселенная не разрушилась под действием своей собственной гравитации, говорит о том, что нейтрино, самые распространенные частицы, должны быть чрезвычайно легкими, если вообще не безмассовыми. Гораздо более сложным образом наблюдаемое изобилие во Вселенной гелия ограничивает количество видов нейтрино максимум до четырех. Пока что физики видели две разновидности нейтрино и почти уверены, что существует третья: по одной на каждое из трех известных семейств элементарных частиц. Космологи говорят нам, что, как максимум, может существовать еще одно нейтрино и еще одно семейство; это предсказание проверят на большом ускорителе в CERN (Женева).

Если бы мы хотели выбрать год, когда начали сходиться макро-Вселенная и микроВселенная, то для этого вполне подошел бы 1938. Именно тогда Ханс Бете понял, что Солнце питается синтезом атомных ядер, происходящим в его коре, — результат, величина которого измеряется двадцатью тремя степенями десяти. Сегодня мы достаточно подробно понимаем процесс синтеза, а также то, как он управляет эволюцией Солнца и других звезд. Это продукт сложного взаимодействия всех четырех сил природы.

Гравитация превращает внутреннюю область Солнца в сущий ад: температура равна 15 миллионам градусов, а давление составляет 100 триллионов фунтов на квадратный дюйм. Сильная жара и высокое давление вырывают электроны из атомов, вследствие чего ядра (главным образом, протоны, так как Солнце состоит, в основном, из водорода) сталкиваются друг с другом. При столкновении двух протонов слабое взаимодействие превращает один из них в нейтрон, который сильное взаимодействие затем связывает с другим протоном. Суммарным результатом еще нескольких ядерных реакций становится слияние двух протонов и двух нейтронов для образования ядра гелия. В ходе этого процесса высвобождается значительное количество энергии. Электромагнетизм, четвертая сила, контролирует высвобождение энергии: положительно заряженные протоны отталкиваются, так что в действительности слиянием

ядер заканчиваются лишь немногие столкновения. Благодаря электромагнетизму Солнце не взрывается, а светит ровно и надежно в течение миллиардов лет.

Однако через несколько миллиардов лет, когда Солнце истощит свой запас водорода, оно начнет превращать гелий в более тяжелые элементы, вследствие чего разрастется и превратится в красного гиганта, достаточно большого, чтобы поглотить Землю и другие планеты. Быть может, это драматичный конец, но судьба Солнца — это мелочи по сравнению со взрывом, происходящим в смертной агонии звезд более крупного размера. Такая звезда без труда справляется с «водородным кризисом»; ее внутренняя температура и давление настолько высоки, что она может продолжать синтезировать более тяжелые элементы, пока наконец не покроется железной корой. На этом этапе синтез прекращается, и в отсутствие источника тепла, который помог бы ей сопротивляться гравитации, звезда переживает неистовый взрыв. Количество материи, примерно равное массе Солнца, сжимается к центру и сосредотачивается в гигантском атомном ядре: появляется нейтронная звезда. Коллапс звезды высвобождает огромное количество гравитационной энергии, вследствие чего взрыв, направленный внутрь, превращается во вспышку. Звезда становится сверхновой и светится ярче, чем вся галактика.

Эта теория звездной эволюции чрезвычайно успешно объяснила жизненный цикл звезд через ядерные реакции. Однако в последние годы ей пришлось пережить не только триумф, но и полный упадок в руках новой экспериментальной науки: нейтринной астрономии, которая больше чем когда-либо сближает друг с другом микро- и макрофизику.

Этот упадок начался с работы Реймонда Дэвиса, который в течение почти двадцати лет терпеливо отслеживал нейтрино, исходящие от Солнца. Каждый раз, когда протон в солнечной коре превращается в нейтрон, создаются еще две частицы: позитрон, или антиэлектрон, и нейтрино. Позитрон вскоре встречает свободный электрон и аннигилирует, вследствие чего высвобождается его энергия, которая медленно поднимается к поверхности Солнца и исходит от нее в виде солнечного света. Нейтрино же, напротив, проходит прямо сквозь Солнце. Около десяти процентов солнечной энергии испускаются в виде этих призрачных частиц, многие миллиарды которых, не принося никакого вреда, ежедневно, еженощно, ежесекундно пронизывают все ваше тело.

В огромном баке очищающей жидкости, помещенном глубоко под землей в шахте Южной Дакоты, Дэвис умудрился останавливать ежемесячно около дюжины солнечных нейтрино. В этом и состоит проблема: ему удается захватить лишь треть того количества нейтрино, которое он должен захватывать согласно предсказанию теории. Внутри Солнца происходит что-то странное, чего мы не понимаем. Вполне возмож-

но, что наша Солнечная модель содержит ошибки; быть может, внутри Солнца существует черная дыра. Вторая возможность — это отсутствие еще какой-то составляющей в нашей модели физики частиц, и, кроме того, нейтрино могут изменяться при прохождении такого расстояния. «Проблема солнечных нейтрино» — одна из самых больших загадок, лежащих на границе астрономии и физики частиц. В России, Канаде, Японии и Италии проводятся крупные эксперименты по изучению солнечных нейтрино с целью выяснения, что же все-таки происходит в недрах Солнца.

Однако совсем недавно теория звездной эволюции записала на свой счет грандиозную победу. В феврале 1987 года астрономы и другие зеваки увидели нечто, что на Земле не видели уже четыре века: близкую сверхновую! Какие чудеса она открыла! И самым чудесным из всех чудес, по крайней мере для физиков, стала волна нейтрино, оторвавшихся от умирающей звезды. Как и предсказывали астрофизики, увиденная нами сверхновая — а Сверхновая 1987А была ясно видна невооруженным глазом — была всего лишь крошечной частью действа. Около 99 процентов энергии взрыва было испущено в виде нейтрино, которые оторвались от звезды всего через несколько секунд, когда фотоны еще только силились выйти наружу.

Тот факт, что несколько нейтрино сверхновой были замечены на Земле, — невероятная удача и идеальная иллюстрация того, как сошлись специалисты по физике частиц и астрофизике. В начале восьмидесятых, за несколько лет до того как появилась Сверхновая 1987А, в Японии и в Огайо в эксплуатацию ввели большие подземные детекторы. Чтобы наблюдать за сверхновыми? Конечно, нет. Их целью был поиск доказательств самопроизвольного распада протонов, который свидетельствовал бы о том, что вся земная материя смертна. Специалисты по физике частиц так гордились своим успешным объединением слабого и электромагнитного взаимодействий, что начали говорить о великом объединении всех сил природы за исключением гравитации. Наиболее простая из этих моделей, выдвинутая Говардом Джорджи и мной, предсказывала, что средний протон должен жить около 10^{30} лет. В таком случае при внимательном наблюдении за тестируемой массой более чем 10^{30} протонов можно было бы увидеть, как распадаются некоторые из них.

К сожалению, все эксперименты по наблюдению распада протонов пока что терпели крах: мои теории не подтверждались. Однако ученые увидели около двадцати нейтрино от сверхновой, чем доказали, что астрофизика действительно понимает сущность сверхновых.

Более того, наблюдения кое-что дали и в отношении нейтрино. Все нейтрино от сверхновой прибывали на детекторы через десятисекундный промежуток. Это говорит о том, что все они двигались примерно

с одинаковой скоростью, практически равной скорости света. Отсюда следует, что обнаруженные нейтрино, которые относятся к типу электронных нейтрино, почти безмассовы. На самом деле, верхний предел массы электронного нейтрино, вычисленный из наблюдений сверхновой, почти равен тому, который вычислили по результатам лабораторных измерений, длившихся три десятилетия.

Этот результат связан с другой центральной проблемой современного симбиоза астрофизики и физики частиц. Около десяти лет назад, по истечении столетий тренировок своих телескопов на всем: от низких облаков газа и пыли до звезд, галактик и галактических скоплений астрономы сделали страшное и сбивающее с толку (их) открытие: они обнаружили, что бóльшая часть материи Вселенной не является «ничем из вышеописанного». Она не находится ни в форме светящихся звезд, ни групп звезд. Она не является ни пылью, ни газом, которые обнаружили бы себя, поглощая свет далеких звезд. Измеряя скорости вращения галактик, астрономы показали, что они вращаются гораздо быстрее, чем это происходило бы, если бы они состояли только лишь из светящейся материи. Вместо этого восемьдесят или девяносто процентов массы галактик, судя по всему, сосредоточено в огромном сферическом гало, образованном таинственной, темной и невидимой материей.

Что же это такое? Не исключена вероятность того, что эта темная материя состоит из нейтрино. Эта идея имела бы право на существование, если бы был вид нейтрино, имеющий массу порядка одной тысячной массы электрона. Это не может быть электронное нейтрино — сверхновая подтвердила, что оно слишком легкое. Нам известно еще два вида нейтрино, однако большинство космологов утверждает, что они не совсем подходят для такой роли. Исходя из результатов компьютерного моделирования образования галактики было выдвинуто предположение, что нейтрино, имеющие массу, привели бы к созданию Вселенной, сильно отличающейся от той, в которой живем мы. Следовательно, темная материя Вселенной вполне может быть чем-то другим — чем-то, что остается за пределами современного «зоопарка» частиц.

Именно здесь начинается самое тесное сотрудничество специалистов по физике частиц и космологов. Вселенная говорит нам, что должен существовать некий новый вид частиц или объектов, составляющих ее массу. Создается ощущение, что древние греки опять оказались правы! Они говорили, что земная материя образована четырьмя элементами, а небесная — пятым и совершенным элементом. Огонь, воду, землю и воздух уже заменили протонами, нейтронами, электронами и нейтрино, а сейчас мы идем по горячему следу космической квинтэссенции.

Относительно того, что же это за темная материя, выдвигалось много предположений: аксионы, фотино, магнитные монополи и слабо вза-

имодействующие массивные частицы (WIMPs[1]) — это лишь некоторые из них. У нас с моими друзьями есть свой собственный любимый претендент — заряженные массивные частицы, или CHAMPs[2]. Если мы правы, эта новая форма материи скрывается под маской сверхтяжелых изотопов обыкновенных химических элементов: одна половина в виде водорода с атомной массой в несколько сотен тысяч, а другая (анти-CHAMPs) — в виде сверхтяжелых изотопов других элементов. Именно вследствие своей тяжести эти частицы при столкновении с другими частицами в межзвездном пространстве теряют энергии не больше, чем ее теряет грузовик, когда о его ветровое стекло ударяются мухи. Поскольку эти частицы не могут замедлиться, они не могут и разрушиться, чтобы образовать звезды, а потому остаются темными.

Однако эти частицы бомбардируют Землю с частотой порядка одной частицы на квадратный дюйм в секунду. Едва попав в атмосферу, CHAMPs образуют молекулы сверхтяжелой воды, которая в виде дождя выпадает на Землю. После того как эти частицы, молекула за молекулой, накапливались в течение миллиардов лет, сегодня их должно насчитываться порядка десяти частей на миллиард по массе земной коры: их должно быть больше, чем золота и немногим меньше, чем серебра.

Группа гарвардских исследователей начала старательно искать CHAMPs. Они начинают со столь многообещающего образца материи, как глубоководное морское отложение. Они эстрагируют из этого образца воду и подвергают ее ультрацентрифугированию, которое собирает CHAMPs, если таковые существуют, в крошечную капельку. Затем они измеряют плотность этой капельки, чтобы посмотреть, не превышает ли она то значение, которое ожидается в отсутствие CHAMPs. Это достаточно простой эксперимент, но, насколько нам известно, ранее его не проводил никто. Идея о CHAMPs как о составляющих темной материи кажется абсолютно согласованной со всем, что нам известно, но она немного ненормальна. Вероятно, ученым не удастся найти никаких CHAMPs по одной простой причине — их несуществования.

Но только представьте, что наша прихоть — это реальность природы и что нам удастся найти эти частицы. Если они действительно существуют, то эстрагировать их не составит никакого труда. Подумайте о том, что мы могли бы сделать с ними. Помимо всех новых удивительных материалов, которые мы могли бы создать, мы сумели бы отделить CHAMPs от антиCHAMPs и аннигилировать их в ускорителе. Вследствие их большой массы нам не понадобилось бы придавать им очень большое ускорение, чтобы добиться высоких энергий. Другими слова-

[1]Weakly Interacting Massive Particles.

[2]Charged Massive Particles.

ми, CHAMPs могли бы обеспечить дешевый способ изучения физики высоких энергий — и, быть может, кроме этого, создали бы большое количество пригодной для использования энергии, не создавая побочных опасностей. Возможно, они смогут даже послужить в качестве топлива, которое нам необходимо, чтобы отправить космические корабли к звездам. Я надеюсь, что мы их найдем.

Физика высоких энергий, с CHAMPs или без них, все равно останется наукой, изучать которую сто́ит. В течение нескольких прошедших десятилетий она была нашим билетом к границе, более далекой, чем звезды, — *границе человеческого воображения*. Именно там находится наиболее интересная часть физики и космологии: в попытке понять таинственный механизм, пятнадцать миллиардов лет назад приведший к Большому взрыву. Сегодня наша Вселенная мертвенно холодна: всего на три градуса теплее абсолютного нуля, что примерно соответствует температуре жидкого гелия. (Конечно же, здесь, в столь уютном соседстве с нашим Солнцем, далеко не так холодно.) Но когда Вселенной было несколько сотен тысяч лет, она была однородной и горячей, примерно такой же горячей, как сварочная горелка. Именно тогда впервые образовались атомы. Еще раньше, когда Вселенной было всего несколько минут, она была еще горячее, около десяти миллиардов градусов, что соответствует частицам, движущимся с энергиями порядка миллиона электрон-вольт. Мы понимаем раннюю историю Вселенной только потому, что изучали ядерные реакции при этих энергиях на ускорителях. Например, Уильям Фаулер и его соратники из Калифорнийского технологического института показали, что бóльшая часть маленьких атомных ядер во Вселенной, например, ядра гелия, дейтерия и лития, образовались в первые несколько минут.

За последние несколько лет ученые с помощью больших протон-антипротонных коллайдеров в CERN (Женева) и Лаборатории им. Ферми (Иллинойс) исследовали явления, происходящие при триллионах электрон-вольт. Эти энергии соответствуют температуре Вселенной, когда ей было всего несколько триллионных долей секунды. Пока что эксперименты подтверждают теорию, объединяющую электромагнитное и слабое взаимодействия. В других отношениях пока не появилось ничего удивительного. Самые интересные открытия, сейчас это ясно, были сделаны немного раньше.

Сверхпроводящий суперколлайдер (длина которого составляет 52 мили), если он будет построен в Техасе, как это сейчас планируется, может дать ответы на некоторые наши вопросы. Он поднимет границу высоких энергий в 20 раз. Когда Вселенная была очень молода и сияла ярким светом, все известные нам частицы не имели массы, а слабое и электромагнитное взаимодействия были абсолютно симметричны. Эта

молодая Вселенная весьма сильно отличалась от холодной и беспорядочной Вселенной, в которой живем мы. Каким-то образом симметрия была нарушена, слабое взаимодействие стало слабым, а различные кварки, лептоны и слабые бозоны приобрели, на первый взгляд, случайные массы, которыми они сейчас обладают. Как все это произошло? Обеспечив крошечное окошечко, из которого открывается вид на Вселенную в момент ее кристаллизации, суперколлайдер может помочь разгадать загадку происхождения массы.

Но ни суперколлайдер, ни его последователи ни на йоту не приблизятся к основному вопросу происхождения Вселенной. Чтобы воссоздать температуру Вселенной в момент ее рождения, нам понадобился бы ускоритель, размер которого равнялся бы нескольким световым годам. Однако это не означает, что мы никогда не сможем узнать природу младенческой Вселенной. Мы располагаем инструментом, которому эта задача по силам: человеческим мозгом.

Действительно, по мере того как мы приближаемся к завершению десятилетия замечательного прогресса, мы: многие мои коллеги, да и я тоже, — очень остро чувствуем, что мы стоим на грани глубокого нового синтеза — такого, который может выполнить наш священный долг, — понять, насколько это возможно, Вселенную, в которой мы родились. Мы надеемся, что очень скоро посредством одного только мышления (ну и, конечно, с помощью физиков-экспериментаторов и астрономов) наш вид начнет понимать, как и почему возникла Вселенная и что с ней произойдет после вымирания человеческого рода.

Примечание автора. Астрономы и физики полностью отказались от гипотезы CHAMPs. Свидетельства существования этих частиц не были обнаружены ни на Земле, ни на звездах.

Работа теоретика: великое объединение

В направлении единой теории: нити в гобелене

В 1956 году, когда я начал заниматься теоретической физикой, изучение элементарных частиц очень напоминало лоскутное одеяло. Электродинамика, слабые взаимодействия и сильные взаимодействия казались абсолютно разными дисциплинами, отдельно изучаемыми и отдельно преподаваемыми. Тогда не было логически последовательной теории, которая описала бы их все. События типа нарушения четности, успехов квантовой электродинамики, открытия адронных резонансов и появления странности были четко определенными составляющими картины, но подогнать их друг к другу было непросто.

Времена поменялись. Сегодня мы располагаем тем, что называется «стандартной теорией» физики элементарных частиц, согласно которой сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия возникают из принципа *локальной симметрии*. В некотором смысле это законченная и предположительно правильная теория, предлагающая качественное описание всех явлений физики частиц и во многих случаях точные количественные предсказания. Экспериментальных данных, противоречащих теории, нет. В принципе, если еще и не на практике, все экспериментальные данные можно выразить через небольшое количество «элементарных» масс и констант связи. Теория, которой мы сейчас располагаем, — это истинное произведение искусства: лоскутное одеяло превратилось в гобелен.

Гобелены создаются множеством ремесленников, которые трудятся вместе. В законченной работе невозможно выделить вклад отдельных тружеников, так как слабые и неправильные нити перекрываются нужными. То же самое происходит и в нашей картине физики частиц. Часть этой картины образует объединение слабого и электромагнитного взаимодействий, а также предсказание нейтральных токов, отмеченное Нобелевской премией. Вторая часть касается обоснованного развития кварковой гипотезы от простой причуды до установившейся догмы. Еще одной ее частью является развитие квантовой хромодинамики в правдоподобную и эффективную теорию сильных взаимодействий, способную делать предсказания. Все они переплетаются между собой, образуя гобелен; одна часть не имеет особого смысла без другой. Даже развитие

теории электрослабых взаимодействий не было таким простым и прямым, каким оно могло бы быть. Оно произошло во всем своем расцвете в разуме не одного физика и даже не трех. Эта теория тоже стала плодом совместных усилий многих ученых: экспериментаторов и теоретиков.

Позвольте мне подчеркнуть, что я не верю в то, что стандартной теории как правильной и полной картине физики суждено жить долго. Все взаимодействия могут быть калибровочными, но они, несомненно, должны находиться в пределах единой группы. Это означало бы существование нового и очень слабого взаимодействия, которое переносит распад протонов. Таким образом, вся материя внутренне нестабильна, вследствие чего можно наблюдать ее распад. Подобный синтез слабых, сильных и электромагнитных взаимодействий был назван «великой объединенной теорией», но эта теория не будет ни великой, ни объединенной, пока в ней не будет описания гравитационных явлений. Мы по-прежнему далеки от воистину великого замысла Эйнштейна.

Физика прошедшего столетия характеризовалась частыми великими, но неожиданными экспериментальными открытиями. Если стандартная теория верна, то эта эпоха подошла к концу. Осталось открыть лишь несколько важных частиц, а многие их свойства считаются известными заранее. Я уверен, что все это не так, ибо природа всегда таит про запас сюрпризы, чтобы преподнести их нам в самый неожиданный момент.

Тем не менее, стандартная теория будет нам полезна и в будущем. На смену прошлой путанице пришел простой и элегантный синтез. Быть может, стандартная теория выживет как часть окончательной теории, а может быть, она окажется ошибочной в самой своей основе. Как бы то ни было, она все равно останется важной станцией, а следующая теория должна быть еще лучше.

В этом эссе я не стану пытаться описать ни весь гобелен, ни даже ту его часть, которая касается синтеза электрослабых взаимодействий и его эмпирического триумфа. Вместо этого я опишу несколько старых нитей, бóльшая часть которых уже оказалась в нижнем слое и которые тесно связаны с моими собственными исследованиями. Своей целью я ставлю не столько объяснение того, кто что и когда сделал, сколько попытку ответить на вопрос, почему все произошло именно так. Я также постараюсь проследить несколько новых нитей, которые могут предложить будущее развитие гобелена.

Ранние модели

В двадцатые годы двадцатого века ученые все еще считали, что существует всего два основных взаимодействия: гравитационное и элек-

тромагнитное. Пытаясь объединить их, Эйнштейн, должно быть, надеялся сформулировать универсальную теорию физики. Однако изучение атомного ядра вскоре раскрыло необходимость двух дополнительных взаимодействий: сильного — для сохранения ядра как единого целого, и слабого — для обеспечения распада ядра. Юкава задался вопросом: а нет ли глубокой аналогии между этими новыми взаимодействиями и электромагнетизмом. Все силы, утверждал он, должны проистекать из обмена мезонами. Первоначально предполагалось, что его гипотетические мезоны должны переносить и сильное, и слабое взаимодействия; считалось, что они сильно связаны с нуклонами и слабо — с лептонами. Первая попытка объединить сильное и слабое взаимодействия опередила свое время на целых 40 лет. Мало того, Юкава мог бы предсказать и существование нейтральных токов. Его нейтральный мезон, необходимый для обеспечения независимости заряда от ядерных взаимодействий, был также слабо связан с парой лептонов.

Однако электромагнетизм не просто переносится фотонами, он также возникает из требования локальной калибровочной инвариантности. Эта концепция получила обобщение в 1954 году в применении к неабелевым локальным группам симметрий [1]. Очень скоро стало ясно, что между электромагнетизмом и другими взаимодействиями должна существовать более перспективная аналогия. Эти взаимодействия тоже должны возникать из калибровочного принципа.

Здесь появляется небольшая проблема. Все калибровочные мезоны должны быть безмассовы, но при этом из всех мезонов не имеет массы один фотон. Каким образом остальные калибровочные бозоны приобретают массу? Удовлетворительного ответа на этот вопрос не было, пока не появилась работа Вайнберга и Салама [2], доказанная т'Хоофтом [3] (для спонтанно нарушенных калибровочных теорий), а также работа Гросса, Вильчека и Политцера [4] (для ненарушенных калибровочных теорий). Пока этих работ не было, массы калибровочных мезонов приходилось просто вводить *ad hoc*[1].

В 1960 году Сакураи предположил, что сильные взаимодействия должны возникать из калибровочного принципа [5]. Применяя построение Янга–Миллса к изоспиновой-гиперзарядовой группе симметрии, он предсказал существование векторных мезонов ρ и ω. Это была первая феноменологическая $SU(2) \times U(1)$-калибровочная теория. В 1961 году Гелл-Манн и Нееман распространили ее на местную $SU(3)$ группу [6]. Тем не менее, эти первые попытки сформулировать калибровочную теорию сильных взаимодействий были обречены на провал. Говоря на современном научном жаргоне, тогдашние ученые использовали в качестве

[1]Для каждого отдельного случая (лат.) — *Прим. пер.*

релевантной динамической переменной «аромат», а не скрытую и тогда неизвестную переменную «цвет». И все же их работа подготовила путь для появления квантовой хромодинамики, которое произошло через десять лет.

Ранняя работа по ядерному бета-распаду, казалось, указывает на то, что значимым взаимодействием является смесь S, T и P. Только после открытия нарушения четности и повторного проведения нескольких ошибочных экспериментов стало ясно, что слабые взаимодействия в действительности являются VA. Синтез, выполненный Фейнманом и Гелл-Манном, а также Маршаком и Сударшаном, стал предвестником калибровочной теории слабых взаимодействий [7]. В 1958 году Бладман сформулировал первую $SU(2)$-калибровочную теорию слабых взаимодействий [8]. Он даже не пытался включить в нее электромагнетизм. Модель содержала традиционные взаимодействия заряженных токов, а кроме того, набор взаимодействий нейтральных токов. Последние имели ту же силу и форму, что и в современной теории в пределе, в котором слабый угол смешивания равен нулю. Безусловно, одну только калибровочную теорию слабых взаимодействий невозможно сделать перенормируемой. Для этого необходимо объединить слабые и электромагнитные взаимодействия.

Швингер, уже в 1956 году, верил, что слабые и электромагнитные взаимодействия следует объединить в калибровочную теорию [9]. Заряженный векторный посредник, имеющий массу, и безмассовый фотон должны быть калибровочными мезонами. Будучи его студентом, я принял эту веру. В 1958 году в своей гарвардской диссертации я писал: «Потенциально перенормируемая теория бета-процессов мало что стóит, если мы не имеем возможности использовать перенормируемую электродинамику. Нам следует предположить, что полностью приемлемая теория этих взаимодействий может быть получена, только если они рассматриваются совместно...» [10]. Мы воспользовались оригинальным $SU(2)$-калибровочным взаимодействием Янга и Миллса. Все нужно было устроить так, чтобы заряженный, а не нейтральный (электромагнитный) ток нарушал четность и странность. Построить такую теорию технически возможно, но она некрасива и ложна с позиций эксперимента [11]. Теперь мы знаем, что нейтральные токи действительно существуют и что электрослабая калибровочная группа должна быть больше, чем $SU(2)$.

Другой электрослабый синтез без нейтральных токов предложили в 1959 году Салам и Уорд [12]. Им тоже не удалось понять, каким образом в теорию можно включить экспериментально доказанный факт нарушения четности. Между прочим, в продолжении своей работы в 1961 году они предложили калибровочную теорию сильных, слабых

и электромагнитных взаимодействий на локальной группе симметрии $SU(2) \times SU(2)$ [13]. Это стало замечательным предзнаменованием принятой сегодня $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ модели.

Итак, мы подходим к моей собственной работе [14], проделанной в Копенгагене в 1960 году. Эту работу независимо от меня также выполнили Салам и Уорд [15]. Наконец-то мы поняли, что для описания электрослабых взаимодействий необходима калибровочная группа, больше чем $SU(2)$. Салама и Уорда мотивировала неодолимая красота калибровочной теории. Мне казалось, что я нашел путь к перенормируемой схеме. Я пришел к группе $SU(2) \times U(1)$ по аналогии с приблизительной изоспиновой-гиперзарядовой группой, характеризующей сильные взаимодействия. В этой модели присутствовали два электрически нейтральных посредника: безмассовый фотон и массивный нейтральный векторный мезон, который я назвал B, но который сейчас известен как Z. Слабый угол смешивания определял, каким линейным комбинациям $SU(2) \times U(1)$-генераторов будет соответствовать B. Точную форму предсказанных взаимодействий нейтральных токов недавно подтвердили экспериментальные данные. Однако сила нейтрального тока обозначена не была, вследствие чего эта модель не являлась перенормируемой. Эти грубые упущения суждено было исправить работе Салама и Вайнберга, а также последующему доказательству перенормируемости. Более того, это была лептонная модель, и очевидно, что она не распространялась на адроны.

Перенормируемость

В конце пятидесятых благодаря работе Салама было известно, что квантовая электродинамика и псевдоскалярная мезонная теория перенормируемы. Но ни одна из традиционных моделей слабых взаимодействий — ни заряженные промежуточные векторные бозоны, ни прямые четырехфермионные связи — не удовлетворяла этому важному критерию. Моя гарвардская диссертация, которую я писал под руководством Юлиана Швингера, должна была следовать вере моего учителя в объединенную калибровочную теорию электрослабых взаимодействий. Я должен был найти какую-то причину, которая заставила бы поверить, что эта теория более правдоподобна, чем альтернативные ей. Фейнберг, работая с заряженными промежуточными векторными мезонами, обнаружил, что определенный тип расходимости мог бы быть уничтожен при некотором значении аномального магнитного момента мезона [16]. Это соответствовало не «минимальной электромагнитной связи», а магнитным свойствам, которых требовала калибровочная теория. Цзу Куо-Хсьен исследовал предел нулевой массы электродинамики заряженных векторных

мезонов [17]. И вновь разумный результат был получен только для очень особого случая магнитного дипольного момента и электрического квадрупольного момента — для значений, принятых в калибровочной теории. Был ли тот факт, что электромагнетизм заряженного векторного мезона является наименее патологическим в калибровочной теории, всего лишь совпадением?

Вдохновленный этими особыми свойствами, я написал знаменитую статью [18]. Я утверждал, что слабо нарушенная калибровочная теория с нарушением симметрии, обусловленным явными массовыми членами, является перенормируемой. Мои коллеги очень быстро показали, что я ошибался.

И вновь, в 1970 году, мы с Илиопулосом показали, что обширный класс отклонений, которых можно было ожидать, в подобной калибровочной теории был бы аннулирован [19]. Мы показали, что простые отклонения порядка $(\alpha\Lambda^4)^n$ сводились «просто» к $(\alpha\Lambda^2)^n$, где Λ — это обрезающий импульс. Вероятно, это самая сложная теорема, которую когда-либо доказывали Илиопулос или я. И все же все наши труды оказались напрасными. Весной 1971 года Велтман сообщил нам, что его студент Герардус т'Хоофт установил перенормируемость спонтанно нарушаемой калибровочной теории.

Стремясь найти перенормируемость, я трудился не покладая рук, но совершенно не в том направлении. Калибровочная симметрия — это точная симметрия, но она скрыта. В нее нельзя вручную вставлять члены, содержащие массу. Ключом к проблеме является спонтанное нарушение симметрии: работа Голдстоуна, которую Хиггс и Киббл в 1964 году распространили на калибровочные теории [20]. Эти ученые никогда не думали о том, чтобы применить свою работу по формальной теории поля к феноменологически релевантной модели. В 1960 году я часто беседовал с Голдстоуном и Хиггсом. Неужели я не счел нужным рассказать им о своей $SU(2) \times U(1)$-модели, или они просто-напросто позабыли о ней?

И Салам, и Вайнберг имели достаточно большой опыт в формальной теории поля, и они оба работали с Голдстоуном над спонтанным нарушением симметрии. Вспоминая все это теперь, я не нахожу удивительным то, что именно они впервые воспользовались этим ключом. Их $SU(2) \times U(1)$-калибровочная симметрия является спонтанно нарушенной. Массы W и Z, а также природа действия нейтральных токов зависят от одного измеримого параметра, а не от двух, как это было в моей неперенормируемой модели. Была правильно предсказана сила нейтральных токов. Смелая гипотеза перенормируемости, выдвинутая Вайнбергом и Саламом, была доказана в 1971 году. Нейтральные токи обнаружили в 1973 году [21], но только в 1978 году стало ясно, что они обладают именно теми свойствами, которые были предсказаны [22].

Нейтральный ток, изменяющий странность

В период с 1961 по 1970 год я фактически забросил идею электрослабой калибровочной теории. Тому было несколько причин, в том числе и провал моего наивного вторжения в перенормируемость. Другой причиной было появление эмпирически успешного описания сильных взаимодействий — $SU(3)$-унитарной схемы симметрии Гелл-Манна и Неемана. Эта теория изначально формулировалась как калибровочная теория с ρ, ω и K^*, выступавшими в роли калибровочных мезонов. Тогда было абсолютно невозможно представить, каким образом и сильные, и слабые взаимодействия могут быть калибровочными теориями: для коммутации структур слабых и сильных токов просто не было места. Кто мог предвидеть успех кварковой модели и переход $SU(3)$ с арены аромата на арену цвета? Тогда подтверждались предсказания унитарной симметрии: в 1964 году была обнаружена предсказанная Ω^-. Успешно применялась алгебра токов. На сцене господствовали сильные взаимодействия.

Когда, в 1960 году, я наткнулся на $SU(2) \times U(1)$-модель, я подумал о возможном ее распространении на адроны. Построение лишь лептонной модели казалось мне бессмысленным: как-никак, первой и главной проблемой был ядерный бета-распад. Одно было несомненно. Поскольку странность нарушалась заряженным током, то и нейтральный ток должен был делать то же самое. Тогда уже было хорошо известно, что изменяющие странность нейтральные токи либо запрещены, либо вообще отсутствуют. Я заключил, что Z^0 нужно сделать гораздо более тяжелым, чем W. В те дни подобный поступок был произвольным, но допустимым: механизм нарушения симметрии был неизвестен. Я «решил» проблему изменяющих странность нейтральных токов, подавив все нейтральные токи.

На короткое время я вернулся к вопросу калибровочных теорий слабых взаимодействий в сотрудничестве с Гелл-Манном в 1961 году [23]. Исходя из недавно разработанных идей алгебры токов, мы показали, что калибровочная теория слабых взаимодействий непременно столкнулась бы с проблемой изменяющих странность нейтральных токов. Мы заключили, что недостает чего-то очень важного. Так оно и было. Ведь только после изобретения кварков могла появиться идея существования четвертого из них и вместе с ней механизм Глэшоу – Илиопулоса – Майани (GIM).

С 1961 по 1964 год мы с Сидни Коулменом посвятили себя использованию унитарной схемы симметрии. Весной 1964 года я провел короткий отпуск в Копенгагене. Там мы с Бьеркеном предложили, что систему Гелл-Манна – Цвейга, состоящую из трех кварков, необходи-

мо расширить до четырех [24]. (В то же время такая мысль возникла и у некоторых других ученых [25].) Четвертый кварк мы назвали очарованным. Частично наше стремление ввести четвертый кварк основывалось на ошибочных понятиях адронной спектроскопии. Однако, помимо этого, мы хотели усилить аналогию между слабым лептонным током и слабым адронным током. Вследствие существования двух слабых дублетов лептонов мы считали, что должны существовать и два дублета кварков. Суть идеи была правильной, однако сегодня, похоже, существует три дублета кварков и три дублета лептонов.

Слабый ток, который мы с Бьеркеном ввели в 1964 году, был именно током GIM. Связанный с ним нейтральный ток, как мы заметили, сохранял странность. Если бы мы ввели эти токи в раннюю теорию электрослабых взаимодействий, то мы уже тогда решили бы проблему изменяющих странность нейтральных токов. Но мы этого не сделали. Судя по всему, я подзабыл свои ранние идеи об электрослабом синтезе. Проблема, которая была явно поставлена в 1961 году, в принципе, получила решение в 1964. Никто, и я тем более, не знал об этом. Наверное, все мы находились под гипнозом химеры релятивистской $SU(6)$, которая возникла примерно тогда же, чтобы затуманить разум теоретиков.

Пять лет спустя мы с Джоном Илиопулосом и Лучано Майани вернулись к вопросу нейтральных токов, изменяющих странность [26]. Кажется невероятным, что эту проблему игнорировали в течение столь длительного времени. Мы доказали, что возникновения ненаблюдаемых эффектов (большая разница массы K_1K_2; распады наподобие $K \to \pi\nu\bar{\nu}$ и т. п.) следует ожидать в любой из известных моделей слабого взаимодействия: четырех-фермионных связях; моделях заряженных векторных мезонов или калибровочной теории электрослабых взаимодействий. Мы работали, используя обрезание (по импульсу), поскольку в то время перенормированной теории не было. Мы показали, каким образом гипотетическое существование четвертого кварка аннулирует нежелательные эффекты. После томительного ожидания, длившегося целых десять лет, проблема правил выбора нейтрального тока наконец-то была решена. Конечно, далеко не все поверили в предсказанное существование очарованных адронов.

Эта работа проводилась в течение трех полных лет после эпохальной работы Вайнберга и Салама и была представлена на семинарах в Гарварде и в МТИ. Ни я, ни мои коллеги, ни Вайнберг не почувствовали связи между двумя попытками. Мы в своей статье не ссылались на работу Вайнберга и Салама, да нас никто об этом и не просил.

Связь стала очевидной лишь год спустя. Благодаря работе т'Хоофта, Велтмана, Ли и Зинн-Жюстена, стало ясно, что анзатц Вайнберга – Салама в действительности является перенормируемой теорией. С ис-

пользованием GIM ее без труда распространили с лептонной модели на теорию слабых взаимодействий. Теперь мяч попал в руки экспериментаторов. Через несколько лет были открыты очарованные адроны и нейтральные токи, причем и те, и другие обладали в точности предсказанными свойствами.

От ускорителей к шахтам

Пионы и странные частицы были открыты в ходе пассивных экспериментов, которые задействовали естественный поток космических лучей. Однако за три последних десятилетия бóльшая часть открытий в физике частиц была сделана активным образом, с искусственной помощью ускорителей частиц. Пассивное экспериментирование переживает времена застоя из-за отсутствия финансирования и интереса. Однако последние достижения в теоретической физике частиц и в астрофизике вполне могут означать неминуемое повторное рождение пассивного экспериментирования. Средоточие практически всех усилий физики высоких энергий в небольшом количестве главных ускорительных лабораторий, возможно, уже осталось в прошлом.

Я не хочу сказать, что большие ускорители вымирают; они непременно останутся необходимым, но не исключительным инструментом физики высоких энергий. Не забывайте, что существование Z^0 при ~ 100 ГэВ — важное, но, в сущности, непроверяемое предсказание теории электрослабых взаимодействий. Несомненно, на ускорителях еще будут сделаны важные открытия, которые не всегда заранее смогут предсказать теоретики, поэтому непременно следует построить новые машины типа LEP и ISABELLE.

Рассмотрим достижения электрослабого синтеза и тот факт, что единственная правдоподобная теория сильных взаимодействий также является калибровочной теорией. Мы должны верить в конечный синтез сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Уже было показано, каким образом сильные и электрослабые калибровочные группы можно поместить в большую, но простую калибровочную группу [27]. Великое объединение — быть может, в соответствии с оригинальной $SU(5)$-теорией, созданной Джорджи и мной, — должно быть, в сущности, правильным. Это значит, что протон, а в действительности и вся ядерная материя, должны быть внутренне стабильны. Сейчас проводятся чувствительные поиски распада протона. Если время жизни протона короче 10^{32} лет, на что указывают теоретические оценки, ждать его распада осталось недолго.

Как только этот эффект будет обнаружен (а я уверен, что так и будет), нужно будет провести дальнейшие эксперименты, чтобы устано-

вить точные способы распада нуклонов. Необходимо установить правила отбора, углы смешивания и пространственно-временную структуру нового класса эффективных четырехфермионных связей. Героические дни открытия природы бета-распада наступят вновь.

Первое поколение экспериментов по распаду протона не требует больших затрат, но вряд ли столь же дешевыми окажутся и следующие поколения. Активные и пассивные эксперименты будут претендовать на получение одних и тех же постоянно сокращающихся ресурсов.

В тщательно продуманных пассивных экспериментах может появиться другая новая физика. Современные теории предлагают такие способы протонного распада, которые нарушают и барионное, и лептонное число на единицу. Быть может, этот закон $\Delta B = \Delta L = 1$ будет удовлетворен. Быть может, мы увидим переходы $\Delta B = -\Delta L$. Быть может, как полагают Пати и Салам, протон будет распадаться на три лептона. Быть может, два нуклона будут аннигилировать в $\Delta B = 2$ переходах. Быть может, будут обнаружены эффекты осцилляций нейтрино, происходящих вследствие того, что их массы равны доле электрон-вольта. «Супертяжелые изотопы», которые, возможно, присутствуют в небольших концентрациях в земной коре, быть может, обнаружат себя через мультиГэВ-распады. Быть может, мы увидим вспышки нейтрино, созданных во время далеких астрономических катастроф. Этот список может быть бесконечен или пуст. Обширные пассивные эксперименты, которые мы сейчас представляем, никогда не проводились ранее. Кто может сказать, какими будут их результаты?

Преждевременная традиция

Открытие J/Ψ, сделанное в 1974 году, предоставило возможность поверить в систему, включающую всего четыре кварка и четыре лептона. Вскоре после этого был открыт третий заряженный лептон (тау), и появилось свидетельство существования третьего $Q = -1/3$ кварка (b-кварка). Оба открытия были классическими сюрпризами. Тут же вошло в моду расположение известных фермионов семействами или поколениями:

$$\begin{pmatrix} u & \nu_e \\ d & e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c & \nu_\mu \\ s & \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t & \nu_\tau \\ b & \tau \end{pmatrix}.$$

Существование третьего $Q = 2/3$ кварка (t-кварка) предсказано. Схема Каббибо – GIM распространяется на систему из шести кварков. Система трех семейств является основой обширных и смелых теоретических изысканий. Например, уже было написано множество работ, налагающих экспериментальные ограничения на четыре параметра, заменяющие

угол Кабиббо в системе, образованной шестью кварками. Был тщательно разработан способ распада частиц, содержащих один b-кварк. Все это требует экспериментального подтверждения. Появилась новая традиция — располагающая малым количеством свидетельств, а потому лично мне внушающая мало доверия.

Однако здесь было бы неуместно подробно описывать наши взгляды. Они весьма умозрительны и могут оказаться ошибочными. Я лишь хочу подчеркнуть, что слишком рано убеждать себя в том, что нам известно будущее физики частиц. Существует очень много точек, где традиционная картина может оказаться неполной или ошибочной. $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$-калибровочная теория с тремя семействами — это, конечно, хорошее начало, но его нужно не принимать, а атаковать, расширять и применять. Мы еще очень далеки от конца.

Ссылки

1. Yang, C. N. and Mills, R., Phys. Rev. 96, 191 (1954). Also, Shaw, R., unpublished.
2. Weinberg, S., Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967); Salam, A., in *Elementary Particle Physics* (ed. Svartholm, N.; Almqvist and Wiksell; Stockholm; 1968).
3. 't Hooft, G., Nuclear Physics B 33, 173; 35, 167 (1971); Lee, B. W., and Zinn-Justin, J., Phys. Rev. D 5, 3121-3160 (1972); 't Hooft, G., and Veltman M., Nuclear Physics B 44, 189 (1972).
4. Gross, D. J. and Wilczek, F., Phys. Rev. Lett. 30, 1343 (1973); Politzer, H. D., Phys. Rev. Lett. 30, 1346 (1973).
5. Sakurai, J. J., Annals of Physics 11, 1 (1960).
6. Gell-Mann, M., and Ne'eman, Y., *The Eightfold Way* (Benjamin, W. A., New York, 1964).
7. Feynman, R., and Gell-Mann, M., Phys. Rev. 109, 193 (1958); Marshak, R., and Sudarshan, E. C. G., Phys. Rev. 109, 1860 (1958).
8. Bludman, S., Nuovo Cimento Ser. 10 9, 433 (1958).
9. Schwinger, J., Annals of Physics 2, 407 (1958).
10. Glashow, S. L., Harvard University thesis, p. 75 (1958).
11. Georgi, H., and Glashow, S. L., Phys. Rev. Lett. 28, 1494 (1972).
12. Salam, A., and Ward, J., Nuovo Cimento 11, 568 (1959).
13. Salam, A., and Ward, J., Nuovo Cimento 19, 165 (1961).
14. Glashow, S. L., Nuclear Physics 22, 579 (1961).
15. Salam, A., and Ward, J., Physics Lett. 13, 168 (1964).
16. Feinberg, G., Phys. Rev. 110, 1482 (1958).
17. Tzou Kuo-Hsien, Comptes Rendus 245, 289 (1957).

18. Glashow, S. L., Nuclear Physics 10, 107 (1959).
19. Glashow, S. L., and Iliopoulos J., Phys. Rev. D 3, 1043 (1971).
20. Many authors are involved with this work: Brout, R., Englert, F., Goldstone, J., Guralnik, G., Hagen, C., Higgs, P., Jona-Lasinio, G., Kibble, T., and Nambu, Y.
21. Hasert, F. J., *et al.*, Physics Letters 46 B, 138 (1973); Nuclear Physics B 73, 1 (1974); Benvenuti, A., *et al.*, Phys. Rev. Lett. 32, 800 (1974).
22. Prescott, C. Y., *et al.*, Phys. Lett. B 77, 347 (1978).
23. Gell-Mann, M., and Glashow, S. L., Annals of Physics 15, 437 (1961).
24. Bjorken, J., and Glashow, S. L., Physics Letters 11, 84 (1964).
25. Amati, D., *et al.*, Nuovo Cimento 34, 1732 (A 64); Hara, Y. Phys. Rev. 134, B701 (1964); Okun, L. B., Phys. Lett. 12, 250 (1964); Maki, Z., and Ohnuki, Y., Prog. Theor. Phys. 32, 144 (1964); Nauenberg, M., (unpublished); Teplitz, V., and Tarjanne, P., Phys. Rev. Lett. 11, 447 (1963).
26. Glashow, S. L., Iliopoulos, J., and Maiani, L., Phys. Rev. D 2, 1285 (1970).
27. Georgi, H., and Glashow, S. L., Phys. Rev. Lett. 33. 438 (1974).

Объединенная теория взаимодействий элементарных частиц (с Говардом Джорджи)

Понятие о том, что же такое «элементарные» или не имеющие структуры составляющие материи, непрерывно изменяется по мере того, как нам удается «прощупать» все меньшие и меньшие расстояния со все большими и большими энергиями. Пока мы были ограничены энергией, доступной в химических процессах, элементарными частицами считались атомы; затем ими стали протоны, нейтроны и электроны, а в настоящее время мы можем разбить материю на кусочки, достаточно мелкие, чтобы элементарными составляющими материи казались кварки и лептоны.

Кварки — это составляющие адронов, частицы (наподобие протонов или пионов), испытывающие сильное взаимодействие. Мы располагаем свидетельствами существования, по крайней мере, пяти типов («ароматов») кварков; обычно их именуют u (up), d (down), s (strange), c (charm) и b (bottom или beauty). Кроме того, каждый тип кварка имеет три разновидности («цвета»), обычно называемые «красным», «белым» (или иногда «зеленым») и «синим». Сильное взаимодействие, связывающее кварки в адроны, — это (как мы считаем) взаимодействие, в котором три цвета играют роль, аналогичную той, какую заряд играет в электродинамике. В настоящее время принятой теорией этих взаимодействий является квантовая хромодинамика, или сокращенно КХД.

В настоящее время мы также располагаем свидетельством существования шести видов лептонов — это: электрон, мюон и тау, а также нейтрино, связанные с каждым из них. Лептоны не имеют цвета и почти полностью не подвержены хромодинамическим взаимодействиям.

За исключением трех нейтрино, кварки и лептоны переносят электрические заряды, вследствие чего подвержены электромагнитному взаимодействию. Все частицы, включая нейтрино, взаимодействуют слабо. Частицы, подверженные электромагнитному взаимодействию, не изменяются: за исключением возможных пар частица-античастица, частицы, которые появляются после взаимодействия, имеют те же свойства

(заряд, странность и прочие), что и частицы, вступившие во взаимодействие. Слабые взаимодействия, напротив, могут изменить частицы. Классическим примером является бета-распад, при котором нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино ($\bar{\nu}_e$); это происходит, когда один из d-кварков в нейтроне распадается на u-кварк (который остается связанным с другим d и u-кварками, существовавшими в нейтроне), на электрон и на антинейтрино.

Объединение

Квантовая электродинамика, квантовая хромодинамика и принятая в настоящее время теория слабых взаимодействий достаточно адекватно описывают взаимодействия между элементарными частицами вплоть до расстояния в 10^{15} см (около одного процента радиуса протона); это самое маленькое расстояние, которое способны «прощупать» современные ускорители. Что происходит на еще более малых расстояниях нам не известно. Но мы подозреваем, что на расстояниях порядка 10^{-29} см все три взаимодействия — наряду с другими, пока ненаблюдаемыми, — будут объединяться, то есть все взаимодействия будут иметь одну и ту же силу, а различия между кварками, антикварками и лептонами исчезнут.

Несмотря на то, что это предполагаемое объединение происходит на нелепо малых расстояниях (или при очень высоких энергиях), оно имеет важные следствия для «низкоэнергетического» мира современной физики. Одним из таких следствий является предсказание угла, присутствующего в теории слабых взаимодействий и называемого θ_W, — слабого угла смешивания. Объединенные теории предсказывают, что $\sin^2\theta_W \cong 0,20$. Когда это предсказание было сделано впервые, наилучшим экспериментальным значением было $\sin^2\theta_W \cong 0,35$. Но по мере совершенствования экспериментов это значение неуклонно уменьшалось; сейчас экспериментальное значение составляет $\sin^2\theta_W \cong 0,23 \pm 0,02$, что почти полностью согласуется с объединенной теорией.

Однако самому впечатляющему следствию объединения еще предстоит окончательная проверка. Это следствие касается того, что сам протон (а потому и вся материя) нестабилен: примерно через 10^{31} лет протон может распасться на позитрон и π^0. Позитрон, в конечном счете, аннигилирует электрон, создавая гамма-лучи, на которые быстро распадется и π^0. Суммарным результатом будет превращение атома водорода в энергию. Хотя вероятность того, что какой-то протон распадется в какой-то год, ничтожно мала, макроскопический кусок материи содержит очень большое количество протонов. В настоящее время готовятся эксперименты, которые помогут изучить очень большие образцы материи, чтобы проверить это предсказание.

Прежде чем объяснять объединение, мы кратко расскажем о его составляющих: квантовой хромодинамике, квантовой электродинамике и слабых взаимодействиях, — на языке, особенно подходящем для объединения, — на языке калибровочных теорий. В наших примерах мы будем использовать, главным образом, u- и d-кварки и e- и ν-лептоны. Именно они образуют все обычные материалы; более тяжелые кварки и лептоны интересны почти исключительно специалистам по физике частиц.

Электродинамика

Квантовая электродинамика (КЭД) — это квантовая теория электромагнитных взаимодействий заряженных точечных частиц. Эта теория чрезвычайно успешна в том, что все ее предсказания были проверены экспериментально и подтвердились с высокой степенью точности, частично потому что она характеризуется малой безразмерной константой связи. Понятие «константы связи» будет занимать центральное место в нашей идее объединения, поэтому мы опишем его несколько более подробно.

Эта идея начинается с закона Кулона. В релятивистской квантовой теории совершенно естественно измерять продукты зарядов (в электростатических единицах) в единицах $\hbar c$; не менее естественно и использовать тот факт, что заряды квантуются как целочисленные кратные заряда протона, e. Тогда закон Кулона можно записать как

$$F/\hbar c = \alpha QQ'/r^2,$$

где Q и Q' — целые числа. Мы включили единицу заряда, e, в безразмерную константу связи

$$\alpha = e^2/\hbar c,$$

экспериментальное значение которой достаточно близко к 1/137. Она достаточно мала, чтобы допустить прямое разложение в ряд теории возмущений по степеням a.

Нам следует подчеркнуть, что несмотря на то, что квантование электромагнитного заряда является экспериментальным фактом, квантовая электродинамика в нем не нуждается. Эта теория по-прежнему имела бы смысл, если бы существовала даже частица с электрическим зарядом $Q = \sqrt{2}$, например. Но в объединенной теории, которую мы опишем ниже, квантование заряда происходит автоматически. Кроме того, следует обратить внимание на то, что заряд Q — это аддитивное квантовое число, имеющее противоположные значения для частицы и ее античастицы.

Все теории, которые мы будем обсуждать, являются релятивистскими квантовыми теориями поля. В таких теориях обе силы, действующие на частицы, и сами частицы представлены квантованными полями. Поле и соответствующие ему кванты представляют двойственные аспекты материи: квант поля ведет себя как частица, а математическим ожиданием поля является волновая функция частицы. Мы будем проводить различие между «частицами», соответствующими составляющим материи (то есть кварками и лептонами — частицами со спином 1/2), и «силами», характеризующими взаимодействия между частицами (взаимодействия связаны с частицами, имеющими целый спин, типа фотона).

Динамика электромагнитной силы дается векторным потенциалом, $\mathbf{A}(x)$ — «фотонным полем». Квантовая электродинамика инвариантна для чрезвычайно большой группы преобразований. К векторному потенциалу можно добавить градиент любой скалярной функции и одновременно изменить фазу полей всех частиц на некоторую величину, пропорциональную скаляру:

$$\mathbf{A}(x) \to \mathbf{A}(x) + \nabla\theta(x)\psi(x) \to \psi(x)e^{ieQ\theta(x)/\hbar c},$$

и это преобразование оставит теорию неизменной. Такая симметрия называется *калибровочной инвариантностью*, а точнее: $U(1)$-*калибровочной инвариантностью*. $U(1)$ означает, что фазовое преобразование унитарно (не изменяет нормализацию волновой функции) и что целое число Q, появляющееся в нем, — это просто число, матрица 1×1.

Калибровочная инвариантность представляет собой столь мощную симметрию, что она, вместе с требованием безразмерности константы связи, полностью определяет вид взаимодействия. Вследствие симметрии поле фотона, $\mathbf{A}(x)$, связывается с полем каждой частицы с силой eQ; симметрия также гарантирует безмассовость фотона.

Вследствие центральной роли калибровочной инвариантности в электромагнитных взаимодействиях поле фотона $\mathbf{A}(x)$ называется «калибровочным полем», а сам фотон — «калибровочной частицей».

Хромодинамика

Кварковое поле — это вектор с тремя составляющими в «цветном пространстве», причем составляющие его соответствуют цветам: красному, белому и синему. (Такие «цветные векторы» мы будем обозначать стрелками: $\vec{q}$.) Взаимодействие между кварками переносится множеством «глюонных полей» (аналогичных фотонному полю в электродинамике), сила связи которых дается множеством цветных зарядов, $\top_a$. Эти заряды представляют собой 3×3-матрицы (бесследные и эрмитовы)

в цветном пространстве. Всего существует восемь таких независимых матриц, восемь различных типов цветных зарядов $\top_a$ и восемь различных типов глюонных полей $\mathbf{G}_a$. Восемь матриц $\top_a$ представляют собой 3×3-аналоги знаменитых 2×2-матриц Паули, σ_i; для их нормализации обычно необходимо, чтобы след $\top_a$ равнялся $1/2$. Цветные заряды также аддитивны, а частицы и античастицы имеют противоположные цветные заряды.

При воздействии на кварк он может испустить один из восьми глюонов. Сила взаимодействия (аналогичная eQ) между кварком и глюонным полем $\mathbb{G}_a$ — $g_3\top_a$. Две из матриц $\top_a$, обыкновенно именуемые $\top_3$ и $\top_8$, диагональны, так что кварки, испускающие глюоны $\mathbb{G}_3$ или $\mathbb{G}_8$, не изменяют цвет; все прочие глюонные поля вызывают цветовые переходы. (См. рисунок 1.)

Квантовая хромодинамика также выказывает калибровочную инвариантность. К глюонному полю можно добавить множество градиентов (параллельно выполняя унитарные преобразования матриц) и изменить фазы кварковых полей, не изменяя теории. Поскольку поля — это матрицы, калибровочные преобразования намного сложнее своих аналогов из электродинамики; например, кварковые поля преобразуются с помощью матричного фазового множителя

$$q(x) \to \exp[ig_3 \sum_a \theta_a(x)\top_a]\vec{q}(x).$$

Поскольку диагональными являются лишь две матрицы, цвета кварков могут смешиваться в каждой точке пространства по-разному, так что все физические результаты теории остаются одинаковыми.

Общий эффект виртуального обмена всеми этими глюонами заключается в создании силы, стремящейся связать кварки в системы, нейтральные в отношении цвета, то есть системы, для которых $\vec{q}^{\dagger}\top_a\vec{q}$ равно нулю ($a = 1, \ldots, 8$). Простейшими подобными системами являются пары кварк-антикварк (например, π^+ состоит из u и d) и триплеты кварков (протон, например, содержит два u-кварка и один d); цветонейтральность триплетов кварков отражает бесследность $\top_a$ матриц.

В действительности мы полагаем, что связывание кварков и глюонов в цветонейтральные системы абсолютно: кварки и глюоны постоянно удерживаются внутри адронов, вследствие чего нет ни малейшей надежды когда-либо увидеть изолированный кварк или глюон.

Помимо цветных зарядов кварки имеют электромагнитные заряды, Q. Например, u-кварк имеет $Q = 2/3$, а d-кварк — $Q = -1/3$. Таким образом, общий заряд протона $Q = 1$, а нейтрона (состоящего из двух d-кварков и одного u-кварка) — $Q = 0$. Обратите внимание, что,

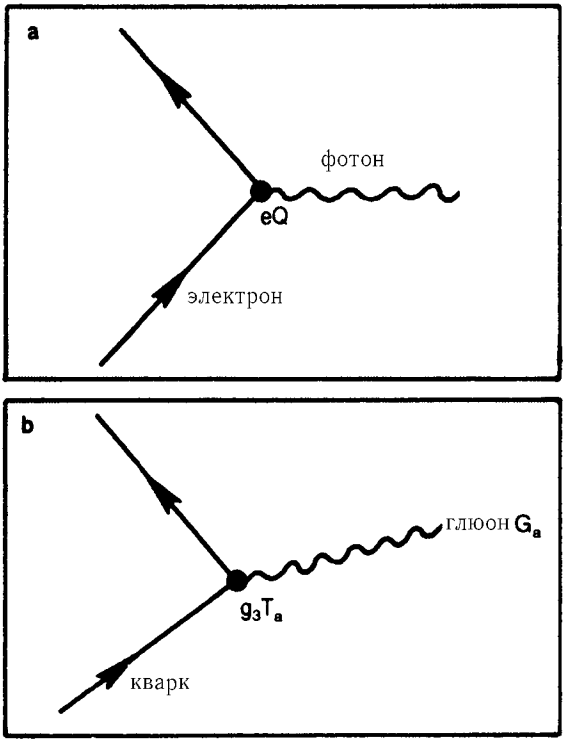


Рис. 1. Основные взаимодействия (a) в КЭД и (b) в КХД. В (a) электрон испускает (или поглощает) фотон, изменяя его энергию и импульс; сила взаимодействия определяется eQ (Q — это целочисленный безразмерный заряд). В (b) кварк испускает (или поглощает) глюон, изменяющий его энергию, импульс и иногда «цвет».

несмотря на дробный электрический заряд кварков, именно такие заряды необходимы, чтобы гарантировать целочисленный заряд цветонейтральных систем, образованных тремя кварками или кварком и антикварком. Есть еще кое-что, что должна объяснить наша объединенная теория. В отличие от фотона, сами глюоны должны переносить цветные заряды. Так происходит потому, что цветные заряды (будучи матрицами) не коммутируют; $SU(3)$ — симметрия неабелева (содержит некоммутирующие элементы) и простая (не может быть разделена на коммутирующие

подмножества). Несложно доказать, что для простых групп заряды квантуются. Вторым путем к такому же выводу является осознание того, что любая система с цветом имеет тот же цвет, что и некоторая комбинация кварков. Цветные заряды квантуются, потому что все они должны быть кратны цветным зарядам трех кварков.

Поскольку цветные заряды $\top_a$ квантуются, размерная константа связи g_3, которая появляется, например, в калибровочном преобразовании, измеряет минимальную силу связи в КХД, тем самым играя роль, аналогичную роли e, кванта электромагнитного заряда, в КЭД. Константа g_3 имеет ту же размерность, что и e, так что можно записать безразмерную комбинацию

$$\alpha_3 = g_3/\hbar c.$$

Эксперименты показывают, что $\alpha_3 \gg \alpha$: цветовые взаимодействия (которые, как-никак, являются «сильными взаимодействиями») гораздо сильнее электромагнитных.

Асимптотическая свобода

Релятивистский квантово-механический вакуум — это нечто гораздо большее, чем просто пустое пространство. Он кишит виртуальными частицами. Например, одно и то же электромагнитное взаимодействие, позволяющее электрону испустить фотон, также позволяет электрону, позитрону и фотону появиться из ничего. Конечно же, они не могут быть реальными, так как энергия не сохраняется, но они могут существовать в виде виртуальных частиц, на короткое время согласующихся с принципом неопределенности.

Если к этому сложному вакууму добавляется реальная заряженная частица, она может поляризовать виртуальные электрон-позитронные пары. Если реальная частица несет положительный заряд, виртуальные положительные заряды слегка отталкиваются от нее, а виртуальные отрицательные заряды притягиваются к ней. В конечном счете, виртуальные положительные заряды отталкиваются на значительное расстояние, и реальный заряд оказывается в окружении отрицательно заряженного вакуума.

Теперь допустим, что мы хотим измерить заряд одной из этих частиц. Стандартный способ состоит в измерении электрического поля на сфере радиуса r, окружающей заряд, и использовании закона Гаусса для нахождения величины заряда, в ней заключенного. Однако вследствие поляризации вакуума этот заряд будет изменяться в зависимости от r: по мере увеличения r он будет уменьшаться, так как сфера будет содержать все большее количество отрицательно заряженного вакуума.

Вы, может быть, думаете, что мы могли бы найти «голый» заряд частицы, максимально к ней приблизившись, — сделав r очень малым. Однако это не работает. Плотность отрицательного заряда в вакууме увеличивается по мере приближения к реальному заряду, и, какой бы маленькой ни была сфера, в замкнутом вакууме всегда остается значительное количество отрицательного заряда (это может произойти только в том случае, если «голый» положительный заряд бесконечен, а плотность отрицательного заряда в вакууме стремится к бесконечности, когда r стремится к нулю).

Это звучит рискованно, но здесь нет ничего страшного, пока в любую конечную сферу заключен конечный заряд. Как-никак, в любом эксперименте заряды разделяет некоторое характеристическое расстояние d. Например, в эксперименте атомной физики типичное расстояние $d \sim 10^{-8}$ см. В подобном эксперименте «зарядом», подходящим для описания электромагнитных взаимодействий, является заряд внутри сферы радиуса d вокруг точечных зарядов.

Этот процесс замены бесконечного голого заряда конечным зарядом, измеренным на данном расстоянии от точечного заряда, называется «перенормированием»; он работает только для определенного класса теорий поля. Мы будем рассматривать только такие «перенормируемые» теории.

Перенормирование никак не влияет на квантование заряда: заряд в сфере радиуса d, окружающей электрон, ничем не отличается от заряда в сфере радиуса d, окружающей мюон (есть некоторые эффекты, вызванные разностью масс μ и e, да и протон несколько более сложен из-за сильных взаимодействий, но не обращайте на это внимания). Это означает, что безразмерный заряд Q по-прежнему принимает целочисленные значения (за исключением кварков), но константа связи α теперь зависит от d; ее значение составляет 1/137 при атомном расстоянии $\sim 10^{-8}$ см.

В КЭД α мала, поэтому α от d зависит слабо — на самом деле, этой зависимостью даже можно пренебречь, — но она измерима. (Она вносит свой вклад, к примеру, в лэмбовский сдвиг.) В КХД, где α_3 гораздо больше, этот эффект очень важен: частица, имеющая цветной заряд, в значительной степени поляризует вакуум. Более того, калибровочные частицы, переносящие цветовое взаимодействие, сами тоже несут цветной заряд; таким образом, облако виртуальных глюонов, окружающее частицу с цветным зарядом, эффективно распространяет заряд этой частицы наружу. Оказывается, что этот эффект подавляет эффект вакуумной поляризации, так что положительный цветной заряд окружает положительно заряженный вакуум (рисунок 2). Вследствие распространения заряда наружу цветной заряд, находящийся внутри сферы радиуса r, уменьшается (очень медленно) до нуля, по мере приближения к нулю r. На коротких расстояниях цветные силы ослабевают! Это

свойство хромодинамики называется *асимптотической свободой*. Его открыли Дэвид Политцер в Гарварде (сейчас он работает в Калифорнийском технологическом институте), а также Дэвид Гросс и Фрэнк Вильчек в Принстоне. Асимптотическая свобода прошла успешную экспериментальную проверку в недавно проведенных экспериментах, в ходе которых «прощупывались» очень малые расстояния.

Слабые взаимодействия

Слабые взаимодействия тоже описываются калибровочной теорией. В этом случае элементарные частицы появляются дублетами, так что инвариантностью является $SU(2)$-симметрия. (Эта та же группа симметрии, что и угловой момент квантовой механики.) Слабые заряды — это три независимые 2×2 бесследные эрмитовы матрицы R_i (пропорциональные матрицам Паули). С тремя этими зарядами связаны три калибровочные частицы W (которые часто называют «промежуточными векторными бозонами»). И опять, поскольку заряды — это матрицы, эмиссия, или поглощение W_i, может изменить частицу. Так, например, электрон может испустить W_1 и превратиться в нейтрино.

Частица W_3 электрически нейтральна, но частицы W_1 и W_2 несут электрический заряд. Поля, соответствующие частицам с определенным зарядом, являются комбинациями $W^{\pm} = W_1 \pm iW_2$.

Слабые взаимодействия обладают странным свойством дифференцирования между частицами с различной спиральностью (то есть со спинами, направленными по движению или против него).

Спиральность массивной частицы, конечно же, можно изменять, приводя ее в состояние покоя или ускоряя в противоположном направлении без изменения ее спина. Так, массивные частицы имеют как левовинтовые, так и правовинтовые составляющие. Однако нейтрино, очевидно, имеют нулевую массу покоя, поэтому, подобно фотонам, они всегда передвигаются со скоростью света. Поскольку остановить нейтрино невозможно, направление его спинов никогда не меняется. На самом деле, в ходе экспериментов наблюдались только левовинтовые нейтрино и правовинтовые антинейтрино. (Античастица правовинтовой частицы является левовинтовой.) Считается, что их двойников, которые вращались бы в противоположных направлениях, не существует.

Некоторые кварки и лептоны вообще не переносят слабый заряд (они являются «синглетами» при $SU(2)$-симметрии), тогда как эти же частицы с противоположно направленными спинами входят в слабо заряженные дублеты. Синглеты включают

$$e_R^- \quad e_L^+ \quad u_R \quad \bar{u}_L \quad d_R \quad \bar{d}_L,$$

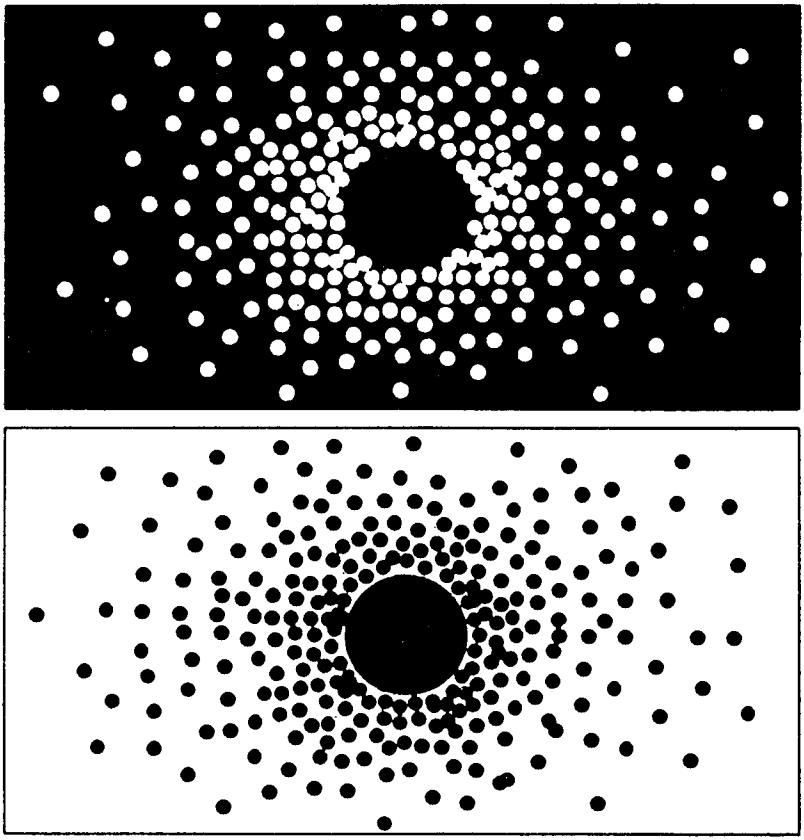


Рис. 2. Вакуумная поляризация. В КЭД (a) точечный заряд внутри большого пятна окружен облаком виртуальных зарядов противоположного знака. В КХД (b) точечный «заряд» внутри большого пятна окружен виртуальными кварками и глюонами преимущественного того же цвета, что и центральный кварк.

а соответствующими им дублетами являются

$$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e^-{}_L \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} e^+{}_R \\ \bar{\nu}_R \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{d}_R \\ \bar{u}_R \end{pmatrix}.$$

Индексы обозначают левую или правую спиральность частиц. На подоб-

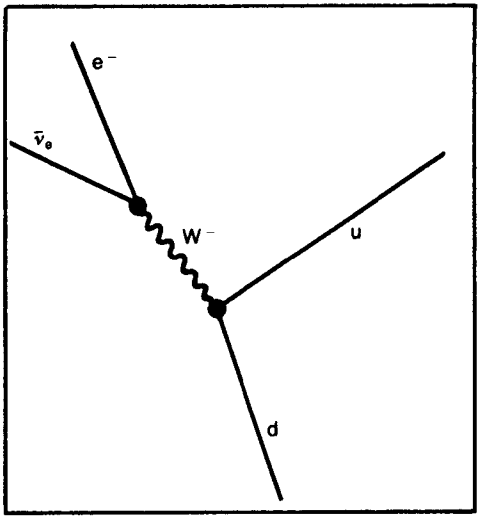


Рис. 3. Бета-распад. D-кварк внутри нейтрона испускает виртуальный W^-, превращаясь в u-кварк (так нейтрон превращается в протон). Виртуальный W^-, в свою очередь, распадается на электрон и антинейтрино.

ные синглеты и дублет также распадаются s-, c-, t-, b-кварки, лептоны μ и τ и связанные с ними нейтрино.

Слабо заряженные дублеты соединяются с W-частицами через один из зарядов-матриц R_i. Обмен W^+ или W^- (или W_1, или W_2) порождает слабое взаимодействие, наблюдаемое в ядерной физике. Бета-распад нейтрона, например, включает виртуальный W^-: d-кварк испускает W^- и становится u-кварком; а W^-, в свою очередь, распадается на электрон и антинейтрино (рисунок 3).

Размерная константа связи g_2, которая появляется в калибровочных преобразованиях, имеет безразмерный эквивалент $\alpha_2 = g_2/\hbar c$, который равен примерно 1/30 на расстоянии в 10^{-16} см.

$SU(2) \times U(1)$

Поскольку W^+ и W^- переносят электрический заряд, мы ожидаем, что слабое и электромагнитное взаимодействия должны быть связаны. Фактически, мы можем построить отношение между зарядами:

$$Q = R_3 + S.$$

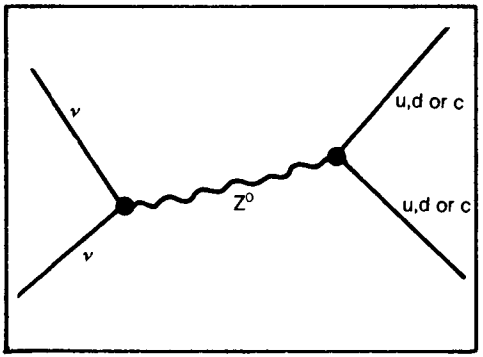


Рис. 4. Слабые взаимодействия нейтральных токов недавно были обнаружены экспериментально. Они включают обмен виртуальной Z^0-частицей.

Заряд S одинаков для каждого компонента слабого $SU(2)$-мультиплета. Для частиц, являющихся синглетами при слабом $SU(2)$, $R_3 = 0$, а S — просто электрический заряд. Для $SU(2)$-дублетов $R_3 = \pm 1/2$, а S — средний электрический заряд дублета. Например, правовинтовой электрон имеет $R_3 = 0$, $S = -1$ и $Q = -1$; левовинтовые электронное нейтрино и электрон имеют $S = -1/2$ и, соответственно, $R_3 = +1/2$ и $-1/2$, а $Q = 0$ и -1.

Что касается других зарядов, которые мы обсуждали, S связан с калибровочной инвариантностью. Частицы, для которых $S = 0$, могут испускать калибровочную частицу, которую мы назовем V; мы будем обозначать безразмерную константу связи для этого процесса α_1. Но вследствие связи зарядов Q, R_3 и S три калибровочных поля (или, что эквивалентно, частицы γ, W_3 и V) тоже связаны между собой. Фотонное поле (векторный потенциал, $\mathbf{A}$) является линейной комбинацией полей $\mathbf{W}_3$ и $\mathbf{V}$:

$$\mathbf{A} = \mathbf{V}\cos\theta_W + \mathbf{W}_3 \sin\theta_W.$$

Существует, конечно, и другая, независимая линейная комбинация полей V и W_3; она называется Z^0.

$$\mathbf{Z}^0 = \mathbf{W}_3 \cos\theta_W - \mathbf{V}\sin\theta_W.$$

Параметр θ_W именуется *слабым углом смешивания*; его значение определяется константами связи e, g_2 и g_1.

Как и фотон, Z^0 имеет нулевой электрический заряд и может испускаться, не изменяя частицу. Но, в отличие от фотона, Z^0 может испускаться и поглощаться непосредственно нейтрино. Виртуальный обмен Z^0

порождает слабое взаимодействие между нейтрино и другими частицами; оно называется *взаимодействием «нейтральных токов»*, потому что обменная частица электрически нейтральна (рисунок 4). В противоположность этому классическое слабое взаимодействие, изображенное на вышеприведенном графике, называется взаимодействием «заряженных токов». Взаимодействие нейтральных токов весьма отлично, и наблюдать его гораздо труднее, потому что в результате этого взаимодействия изменения частицы не происходит. Однако последние эксперименты фактически позволили увидеть результаты слабых нейтральных токов, чем подтвердили этот аспект объединенной теории слабых и электромагнитных взаимодействий. Поскольку эта теория объединяет $SU(2)$-симметрию для некоторых своих полей (W_i) и $U(1)$-симметрию для другого поля (V), она называется $SU(2) \times U(1)$-*теорией*.

Спонтанное нарушение симметрии

В вышеприведенном описании слабых и электромагнитных взаимодействий недостает чего-то очень важного. Электромагнитная сила имеет бесконечный радиус действия ($F \infty 1/r^2$) и переносится частицей (γ) с нулевой массой. Однако слабые взаимодействия имеют очень короткий радиус действия ($\sim 10^{-16}$ см), а обменные частицы, W^+, W^- и Z^0 должны иметь массу, причем их масса должна в 100 раз превышать массу протона. Что же произошло с калибровочной инвариантностью и откуда мы знаем, что калибровочные частицы имеют нулевую массу? Ответ состоит в том, что основной закон сил симметричен, а вакуум — нет. Вакуум отличает W^+, W^- и Z^0 от фотона, делая их тяжелыми, а фотон оставляя безмассовым. Структура вакуума нарушает $SU(2) \times U(1)$-калибровочную инвариантность и позволяет калибровочным частицами приобрести массу. Такая ситуация называется *спонтанным нарушением симметрии*.

Хорошей аналогией в данном случае является нарушение вращательной инвариантности в кристалле. Рассмотрим, например, крупинку соли. Она образована ионами натрия и ионами хлора. Силы, действующие между ионами, имеют электромагнитную природу и не склонны выбирать особые направления в пространстве. Однако когда ионы собраны вместе, они образуют куб. Если бы вы жили внутри крупинки соли, то обнаружили бы, что ваше жизненное пространство имеет некоторые особые направления; к примеру, особыми свойствами обладают направления, перпендикулярные граням куба. Да, «великан», живущий вне кубика соли, мог бы взять его и начать вращать его (и вас вместе с ним), при этом не оказав никакого воздействия на физику вашего ми-

ра, но для вас, находящегося внутри кубика, вращательная симметрия законов физики не была бы столь очевидна. Вращательная симметрия спонтанно нарушилась вашей средой обитания — кристаллом соли.

Релятивистский квантово-механический вакуум, в котором живем все мы, напоминает тот самый кристалл соли. Симметрия, нарушенная спонтанно, является не вращательной инвариантностью, а калибровочной, которая, будучи ненарушенной, сделала бы W^+, W^- и W^0 взаимозаменяемыми и безмассовыми. Вакуум же выбирает направление в этом «калибровочном пространстве» такое, что выделяется направление W^0. В этом процессе W^+, W^- и Z^0 (частная комбинация W^0 и V^0, помните?) приобретают массу, а фотон остается безмассовым, потому что вакуум не нарушает электромагнитную калибровочную инвариантность.

Калибровочная теория слабых и электромагнитных взаимодействий со спонтанно нарушенной $SU(2) \times U(1)$-симметрией была разработана в шестидесятые годы двадцатого века Глэшоу в Копенгагене (теперь я работаю в Гарварде), Стивеном Вайнбергом в МТИ (теперь он тоже работает в Гарварде) и Абдусом Саламом в Имперском колледже (Лондон) и Международном центре по теоретической физике в Триесте. Глэшоу разработал общий вид калибровочной теории, но не знал, как придать массу W и Z. Вайнберг и Салам разработали эффект спонтанного нарушения симметрии (используя механизм, ранее придуманный Питером Хиггсом в Эдинбургском университете и Т. В. Б. Кибблом в Имперском колледже) и создали согласованную теорию. За эту работу в 1979 году Глэшоу, Салам и Вайнберг получили Нобелевскую премию по физике.

Существует еще один аспект спонтанного нарушения калибровочной симметрии, который может быть понят при использовании в качестве аналога кристалла. Это «зернистость». Как ни крути, а кристалл соли является зернистым в атомном масштабе 10^{-8} см. Живя внутри этого кристалла, вы могли бы без труда различить три различных диапазона расстояний, связанных с разными разделами физики:

- Расстояния, намного меньшие 10^{-8} см. Если вы проводите эксперимент, зондирующий структуру вашего мира на расстояниях, намного меньших, чем 10^{-8}, то факт вашего проживания в кристалле не имеет особенно большого значения. Вы обнаружите, что результаты вашего эксперимента будут приблизительно вращательно-инвариантны. Так происходит потому, что неоднородные электрические поля, нарушающие вращательную инвариантность кристалла, очень слабы по сравнению с теми видами полей, которыми вы располагаете для зондирования субатомных расстояний. Как только вы попадаете внутрь атома, важными становятся именно составляющие атома, а не то, как атом соединяется с другими атомами, образующими кристалл.

- Расстояния порядка 10^{-8} см. Здесь вы увидите все сложные межатомные силы, которые отвечают за объединение атомов в кристалл.

- Расстояния, гораздо большие 10^{-8} см. Здесь вы сможете наблюдать кубическую структуру кристалла; в этом масштабе невозможно увидеть вращательную инвариантность. Все, что остается, — это дискретная группа симметрии, связанная с кристаллической структурой.

Точно так же, как кристалл является зернистым в атомном масштабе, вакуум является зернистым в более маленьком масштабе, порядка 10^{-16} см, связанном со спонтанным нарушением $SU(2) \times U(1)$-симметрии. И опять мы можем выделить три различных области с разным масштабом:

- Расстояния, гораздо меньшие, чем 10^{-16} см. Здесь вы увидите $SU(2) \times U(1)$-калибровочную структуру мира как явную (хотя и приблизительную) симметрию. На столь малых расстояниях массы W^+, W^- и Z^0 (которые примерно равны 100 ГэВ) пренебрежимо малы по сравнению с энергиями, которые необходимы для проведения этого эксперимента. (Чтобы добраться до $\Delta x \sim 10^{-18}$ см, необходима энергия, равная 10^4 ГэВ.) Таким образом, можно пренебречь тем, что W и Z^0 имеют массы, а фотон — нет. Все частицы очень легки по сравнению с энергией эксперимента.

- Расстояния порядка 10^{-16} см. Здесь ваша жизнь весьма и весьма усложнится. Вы увидите раздел физики, который отвечает за спонтанное нарушение $SU(2) \times U(1)$-симметрии. Частицы W и Z^0 покажутся в ваших экспериментах, но они будут отличаться от фотонов, потому что их энергии покоя не настолько малы по сравнению с энергиями ваших зондов.

- Расстояния, гораздо большие, чем 10^{-16} см. Здесь вы вообще не увидите $SU(2) \times U(1)$-калибровочной симметрии. Вы даже прямо не увидите ни W, ни Z^0. У вас просто нет зонда с энергией, достаточно высокой для их создания. Вы увидите ненарушенную электромагнитную калибровочную инвариантность. Но более тяжелые калибровочные частицы покажутся только в слабых взаимодействиях короткого радиуса, вызванных их виртуальным обменом. Эти взаимодействия вряд ли были бы заметны, если бы не делали того, на что не способны сильные и электромагнитные взаимодействия. W^+- и W^--обмены изменяют частицы. Они появляются при бета-распаде. Z^0-обмены создают взаимодействия нейтральных токов нейтрино. И все они нарушают симметрию четности, потому

что лево- и правовинтовые составляющие кварков и лептонов взаимодействуют по-разному.

Эту последнюю область экспериментально изучает современная физика частиц; все описанные нами слабые эффекты действительно наблюдались во время экспериментов. Тот факт, что все детали, как и ожидалось, подходят друг к другу, дает нам уверенность, что картина слабых взаимодействий как спонтанно нарушенная $SU(2) \times U(1)$-калибровочная теория правильна, даже несмотря на то, что никто не видел ни W, ни Z^0.

Объединенная теория

$SU(2) \times U(1)$-калибровочная теория, которую мы только что описали, — это частичное объединение слабых и электромагнитных взаимодействий. Она описывает слабые взаимодействия заряженных и нейтральных токов и электромагнитные взаимодействия, которые, на первый взгляд, весьма отличаются от калибровочных. Однако несмотря на то, что это объединенная теория, в ней по-прежнему присутствуют два разных взаимодействия, связанных с группами $SU(2)$ и $U(1)$. В теории присутствуют две безразмерные константы связи: α_2 — для калибровочных частиц группы $SU(2)$ (трех W-частиц) и α_1 — для калибровочных частиц группы $U(1)$ (V^0). Их значения можно определить экспериментально, так как α, обыкновенная константа электромагнитной связи, определяется уравнением $1/\alpha = 1/\alpha_1 + 1/\alpha_2$, а слабый угол смешивания θ_W — уравнением $\sin^2\theta_W = \alpha/\alpha_2$.

Кроме того, электрический заряд квантуется лишь частично. В $SU(2)$-мультиплете (например, в дублете $e_{\bar{L}}, \nu_L$) все разности зарядов имеют целые значения, потому что частица в мультиплете может испустить $W^{\pm}$ и стать другим членом мультиплета. Однако средний заряд мультиплета не квантуется. Средний заряд — это $U(1)$ заряд S, и теоретической причины для его квантования, как и в случае электромагнитного заряда в КЭД, не существует. Наконец, кварки и лептоны по-прежнему никак не связаны между собой. Однако теперь у нас есть все кусочки головоломки, и мы можем сложить их в объединенную теорию.

Если бы мы просто объединили три калибровочные теории, то получили бы теорию с $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$-симметрией. Подобная комбинация симметрий может составлять $SU(5)$-симметрию. Это группа симметрии, основное представление которой содержит пять элементов (например, триплетов цветных кварков или слабых дублетов), а ее заряды представляют собой 5×5-бесследные эрмитовы матрицы.

Пятиэлементные векторы, образующие базис представления группы (аналогично цветным триплетам кварков, например), содержат и кварки, и лептоны, но исключительно одной спиральности. Одним из таких векторов может быть следующий:

$$d_R^r \quad d_R^w \quad d_R^b \quad e_R^+ \quad \bar{\nu}_R.$$

Все они связаны $SU(5)$-симметрией; первые три связаны $SU(3)$-цветной симметрией, а последние два — слабой $SU(2)$-симметрией.

Двадцать четыре $SU(5)$-матрицы связаны с двадцатью четырьмя калибровочными полями. Восемь матриц содержат элементы только в верхней 3×3-подматрице; они связаны с восемью глюонами. Четыре матрицы связаны с $W^{\pm}$, γ и Z^0. Фотон, например, связан с

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} -1/3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

W-частицы связаны с зарядами, содержащими ненулевые элементы только в нижней правой 2×2-подматрице.

Оставшиеся двенадцать калибровочных частиц вызывают переходы между кварками и антилептонами из пяти основных. Мы будем называть их X-ами.

Поскольку $SU(5)$ — простая группа, все заряды, включая, конечно же, и $\mathbf{Q}$, квантуются. Таким образом, мы, наконец, пришли к теоретическому пониманию квантования заряда.

По крайней мере, мы нашли причину квантования заряда правовинтовых d-кварков, позитронов и антинейтрино, а следовательно, и их левовинтовых античастиц. Однако для нас припасено еще кое-что получше. Составив десять пар из пяти фундаментальных объектов, можно построить следующее простейшее семейство с $SU(5)$-калибровочной инвариантностью. (Аналогичным образом из пары состояний со спинами 1/2 можно сформировать состояние с нулевым спином.) Десять состояний, образованных из пар правовинтовых состояний, имеют все нужные заряды (цветной, электрический и слабый), чтобы образовать оставшиеся левовинтовые частицы и античастицы; состояния же, образованные из пар левовинтовых состояний, составляют оставшиеся правовинтовые состояния. Этот процесс отражен в таблице 1. Индивидуальные состояния строятся из фундаментальных 5 (и их античастиц, названных $\bar{5}$); аналоги $SU(3)$-«цветов» (r, w, b) мы назвали «метацветами» и обозначили буквами $a - e$. В таблице также приводятся значения (диагональных)

Таблица 8. **Фундаментальные частицы в** $SU(5)$

Частица	*Представление*	*«Метацвет»*	Q	T_3	T_8	R_3
d_R^r	5	a	$-1/3$	$1/2$	$1/2\sqrt{3}$	0
d_R^w	5	b	$-1/3$	$-1/2$	$1/2\sqrt{3}$	0
d_R^b	5	c	$-1/3$	0	$-1/\sqrt{3}$	0
e_R^+	5	d	1	0	0	$1/2$
ν_R	5	e	0	0	0	$-1/2$
u_L^r	10	$a+d$	$2/3$	$1/2$	$1/2\sqrt{3}$	$1/2$
u_L^w	10	$b+d$	$2/3$	$-1/2$	$1/2\sqrt{3}$	$1/2$
u_L^b	10	$c+d$	$2/3$	0	$-1/\sqrt{3}$	$1/2$
d_L^r	10	$a+e$	$-1/3$	$1/2$	$1/2\sqrt{3}$	$-1/2$
d_L^w	10	$b+e$	$-1/3$	$-1/2$	$1/2\sqrt{3}$	$-1/2$
d_L^b	10	$c+e$	$-1/3$	0	$-1/\sqrt{3}$	$-1/2$
e_L^+	10	$d+e$	1	0	0	0
$\bar{u}_L^r$	10	$b+c$	$-2/3$	$-1/2$	$-1/2\sqrt{3}$	0
$\bar{u}_L^w$	10	$a+c$	$-2/3$	$1/2$	$-1/2\sqrt{3}$	0
$\bar{u}_L^b$	10	$a+b$	$-2/3$	0	$1/\sqrt{3}$	0
$\bar{d}_L^r$	$\bar{5}$	$\bar{a}$	$1/3$	$-1/2$	$-1/2\sqrt{3}$	0
$\bar{d}_L^w$	$\bar{5}$	$\bar{b}$	$1/3$	$1/2$	$-1/2\sqrt{3}$	0
$\bar{d}_L^b$	$\bar{5}$	$\bar{c}$	$1/3$	0	$1/\sqrt{3}$	0
e_L^-	$\bar{5}$	$\bar{d}$	-1	0	0	$-1/2$
ν_L	$\bar{5}$	$\bar{e}$	0	0	0	$1/2$
$\bar{u}_R^r$	$\bar{10}$	$\bar{a}+\bar{d}$	$-2/3$	$-1/2$	$-1/2\sqrt{3}$	$-1/2$
$\bar{u}_R^w$	$\bar{10}$	$\bar{b}+\bar{d}$	$-2/3$	$1/2$	$-1/2\sqrt{3}$	$-1/2$
$\bar{u}_R^b$	$\bar{10}$	$\bar{c}+\bar{d}$	$-2/3$	0	$1/\sqrt{3}$	$-1/2$
$\bar{d}_R^r$	$\bar{10}$	$\bar{a}+\bar{e}$	$1/3$	$-1/2$	$1/2\sqrt{3}$	$1/2$
$\bar{d}_R^w$	$\bar{10}$	$\bar{b}+\bar{e}$	$1/3$	$1/2$	$1/2\sqrt{3}$	$1/2$
$\bar{d}_R^b$	$\bar{10}$	$\bar{c}+\bar{e}$	$1/3$	0	$1/\sqrt{3}$	$1/2$
e_R^-	$\bar{10}$	$\bar{d}+\bar{e}$	-1	0	0	0
u_R^r	$\bar{10}$	$\bar{b}+\bar{c}$	$2/3$	$1/2$	$1/2\sqrt{3}$	0
u_R^w	$\bar{10}$	$\bar{a}+\bar{c}$	$2/3$	$-1/2$	$1/2\sqrt{3}$	0
u_R^b	$\bar{10}$	$\bar{a}+\bar{b}$	$2/3$	0	$1/\sqrt{3}$	0

цветных зарядов T_3 и T_8 и (диагонального) слабого заряда R_3 для каждой частицы. (Этот процесс, конечно же, ни в коем смысле не является динамическим строительным процессом.)

На языке теории групп, квинтуплеты 5 и $\bar{5}$ — это наименьшие несократимые представления группы $SU(5)$. Кососимметрической комбинацией двух 5 (или двух $\bar{5}$) является 10 (или $\bar{10}$) — следующее минимальное представление $SU(5)$. Этих представлений нам достаточно для описания всех кварков и лептонов. Другие лептоны и кварки с другими ароматами имеют такие же $SU(5)$-представления: s- и c-кварки вместе с лептонами μ и ν_μ образуют другое $SU(5)$-«семейство», то же самое делают t- и b-кварки вместе с лептонами τ и ν_τ. Однако существуют некоторые астрофизические свидетельства того, что подобных семейств не так уж и много.

Важно понимать, что этот строительный процесс не должен был работать. Он являет собой первый, простейший и, в некотором смысле, самый замечательный успех $SU(5)$-объединения.

Одним из самых приятных аспектов теории для нас стало обеспечение причины квантования заряда, которое просто следует из самого строительного процесса. Даже в случае существования более сложных $SU(5)$-семейств Q все равно должен квантоваться величинами, кратными 1/3, потому что все заряды должны быть суммами зарядов простейшего семейства. Более того, факт наличия у всех наблюдаемых систем целочисленного Q связан с их цветонейтральностью. Единственный «способ» построить из простейшего семейства цветонейтральные системы состоит в использовании частиц e_R^+ или $\bar{\nu}_R$ или комбинации $d_R^r + d_R^w + d_R^b$, каждая из которых имеет целочисленный заряд.

В $SU(5)$ квантование заряда тривиально, потому что заряды в 5 «соразмерны». Однако в действительности квантование заряда несет более глубокий смысл: ему присущ топологический аспект и оно связано с существованием магнитных монополей в калибровочных теориях, основанных на простых группах, которые, в свою очередь, требуют квантования заряда.

$SU(5)$-объединение мы разработали в конце 1973 года.

Масштаб объединения

Все заряды в $SU(5)$ входят симметричным образом, поэтому, в каком-то смысле, там должна присутствовать лишь одна константа связи, описывающая все взаимодействия. Но на расстояниях порядка 10^{-16} см и больше все происходит далеко не так. Там α_3 больше, чем α_2, которая, в свою очередь, больше α_1. По этой причине и по некоторым другим, к которым мы еще вернемся, должен существовать еще один уровень спонтанного нарушения симметрии, связанный с разделением $SU(5)$ на $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

Мы должны допустить, что вакуум является зернистым и структурированном в другом масштабе L, гораздо меньшем, чем масштаб 10^{-16} см, который связан со спонтанным нарушением $SU(2)\times U(1)$-симметрии. Как и раньше, можно выделить три различные области разного масштаба:

- Расстояния, гораздо меньшие, чем L. Здесь вы увидите $SU(5)$-калибровочную инвариантность как явную приблизительную симметрию. Все калибровочные частицы, фотон, глюоны, W, Z^0 и X очень легки по сравнению с энергиями, необходимыми для зондирования столь коротких расстояний.

- Расстояния порядка L. На этих расстояниях вы увидите сложную физику спонтанного нарушения $SU(5)$-симметрии. Будут создаваться X, гораздо более тяжелые, чем все другие калибровочные частицы, с массой порядка $\hbar c/L$.

- Расстояния, гораздо большие, чем L. Здесь вы непосредственно увидите только $SU(3)$- и $SU(2)\times U(1)$-калибровочную инвариантность. X слишком тяжелы, чтобы их можно было создать непосредственно, но они действительно создают очень слабые взаимодействия короткого радиуса.

Теперь мы можем понять несоразмерность констант связи. В первой области, на очень коротких расстояниях, где $SU(5)$-калибровочная симметрия проявляется в явном виде, действительно присутствует лишь одна константа связи, которая описывает все калибровочные взаимодействия. Но во второй области симметрия нарушается, так что для бóльших расстояний связи расходятся. Поскольку константа связи α_3 группы $SU(3)$ обладает максимальной асимптотической свободой, она увеличивается быстрее, чем α_2, по мере увеличения расстояния, на котором ее измеряют. Константа связи α_1 группы $U(1)$, напротив, совсем не обладает асимптотической свободой (потому что калибровочная частица не переносит заряд). Поэтому α_1 вообще уменьшается при увеличении расстояния. Эта ситуация отражена на рисунке 5.

На рисунке 5 приведено качественное отражение того, что на расстояниях, намного превышающих L, связи имеют правильный вид, когда α_3 больше, чем α_2, которая больше, чем α_1. Но мы можем добиться еще лучшего. На расстояниях меньше 10^{-16} см все связи достаточно малы, так что вполне можно вычислить их зависимость от расстояния, на котором они измеряются. Тогда, если известны две связи на расстоянии в 10^{-16} см, то их можно проследить до все более коротких расстояний, пока они не встретятся, что произойдет на расстоянии порядка L. Более

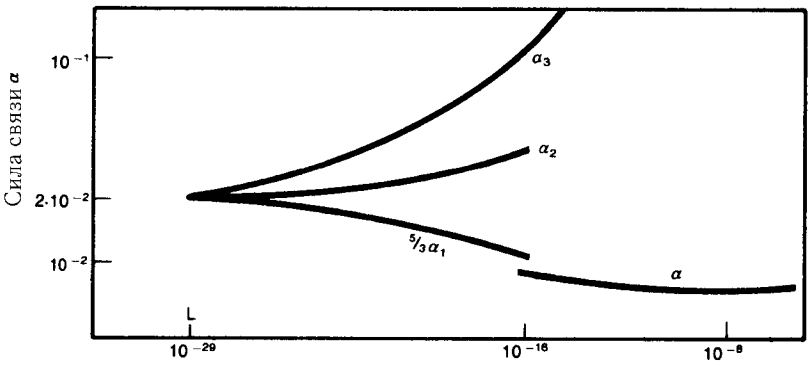


Рис. 5. Силы связи изменяются в зависимости от расстояния. На расстояниях, не превышающих «расстояние объединения» L, все три константы одинаковы (равны групповому теоретическому множителю 5/3 для α_1). Сильная связь, α_3, становится большой на расстояниях, превышающих 10^{-14} см, указывая на нарушение теории возмущений КХД вследствие конфайнмента кварков. На расстояниях, превышающих 10^{-16} см, спонтанное нарушение $SU(2) \times U(1)$-симметрии сводит α_2 и α_1 в одну электромагнитную связь α.

того, тогда можно предсказать значения расстояний, больших, чем L. Например, можно воспользоваться константой α (комбинацией α_2 и α_1, имеющей место при электромагнитных взаимодействиях), значение которой очень хорошо известно из экспериментов, и α_3 (константа глюонной связи), которая была измерена, но с довольно большой погрешностью, после чего можно оценить L и θ_W. В результате получается, что L равна около 10^{-29} см, а $\sin^2\theta_W$ — около 0,20.

Это предсказание было сделано в 1974 году в Гарварде Джорджи, Хелен Квинн (которая теперь работает в SLAC) и Вайнбергом для большого класса объединенных теорий, включая $SU(5)$. В то время оно не предвещало ничего хорошего для объединения, потому что экспериментальное значение $\sin^2\theta_W$ составляло около 0,35.

Однако тогда мы не слишком беспокоились из-за расхождения предсказанного и наблюдаемого значений, потому что мы не были уверены, что $SU(3)$ и $SU(2) \times U(1)$ — это действительно правильные описания физики в масштабе 10^{-16} см, поэтому мы подумали, что, быть может, нужно обобщить $SU(5)$, чтобы она включила в себя новую физику. Однако за годы, прошедшие от 1974 до настоящего времени, $SU(3)$- и $SU(2) \times U(1)$-теории прошли несколько важных экспериментальных

проверок, так что сегодня мы в гораздо большей степени уверены в обосновании $SU(5)$-теории. И, к счастью для теории, экспериментальное значение $\sin^2\theta_W$ снизилось и сегодня составляет $0,23 \pm 0,02$, что почти полностью соответствует предсказанию объединения.

Распад протона

X-частицы в $SU(5)$-объединенной теории очень тяжелы, потому что они связаны со спонтанным нарушением симметрии на очень коротком расстоянии. Их масса составляет порядка $\hbar c/L$, другими словами, она в 10^{15} раз больше массы протона. Мы никогда не сможем создать их на ускорителях, но, возможно, нам удастся наблюдать эффект их виртуального обмена. Взаимодействия, переносимые X-обменом, очень слабы, поскольку имеют очень короткий радиус действия. Но, подобно обычным слабым взаимодействиям, эти очень слабые взаимодействия вызывают процессы, которые вообще не могли бы произойти в их отсутствие.

Самыми интересными из них являются взаимодействия, изменяющие барионное число. Барионное число определяется как разность одной третьей числа кварков и одной третьей числа антикварков. Барионное число протона равно единице, а барионное число мезона или лептона — нулю.

$SU(3)$- и $SU(2) \times U(1)$-калибровочные взаимодействия не изменяют барионное число: они сохраняют его, потому что их калибровочные частицы не вызывают перехода между кварком и лептоном или кварком и антикварком. Если бы барионное число сохранялось точно, то протон был бы абсолютно стабильным, поскольку он является легчайшей частицей с барионным числом, равным единице. Поскольку распадов протона не наблюдалось (хотя некоторые экспериментаторы пытались их найти), было достаточно разумно предположить, что барионное число сохраняется абсолютно, что и сделали большинство физиков.

Однако процессы, вызванные X-частицами в $SU(5)$-теории и изменяющие барионное число, могут привести к распадам протона. Одна из X-частиц, например, соединяется с «метацветами» a и d. d_R^r-кварк может испустить такую X-частицу и превратиться в e^+; а u_L^r-кварк может поглотить ту же X-частицу и превратиться в $\bar{u}_L^b$. Таким образом, обмен X-частицей может превратить пару кварков, d и u, в лептон и антикварк, e^+ и $\bar{u}$. При этом барионное число системы изменяется на единицу: от 2/3 до -1/3.

Рисунок 6 изображает, что происходит, если этот процесс протекает внутри протона: он распадается на позитрон и нейтральный пион. Такой распад чрезвычайно редок. X-частица имеет большую массу, поэтому,

чтобы произошел обмен, два кварка должны подойти очень близко друг к другу.

Квинн, Вайнберг и Джорджи использовали расчет L, чтобы оценить частоту протонного распада. С тех пор эту оценку уточняли многие ученые, включая Андржея Бура, Джона Эллиса, Мэри Гайар и Деметреса Нанопулоса из CERN, Терри Голдмана и Дугласа Росса из Калифорнийского технологического института и Уильяма Марсиано из Рокфеллеровского института. В настоящее время считается, что частота протонного распада составляет примерно один распад протона в каждые 10^{31} лет.

Салам и Иогеш Пати из университета Мэриленда независимо и в различном контексте выдвинули возможность нестабильности протона. Их модель основывается на другой версии теории КХД адронов.

Какова вероятность прямого наблюдения протонного распада? Каким образом можно измерить время жизни протона как равное 10^{31} годам, когда возраст Вселенной со времени Большого взрыва насчитывает всего лишь около 10^{10} лет? Ответ состоит в наличии большого количества протонов. Например, в 1 000 тонн материи присутствует порядка 5×10^{32} протонов и нейтронов. Мы ожидаем, что примерно 50 из них будут распадаться каждый год. Так что вполне достаточно отследить все, что происходит внутри 1 000 тонн материи, отделить протонные и нейтронные распады от всех прочих, тогда и обнаружатся процессы, изменяющие барионное число.

Проведение экспериментов в таком масштабе планируется несколькими группами ученых. Эти эксперименты необходимо проводить под землей, чтобы минимизировать погрешность, создаваемую космическими лучами, взаимодействующими с частицами взятого образца материи. Один эксперимент планируется провести в соляной шахте недалеко от Кливленда, другой — в шахте на серебряном прииске в Юте, а третий — в железной шахте в Миннесоте. В несколько меньшем масштабе в туннелях под Альпами планируются европейские эксперименты, продолжается эксперимент в золотоносной шахте Южной Дакоты и совместный индийско-японский эксперимент на золотом прииске Кольского полуострова.

Объединение также породило еще одну очень интересную идею. Существует одна машина, которую сами мы построить не в состоянии, но которая, возможно, непосредственно доходила до области расстояний порядка 10^{-29} см — это Большой взрыв самой Вселенной. Примерно через 10^{-40} секунд после сингулярности, которая дала сигнал к началу всего, Вселенная расширилась до радиуса, сравнимого с L. В эту невообразимую эпоху еще только начинало появляться нарушение объединяющей калибровочной инвариантности, а взаимодействия, изменяющие барионное число, были столь же сильны, как и все остальные. Кажется

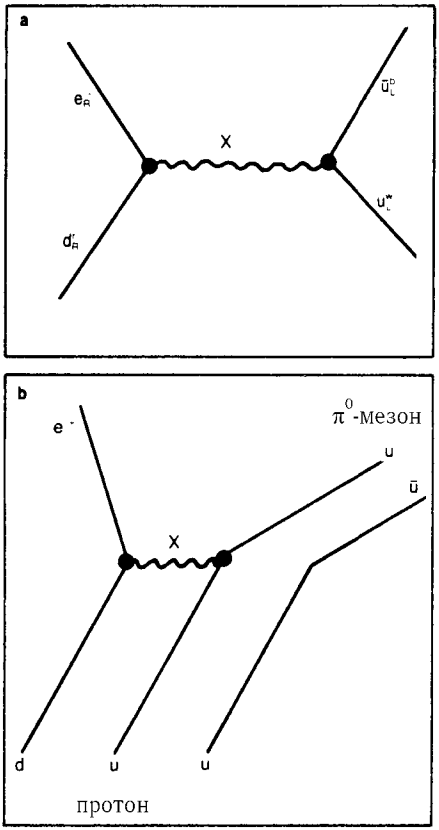


Рис. 6. Распад протона. (a) Обмен одной из сверхтяжелых калибровочных частиц X может произойти, когда два составляющие его кварка приблизятся друг к другу на расстояние около 10^{-29} см. (b) Когда в протоне происходит такой обмен, он распадается на позитрон и пион.

вероятным, что они могли создать больше барионов, чем антибарионов. Если это действительно так, тогда объединение — это решение старой астрофизической загадки: почему Вселенная создана из материи, а не из антиматерии?

Впервые это интересное наблюдение сделал Мотохико Йошимура из KEK в Японии, а впоследствии его развивали многие физики, включая

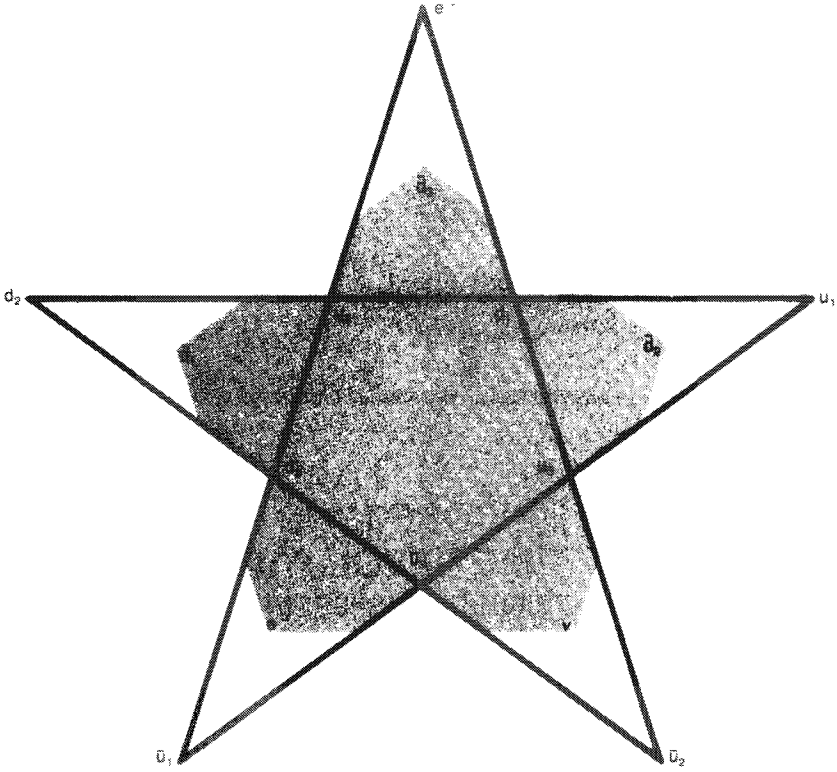


Рис. 7. Отношения между частицами в $SU(5)$. Каждая элементарная частица обладает некоторой комбинацией четырех независимых зарядов и может быть изображена в виде точки в четырехмерном пространстве. Данная диаграмма является двумерной проекцией такого изображения, частично сохраняющей симметрию четырехмерного оригинала. Все изображенные состояния являются левовинтовыми частицами. Пятиугольник представляет группу состояний, которые преобразуются согласно «$\bar{5}$»-представлению $SU(5)$-симметрии, а пятиконечная звезда и внутренний пятиугольник представляют «10». Вертикальная ось — это линейная комбинация T_8, R_3 и Q; а горизонтальная ось — это комбинация — T_3 и R_3.

Эллиса, Гайар, Нанопулоса, Вайнберга, Леонарда Зускинда из Стэнфорда и Сэма Треймана и Фрэнка Вильчека из Принстона. Они показа-

ли, что создание избытка барионов над антибарионами требует, чтобы взаимодействия, изменяющие барионное число, выглядели иначе при их обратном направлении во времени. Этому условию удовлетворяет $SU(5)$-теория.

Таким образом, астрофизические наблюдения и эксперименты, проведенные глубоко под землей, могут дать ключ к структуре мира на расстоянии порядка 10^{-29} см — расстоянии, настолько малом, что надеяться «прощупать» его непосредственно мы не можем.

Великое объединение

Артур, разумный инопланетянин, прибывший на Землю с далекой планеты, наблюдает за двумя людьми, играющими в шахматы. Перед ним стоит две задачи: определить правила игры и найти выигрышную стратегию. С помощью этой метафоры я пытаюсь описать два огромных раздела физической науки. В дисциплинах типа атомной физики, физики твердого тела или химии правила известны очень хорошо: основными кирпичиками являются электроны и атомные ядра, силы имеют электромагнитную природу, а законы описываются квантовой механикой. Проблема состоит «лишь» в том, чтобы применить известные законы к сложным ситуациям, которые имеются в наличии. Тем не менее, нам еще предстоят новые интересные открытия: знания одних только правил шахмат недостаточно, чтобы быть гроссмейстером.

В физике элементарных частиц и космологии дела обстоят совсем иначе. Мы не знаем всех правил и даже того, можно ли их узнать. Предмет «великого объединения» находится именно на этой умозрительной границе. Это амбициозная попытка найти фундаментальное единство различных направлений физики элементарных частиц. Это может быть шагом как в правильном направлении, так и в совершенно ложном, но, как бы то ни было, очень скоро эта теория будет подвергнута решающей экспериментальной проверке. Для меня сейчас очень волнующее время, я испытываю восторг, которым мне хочется поделиться с вами.

Большинство физиков обладают непоколебимой верой в основную простоту природы — это один из самых эффективных руководящих принципов. Много раз, снова и снова, эта слепая вера оправдывала себя. Многие эксцентричные явления природы получили объяснение. Что может быть более различным, чем магнетизм, электричество и свет? И тем не менее, в девятнадцатом веке Джеймс Клерк Максвелл показал, что все это лишь различные проявления одних и тех же фундаментальных законов. Все эти проявления, равно как и радиоволны, радиолокатор и лучистое тепло, он описал с помощью уникальной и изящной системы уравнений. Электромагнетизм Максвелла — это действующая сила, которая управляет всем, что мы видим, слышим, обоняем, чувствуем или пробуем.

Альберт Эйнштейн тщетно искал конечную простоту, с помощью которой все силы природы можно было бы описать в одной теории. Он

пытался объединить электромагнетизм с гравитацией. Мы по-прежнему ищем такую объединенную теорию, но сейчас нам известны некоторые причины неудачи Эйнштейна. В небесах и на Земле попросту существует больше сил, чем предполагала философия Эйнштейна. Он не хотел даже думать о том, что в то время было непроницаемой тайной атомного ядра. «Все это станет не более чем пустой болтовней, — должно быть, считал он, — если только удастся объединить гравитацию и электромагнетизм».

Атомное ядро больше не является такой уж тайной, но мы узнали, что для объяснения его поведения необходимы две дополнительные силы, или взаимодействия. Корректная объединенная теория должна включать описание сильного и слабого ядерных взаимодействий, которые отвечают за удержание ядерных составляющих вместе и позволяют радиоактивное превращение одного химического элемента в другой. Эйнштейн сделал еще одну критическую ошибку. Он так и не принял квантовую теорию, одним из косвенных создателей которой был он сам. «Бог не играет в кости», — сказал Эйнштейн. Однако теперь мы убеждены, что это не так.

Современный подход к построению объединенной теории зависит от двух фундаментальных систем: специальной теории относительности Эйнштейна и квантовой механики. Это два грандиозных революционных догмата физики начала двадцатого века. Ни одно достижение физики прошлой половины века не сравнится с этими великими теориями. Синтез данных дисциплин называется «квантовой теорией поля», в эзотерическом контексте которой выражается вся физика элементарных частиц.

Первая успешная квантовая теория поля называется квантовой электродинамикой, или КЭД, и описывает взаимодействие электронов и фотонов (или световых частиц). Она не является законченной теорией физики элементарных частиц, так как не описывает структуру атомного ядра. Тем не менее, эта теория дает чрезвычайно точное и лаконичное описание некоторых явлений. Например, в рамках этой теории магнитные свойства электрона описываются с точностью до 10 десятичных разрядов — сейчас это предел экспериментальной точности. КЭД обычно считают парадигмой более полной теории, которая может включать описание сильного и слабого взаимодействий.

С вашего позволения, я перейду к сильным взаимодействиям. Известно, что атомное ядро образовано более элементарными частицами, которые называются нуклонами. Существует два вида нуклонов: протоны, которые являются ядрами простейших атомов, например, водорода, и нейтроны, которые являются нестабильными частицами, способными, однако, выживать, находясь в ядре. Протон несет электрический заряд, который численно в точности равен заряду электрона, но имеет про-

тивоположный знак. Противоположные заряды притягиваются. Так что протон объединяется с электроном, образуя атом водорода. Нейтрон, как и атом водорода, электрически нейтрален. Нейтроны и протоны очень малы по сравнению с атомами, в образовании которых они участвуют. Когда-то считалось, что они являются действительно точечными элементарными частицами. Все полагали, что именно протоны, нейтроны и электроны — это основные кирпичики, образующие материю.

Однако все это изменилось. Сейчас мы знаем, что нуклон — это сложная система, образованная тремя кварками. Именно кварки сейчас кажутся основными составляющими ядерной материи. Два вида кварков, называемые «up» (верхний, u-кварк) и «down» (нижний, d-кварк), необходимы для создания нуклонов. Электрические заряды кварков являются долями заряда электрона, обыкновенно принимаемого за «единичный заряд»: u-кварки несут 2/3 единицы заряда, а d-кварки — -1/3. Протон — это сложная система, содержащая два u-кварка и один d-кварк; нейтрон образован двумя d-кварками и одним u-кварком. Частицы, содержащие три u-кварка или три d-кварка, живут очень мало, но, тем не менее, были обнаружены в лабораторных условиях.

Фундаментальное взаимодействие кварков, связывающее их в группы по три для образования нуклонов, известно под названием квантовой хромодинамики, или КХД. Хотя КХД и КЭД описывают весьма различные виды взаимодействия, между ними существует глубокая аналогия. И та, и другая являются квантовыми теориями поля и относятся к разряду «калибровочных теорий». КЭД приводит к взаимодействиям между заряженными частицами типа электронов и ядер; именно КЭД связывает их воедино для образования атомов. Аналогичным образом, КХД приводит к взаимодействиям, удерживающим кварки вместе для образования нуклонов. Величина, аналогичная электрическому заряду в КЭД, в КХД называется «цветом». Кварки имеют цвет. Точнее, каждый «аромат» кварка (u или d) имеет три цвета (скажем, красный, зеленый и синий). Однако нуклоны «бесцветны». Они содержат по одному кварку каждого цвета. Если эти неопределенные фразы перевести на точный язык математики, мы узнаем, почем именно *три* частицы — а не две или четыре — могут соединиться и образовать наблюдаемую частицу. Мы также понимаем, почему нельзя получить свободный кварк, то есть такой, который существует сам по себе. Кварк имеет цвет, а в качестве изолированных частиц могут существовать только бесцветные системы. Кварки существуют, но только как составляющие образованных ими частиц.

За последние несколько лет было проведено несколько успешных экспериментальных проверок КХД. Сейчас нам кажется, что мы располагаем корректной теорией сильных взаимодействий, которая настолько же правильна, как и КЭД — теория электромагнитных взаимодействий;

хотя с помощью КХД мы пока не можем предсказывать ядерные процессы с точностью до десяти десятичных разрядов.

А сейчас я перейду к слабым ядерным взаимодействиям, отвечающим за процесс ядерного бета-распада. Я упомянул, что нейтрон сам по себе нестабилен. По истечении нескольких минут он распадается на три стабильных частицы: протон, электрон и антинейтрино. (Нейтрино и антинейтрино — это безмассовые или почти безмассовые частицы, которые не подвержены ни сильным, ни электромагнитным взаимодействиям. Подобно призраку, они могут проходить сквозь километры материи без единого столкновения.) До недавнего времени удовлетворительной теории слабых взаимодействий не было вообще; но сейчас такая теория существует.

Взаимодействие каждого типа переносится своим видом частицы. Электромагнетизм переносят фотоны: силу, действующую между двумя заряженными частицами, можно считать вызванной обменом этими фотонами. Аналогично, сильные взаимодействия переносят «глюоны». В отличие от фотонов, глюоны невозможно увидеть непосредственно, потому что они, как и кварки, имеют цвет. Однако у нас есть хорошее, хотя и косвенное, экспериментальное свидетельство их существования. С тридцатых годов двадцатого века физики подозревали, что существует особая частица, переносящая слабые взаимодействия: «промежуточный векторный бозон», или W-частица.

Предполагалось, что процесс бета-распада происходит поэтапно: сначала нейтрон испускает W^- и превращается в протон; затем W^- превращается в антинейтрино и электрон. Хотя это допущение дает полезную и способную делать предсказания картину слабых взаимодействий, ее все же нельзя назвать самосогласованной.

За прошедшее десятилетие ученые осознали, что разумная теория слабых взаимодействий требует объединения слабых и электромагнитных взаимодействий. Тогда была разработана «теория электрослабых взаимодействий», которая привела к многочисленным экспериментальным достижениям. Но, самое главное, она предсказала существование нового класса физических явлений, называемых «нейтральными токами». Их уже наблюдали, и они количественно согласуются с предсказаниями теории.

Теория электрослабых взаимодействий, типа КХД, относится к разряду калибровочных. Поэтому все три фундаментальных взаимодействия элементарных частиц теперь можно включить в самосогласованную и обладающую высокой предсказательной способностью квантовую теорию поля. Эта «стандартная теория» предлагает предположительно корректное и полное описание *всех* явлений, за исключением гравитации. Тем не менее, в эстетическом плане этой теории чего-то недостает.

КЭД — теория, содержащая всего один произвольный параметр: силу электрического отталкивания между двумя электронами. «Стандартная теория» содержит *семнадцать* таких произвольных параметров. Ясно, что это слишком большое число, чтобы считать его действительно фундаментальным. Более того, стандартная теория не объясняет факт «квантования заряда»: то, что электрический заряд электрона *точно* равен заряду протона, но имеет противоположный знак.

Теории великого объединения пытаются исправить эти недостатки. Точнее, эти теории принимают во внимание тот факт, что элементарные кварки и лептоны (частицы *не* образованные кварками), судя по всему, образуют простые «семейства». Первое «семейство» состоит из u-кварка с зарядом 2/3, d-кварка с зарядом -1/3, электрона с зарядом -1 и нейтрино с нулевым зарядом. Одного первого семейства достаточно, чтобы управлять «космическим кораблем Земля» и обеспечивать топливо для Солнца. Однако существует *три* таких семейства элементарных частиц. Члены двух других семейств образуют нестабильные частицы, создаваемые космическими лучами или на ускорителях частиц. Каждое семейство состоит из двух кварков и двух лептонов с одинаковым строением электрического заряда. Мы не понимаем, почему в природе существует не одно семейство, а целых три.

В теориях великого объединения каждое семейство рассматривается как самостоятельная структурная единица. Такие разные частицы, как кварки и лептоны, группируются в одно целое. Электрические заряды кварков и лептонов указывают на разумность этого: если мы вспомним, что кварки имеют три цвета, мы поймем, что сумма зарядов частиц каждого семейства равна нулю. Я должен немного рассказать о том, что значит «собрать вместе» разнородные частицы или силы.

Степень симметрии системы нередко зависит от температуры: обычно при высокой температуре симметрия проявляется сильнее, чем при низкой. К примеру, жидкость «изотропна»: все ее направления эквивалентны. При остывании из нее могут образоваться кристаллы. Вот они уже могут быть какими-угодно, только не изотропными; они обладают четко определенной симметрией, но не такой полной, как изотропия. Другим примером являются постоянные магниты. Асимметрия, отражаемая существованием отдельного северного и южного полюсов, исчезает, когда магнит нагревается, теряя свои магнитные свойства.

Таким образом, специалисты по физике частиц рассматривают наблюдаемые асимметрии природы как искусственный признак, вызванный преобладающей во Вселенной низкой температурой. При более высоких температурах врожденная симметричность Вселенной проступает более явно. К сожалению, в данном случае слово «высокие» в действительности означает очень высокие. Существует три области:

- ГОРЯЧАЯ. Сюда я отношу температуры выше 10^{29} градусов Кельвина, или энергии порядка 10^{16} ГэВ. При таких условиях существует полная симметрия. Кварки и лептоны не имеют массы и не отличимы друг от друга. Сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия — эквивалентные разделы теории великого объединения. Сегодня эти температуры практически недостижимы. Они достигались только в первые мгновения Большого взрыва. С тех пор Вселенная замерзла, потеряв свою симметрию.

- ТЕПЛАЯ. Это область между 10^{29} и 10^{15} градусами Кельвина, или между энергиями в 100 и 10^{16} ГэВ. Нижняя граница такой энергии скоро станет достижима для ускорителей, которые в настоящее время строятся в Европе и в США. При этих температурах очевидной должна быть симметрия между слабыми и электромагнитными взаимодействиями. Это диапазон энергии, в котором можно подвергнуть точной проверке объединенную теорию электрослабых взаимодействий.

- ПРОХЛАДНАЯ. При более низких энергиях теряется вся симметрия вселенной за исключением «цвета», лежащего в основе сильных взаимодействий, и «заряда», создающего электромагнетизм. Слабые взаимодействия наблюдаются как слабые, потому что повседневные энергии во много раз меньше энергий в 100 ГэВ, соответствующих электрослабым взаимодействиям.

Простейшая теория великого объединения основана на математической группе, известной под названием $SU(5)$. Это уникальная объединенная теория, в которой основными семействами частиц являются всем известные кварки и лептоны. В этой теории присутствует ровно 24 частицы, в процессе обмена которыми возникают силы: *фотон*, переносящий электромагнетизм, не имеющий массы и могущий быть увиденным; *три переносчика слабых взаимодействий* (W^+, W^-, Z^0), которые имеют массу порядка 100 ГэВ (если выразить ее через энергию) и могут наблюдаться (мы должны их увидеть с помощью ускорителей следующего поколения); *восемь глюонов*, которые переносят сильные «хромодинамические» взаимодействия и, будучи окрашенными, не могут наблюдаться по отдельности, хотя их косвенные «отпечатки» видны достаточно четко; *еще двенадцать частиц*, которые имеют большую массу (около 10^{16} ГэВ), очень короткое время жизни и, в принципе, наблюдаться не могут. Эти последние частицы приводят к новой силе, в 10^{28} раз более слабой, чем обычные слабые взаимодействия. Эта новая сила может превращать кварки в лептоны, тем самым приводя к распаду

протонов — самому драматическому предсказанию теорий великого объединения. Следовательно, вся материя распадается, хотя и через очень долгий период полураспада. Среднестатистический протон должен распадаться через 10^{31} лет, ошибка данного значения может быть равной множителю 10.

Теория предсказывает, что в тонне материи один протон должен распадаться каждые десять лет. Хотя этот эффект и представляется очень малым, его все же можно зарегистрировать. В настоящее время в Индии, Юте, Огайо, Миннесоте и, возможно, в Альпах в подземных шахтах проводятся такие эксперименты, задействующие сотни или тысячи тонн материи. Через год или два мы должны узнать, действительно ли распадается протон и действительно ли «бриллианты вечны».

Однако великое объединение не только предсказывает смерть всей материи, оно может объяснить и ее рождение. Ученые уже давно задаются вопросом, почему Вселенная состоит именно из материи, а не из антиматерии, но только сегодня мы приближаемся к ответу. В очень молодой Вселенной взаимодействие, создающее и разрушающее протоны, было гораздо более сильным, чем сегодня. Считается, что взаимодействие, которое приведет к распаду протона, когда-то отвечало, прежде всего, за создание материи.

Великое объединение имеет лишь несколько экспериментальных проверок. Оно предсказывает значение параметра, который изобрел я, но который называется углом Вайнберга. Пять лет назад это предсказание очень сильно расходилось с экспериментальными данными. Проведя всего лишь более точные эксперименты, экспериментаторы изменили свое значение. Сегодня экспериментальное значение угла Вайнберга полностью согласуется со значением, предсказанным $SU(5)$. Очень скоро мы узнаем, распадается ли протон, как это предсказывает $SU(5)$.

К сожалению, эксперименты по распаду протона показали, что протоны живут гораздо дольше, чем это предсказывает $SU(5)$. Таким образом, была доказана ошибочность простейшей теории великого объединения. И все же эти эксперименты привели к неожиданному открытию. Детекторы, которые должны были регистрировать распад протона, были установлены как раз вовремя, чтобы зарегистрировать волну нейтрино, исходящих от сверхновой, вспыхнувшей в 1987 году. Вместо того чтобы подтвердить мою теорию распада протона, эти эксперименты доказали, что астрофизики действительно понимают сущность сверхновых.

Достоинств великого объединения не счесть. Очевидно, что оно предшествует реализации мечты Эйнштейна об объединении *всех* взаимодействий. Оно объясняет факт безмассовости фотона. В стандартной (необъединенной теории) фотон мог иметь массу, но не имел. В теории великого объединения такой возможности у него нет. Точно также

объясняется и факт квантования заряда. На нас налагаются равенство зарядов протона и позитрона, а также необходимость любопытных дробных зарядов кварков и нулевого заряда нейтрино. В $SU(5)$ другого пути просто не существует. Каждое семейство кварков и лептонов является четко определенным представлением $SU(5)$ со свойствами, которые *должны быть* именно таким, какими мы их *видим*. Мы даже понимаем, почему сильные взаимодействия настолько сильнее электродинамических. Когда Вселенная была молодой, все взаимодействия имели одинаковую силу. В холодной, «кристаллической» Вселенной современности они разошлись вычислимым и понятным образом.

Быть может, самым большим достоинством великого объединения является предсказание нового класса наблюдаемых явлений. В $SU(5)$, или в ее более простых аналогах, протон (а потому и вся ядерная материя) должен распадаться за наблюдаемое время жизни. Действительно, предсказанное время его жизни лишь немногим длиннее установленного нижнего предела в 10^{29} лет. (Кстати, мы «кишками» чувствуем, что время жизни протона превышает 10^{16} лет. Будь оно таким коротким, мы погибли бы от радиоактивности, создаваемой распадом материи в нашем собственном теле!) Это предсказание появляется достаточно неожиданно. Вполне возможно, что сейчас мы приближаемся к концу цепочки достижения все более и более высоких энергий. Большая электрон-позитронная (LEP) машина будет стоить Европе более 500 миллионов долларов и потребует огромное количество электроэнергии. Можно построить еще более крупные машины, но они будут не намного больше. Совершенно ясно, что нам никогда не удастся достичь энергии, при которой великое объединение станет очевидным: такая машина потребовала бы энергии больше, чем создает Солнце. Какое счастье, что природа обеспечила нас, как минимум, двумя окнами в мир высоких температур, это: Вселенная в целом, которая жарилась при таких температурах при рождении, и возможный распад материи. Почему материя существует? И распадается ли она?

Великое объединение предполагает (хотя, в принципе, не требует) существование других видов материи, которые могут изучаться не только на границе высоких энергий. Одним из таких видов являются магнитные монополи — частицы, которые несколько десятков лет назад придумал Поль Дирак. В магнетизме они являются тем же, чем электроны — в электричестве: изолированными магнитными северными или южными полюсами, в отличие от магнитов или других известных систем с магнитными свойствами, которые имеют как северный, так и южный полюс. Согласно теориям великого объединения такие частицы должны существовать, но не как элементарные, а как «топологические конденсаты» или нераспутывающиеся узлы в ткани квантовых полей.

Монополи теорий великого объединения — тяжелые частицы, они весят около 10^{16} ГэВ. Их масса, преобразованная в энергию движения, равна массе автобуса, мчащегося с высокой скоростью! Монополи искали в процессе экспериментов, но не такие. Эти настолько тяжелы, что если положить их на стол, то он их не выдержит и они упадут до самого ядра Земли. Возможно, монополи падают на Земли с космическими лучами; возможно, один монополь падает на один квадратный метр ежедневно.

Великое объединение предполагает, что нейтрино должны иметь измеримые массы и быть подвержены осцилляциям. Это значит, что по мере своего движения они могут изменяться. С помощью подобных эффектов можно интерпретировать несколько экспериментов. Существует хорошо известный дефицит солнечных нейтрино, которые падают на Землю. Быть может, недостающие нейтрино просто поменяли свое место и стали для нас неразличимы. Последние эксперименты, проведенные на ускорителях в CERN и на реакторе в США, предполагают, что происходит перемешивание нейтрино. А последние эксперименты, проведенные в Советском Союзе, предположительно показали ненулевую массу нейтрино. Все это очень важно не только для физики, но и для космологии. Некоторые астрофизики начинают верить не только в то, что у нейтрино есть масса, но и в то, что нейтрино является преобладающей разновидностью массы во Вселенной, а протоны и нейтроны — редкие и экзотические материалы, из которых созданы мы и наши звезды.

Великое объединение вполне может оказаться, как я уже говорил, всего лишь золотом для дураков. Но скоро оно будет проверено. Оно обещает великие открытия в физике частиц, далекие от дорогостоящей границы высоких энергий. Оно работает с рождением материи, с ее смертью и фундаментальной природой современной Вселенной. Что еще мы можем желать от простой физической теории?

На пути к объединенной теории поля

Большинство физиков обладают непоколебимой верой в основную простоту природы — это один из самых эффективных руководящих принципов. Много раз, снова и снова, эта слепая вера оправдывала себя. Многие эксцентричные явления природы получили объяснение. Что может быть более различным, чем магнетизм, электричество и свет? И тем не менее, в девятнадцатом веке Джеймс Клерк Максвелл показал, что все это лишь различные проявления одних и тех же фундаментальных законов. Все эти проявления, равно как и радиоволны, радиолокатор и лучистое тепло, он описал с помощью уникальной и изящной системы уравнений. Электромагнетизм Максвелла — это действующая сила, которая управляет всем, что мы видим, слышим, обоняем, чувствуем или пробуем.

Так начался поиск объединенной теории всех сил, действию которых подвержена материя. Альберт Эйнштейн знал лишь две фундаментальные силы. Гравитация удерживает планеты на их орбитах вокруг Солнца, а нас — на Земле. Электромагнетизм удерживает электроны на их орбитах вокруг ядра атома, что позволяет атомам объединяться в молекулы и, в конечном итоге, объясняет, почему мы не проваливаемся сквозь землю. Эйнштейн попытался, но безуспешно, построить объединенную теорию двух этих сил. Одна из причин его неудачи состояла в том, что в действительности в небесах и на Земле сил больше, чем предполагала философия Эйнштейна.

Мы узнали, что для объяснения поведения атомного ядра необходимы еще две дополнительные силы. Эти маленькие и тяжелые ядра, находящиеся внутри атомов, образованы еще более мелкими составляющими, называемыми нейтронами и протонами. Все эти частицы на своих местах удерживает сильное ядерное взаимодействие, вследствие чего образуется ядро. При некоторой разновидности радиоактивности, бета-распаде, нейтрон внутри ядра испускает две частицы (электрон и антинейтрино) и превращается в протон. Этот процесс с помощью четвертой силы, лежащей в основе слабого ядерного взаимодействия, интерпретировал Энрико Ферми.

Воистину объединенная теория объяснила бы все четыре силы. Этот амбициозный проект еще не осуществлен. Пока что разрабатывается

объединенная теория сильных, слабых и электромагнитных сил: всех, за исключением гравитации. Эти три фундаментальные силы микромира описывает то, что физики называют калибровочной теорией, в которой основными являются частицы двух видов, называемые силовыми частицами и материальными частицами. Сложные физические явления проистекают из повторения первичного акта становления — испускания или поглощения силовой частицы материальной. Например, одна материальная частица может испустить силовую, которая затем поглощается второй материальной частицей. В результате этого обмена между двумя материальными частицами создается сила.

Фотоны — это силовые частицы, переносящие электромагнитное взаимодействие. Сила, действующая между электроном и его ядром, создается при обмене фотонами. Фотоны — наблюдаемые частицы: мы их видим постоянно как свет.

Силовые частицы, отвечающие за слабые взаимодействия, известны как $W^{\pm}$ и Z^0. В отличие от фотона, это очень тяжелые частицы; они, согласно теории, почти в 100 раз тяжелее протона. Ни один из существующих ускорителей частиц недостаточно велик, чтобы создать такие частицы. Мы делаем вывод об их существовании косвенным путем. При столкновении нейтрино с нейтроном иногда происходит обмен W. Тогда нейтрино превращается в электрон, а нейтрон — в протон. Другой вариант этого же механизма приводит к хорошо изученному процессу ядерного бета-распада. Z^0-частица переносит класс слабых явлений, которые впервые наблюдались европейской коллаборацией в CERN в 1973 году. Частично объединенная теория слабых и электромагнитных взаимодействий, сформулированная в шестидесятые годы двадцатого века, успешно предсказала существование нейтральных токов и заслужила Нобелевскую премию по физике в 1979 году для Абдуса Салама, Стивена Вайнберга и автора. Конечной проверкой теории электрослабых взаимодействий будет создание и наблюдение Z^0-частицы в лаборатории. Ускорители, с помощью которых этого можно будет добиться, сейчас строятся в Европе, Соединенных Штатах и Советском Союзе. Коллайдер, находящийся в CERN (Женева, Швейцария), стал первой из этих великих новых машин, которые еще предстоит построить.

Считается, что сильные взаимодействия переносит третий класс частиц, называемых *глюонами*. Они во многом похожи на фотоны, но имеют два коренных отличия: существует восемь различных видов глюонов, но всего один вид фотона. Более того, сильное взаимодействие (как и предполагает его название) гораздо сильнее электромагнитного. Вследствие этого глюоны постоянно удерживаются внутри ядерных частиц. Вы можете создать фотонную вспышку, но никогда не сможете добиться глюонной.

Таким образом, существует 12 различных видов силовых частиц: восемь глюонов, один фотон, $W^{\pm}$ и Z^0. Мы также должны знать, что представляют собой различные виды материальных частиц. Некоторые из них вовлечены в сильные взаимодействия. Они могут испускать и поглощать глюоны. Эти материальные частицы называются кварками. Материальные частицы, не подверженные сильным взаимодействиям, называются лептонами.

Сегодня физики считают, что в природе существует шесть различных типов кварков. Два из них, называемые u- и d-кварками, являются элементарными составляющими атомных ядер. Протоны и нейтроны, образующие ядра, в действительности не являются элементарными частицами. Они состоят из кварков. Протон образован двумя u-кварками и одним d-кварком, которые удерживаются на своих местах глюонами, а нейтрон содержит два d-кварка и один u-кварк. Следовательно, кварки переносят электрический заряд Q, являющийся дробной частью заряда протона. Для u-кварков $Q = 2/3$, а для d-кварков $Q = -1/3$.

Оставшиеся типы кварков не входят в ядерную материю. Они гораздо тяжелее u- и d-кварков и, благодаря слабым взаимодействиям, распадаются на более легкие кварки. Странные частицы, то есть частицы, содержащие странные кварки, изучались с пятидесятых годов двадцатого века. Их время жизни составляет порядка 10^{-10} секунд. В семидесятых годах того же века открыли очарованные частицы. Это частицы, содержащие очарованные кварки. Будучи гораздо тяжелее странных частиц, очарованные частицы и живут гораздо меньше. Хитроумные эксперименты, проведенные в CERN, главным образом, итальянской коллаборацией экспериментаторов, в 1979 году показали, что очарованные частицы живут около 10^{-13} секунд.

В 1977 году американская коллаборация в ходе эксперимента, проведенного в Лаборатории им. Ферми, открыла новую частицу, названную *ипсилоном*. Сейчас мы знаем, что она содержит пятый тип кварка, так называемый b-кварк (bottom-кварк). Уже было открыто более дюжины частиц, содержащих один или два b-кварка.

Из пяти известных типов кварков два (u и c) имеют электрический заряд $Q = 2/3$, а три других (d, s и b) имеют электрический заряд $Q = -1/3$. Теоретические аргументы предполагают существование равного количества кварков с зарядом $Q = 2/3$ и $Q = -1/3$. Поэтому ожидается существование шестого кварка с $Q = 2/3$, и называют его t-кварком (top-кварком). В международном состязании европейские и американские экспериментаторы активно ищут свидетельства существования t-кварка, который может оказаться последним из кварков.

Лептоны — материальные частицы, не подверженные сильным взаимодействиям. Самым знакомым лептоном является электрон, который

был открыт в 1895 году. Он имеет электрический заряд $Q = -1$, численно равный заряду протона, но противоположный по знаку. Известны два тяжелых кузена электрона с зарядом $Q = -1$. Мюон весит примерно в 206 раз больше электрона и впервые наблюдался в 1938 году. Тау-лептон весит примерно в 17 раз больше мюона и был открыт в Стэнфорде (Калифорния) в 1976 году.

Каждый из этих заряженных лептонов связан со своим собственным незаряженным $Q = 0$ лептоном, называемым нейтрино. Нейтрино всегда считались безмассовыми частицами, но последние эксперименты и астрофизические наблюдения указывают на то, что они имеют массу. На самом деле, во Вселенной так много нейтрино, что все вместе они могут объяснить большую часть ее массы, даже несмотря на то, что отдельное нейтрино весит чрезвычайно мало.

Зачем же нужны три семейства частиц, если вполне респектабельный вариант Вселенной (как кажется) мог бы быть создан с помощью всего лишь одного из них? Существует ли еще и четвертое семейство, которое ждет своего открытия при более высоких энергиях? Это вопросы, на которые мы не можем ответить. Почему кварки и лептоны объединяются в семейства? Ответ на этот вопрос может быть получен в рамках теории великого объединения. Два различных типа материальных частиц переплетаются друг с другом очень запутанным образом, так что периодическая таблица кварков и лептонов нам практически навязана силой.

В рамках теории великого объединения можно будет получить ответы на многие другие сложнейшие вопросы физики частиц:

1. Сильные, слабые и электродинамические взаимодействия кажутся воплощениями одной и той же фундаментальной математической системы. Так ли это?
2. Почему фотон не имеет массы? Именно так должно быть согласно теории великого объединения.
3. Почему сильные взаимодействия настолько сильнее электромагнитных?
4. Почему нейтрино электрически нейтральны и почти не имеют массы?
5. Почему электрический заряд протона численно равен заряду электрона?
6. Почему материя стабильна? Ответ: она нестабильна.
7. Как зародилась материя в нашей Вселенной?

Несколько лет назад мы бы даже не осмелились задать столь сложные вопросы. Ясно, что физики преодолели длинный путь за короткое время. Когда-то Эддингтон предсказал, что настанет время, когда физика (подобно химии) станет законченной, а потому неинтересной. Это время еще не настало, но, быть может, оно совсем близко.

Запутавшийся в суперструнах (с Беном Бова)

От величайших чудес в небесах до самых крошечных загадок элементарных частиц наука, в своих разнообразных дисциплинах, стремится объяснить все природные явления. Космологи работают с самыми большими вопросами: рождением Вселенной, а также происхождением и развитием миллиардов галактик. Астрономы спускаются по космической лестнице к столь малым объектам, как наша Солнечная система. Геологи занимаются всеми закоулками и щелочками нашей планеты, а биологи изучают те земные создания, которые ползают, бегают, плавают, летают и заражают друг друга: от крошечных вирусов до громадных китов, на которых они нападают. Затем идут химики и большинство физиков, работа которых — объяснять объемные свойства материи через крошечные атомы, образующие все, что есть на Земле. Они расскажут вам, почему медь красная, а небо голубое, как горит свеча и из чего образуется роса.

Еще более маленький мир, находящийся внутри атома, привлекает внимание двух различных групп физиков, которые работают во все более маленьких областях. Во-первых, это физики-ядерщики, изучающие центральное ядро атома — ключ к ядерному оружию и ядерной энергии, а также к чудесной ядерной печи, которую мы называем Солнцем. Кроме них существуют еще и физики, занимающиеся элементарными частицами. Они изучают составляющие атомного ядра: нейтроны и протоны, а также все прочие частицы, которые когда-то считались элементарными, но сейчас мы знаем, что они состоят из кварков, — а также силы, управляющие взаимодействиями различных частиц: электромагнитными, сильными и слабыми ядерными взаимодействиями. С помощью самых мощных из используемых сегодня ускорителей, в которых частицы сталкиваются с силой в два триллиона электрон-вольт, можно генерировать частицы типа W и Z, которые в сто *миллионов* раз меньше атома.

Физики-теоретики думают о существовании еще более маленьких объектов, настолько маленьких, что ни один ускоритель, который мы можем себе представить, не сможет их обнаружить. Различные теории великого объединения рассматривают три силы, действующие между частицами, как разновидности одной и той же простой силы — силы, про-

явления которой можно различить только в очень маленьком масштабе, потому что она зависит от существования очень тяжелых и невероятно крошечных новых частиц, которые в *триллион* раз меньше чем W- и Z-частицы.

На расстояниях, еще в 100 000 раз меньших, порядка 10^{-33} см, мы наконец-то достигаем естественной конечной точки. Здесь господствующей силой становится квантовая гравитация (гравитация, которая, по мнению физиков, должна существовать в субатомном мире, но не может быть обнаружена), а единой теории, которая бы ее описывала, не существует. На данный момент, эта длина Планка определяет самую нижнюю ступеньку космической лестницы. Допустим, что каждая ступенька соответствует увеличению размера в 10 раз, тогда наша лестница насчитывает 52 ступеньки через мир дюймов и футов от длины Планка до размера всей видимой Вселенной.

На протяжении большей части лестницы ученые достаточно хорошо знают, что они делают и к чему стремятся. Химики, например, согласны с тем, что их дисциплина закрыта в том смысле, что все ее основные принципы известны. Это не значит, что в ней не осталось сложных проблем, которые еще ждут своего решения, и не осталось открытий, которые еще предстоит сделать; просто основные правила этой науки установлены: атомы взаимодействуют друг с другом по законам квантовой механики — законам, справедливость которых уже неразумно подвергать сомнениям.

Совершенно фантастические вещи происходят на противоположных концах нашей космической лестницы. Космология и физика частиц — вот открытые дисциплины; здесь мы действительно не знаем всех правил игры. Как и почему Вселенная эволюционировала именно в такое состояние, в каком она сейчас находится, и как она будет вести себя в отдаленном будущем? Будет ли она и дальше непрерывно расширяться и бесконечно остывать (большое охлаждение) или однажды она изменит направление, сожмется и, в конечном итоге, взорвется (большое сжатие)?

Точно такая же история и на другом конце лестницы. Так называемая *стандартная теория физики частиц* описывает 17 известных частиц и их поведение. Это частицы двух видов: фермионы, или материальные частицы (включающие фотоны, нейтроны, электроны и различные кварки), и бозоны (фотоны, глюоны, а также W- и Z-частицы), переносящие электромагнитные, сильные и слабые взаимодействия между фермионами. Но действительно ли это самые элементарные виды материи? Не существует экспериментальных данных, которые противоречили бы стандартной теории, как не существует и данных, которые указывали бы на существование хоть какой-то структуры, лежащей вне области, на

которую она распространяется. И все же стандартная теория не в состоянии ответить на самые острые вопросы, важнейший из которых касается того, каким образом на самой нижней ступеньке космической лестницы работает квантовая гравитация. Таким образом, физика элементарных частиц либо подошла к любопытному перекрестку, либо зашла в тупик, выхода из которого нет.

Гравитация является доминирующей силой на более высоких ступеньках космической лестницы, где ее слабость компенсируется одним только количеством атомов, дружно проявляющим этим силу. Она связывает звезды в галактики и сохраняет Солнце в целости, а его семейство планет удерживает на их орбитах. Она не отпускает Луну от Земли и удерживает на своих местах океаны и атмосферу.

Но когда дело доходит до объектов, размер которых достигает нескольких километров, гравитационная сила должна уступить место электромагнитной. Гравитация пытается, но не может остановить рост дерева или образование горы. Каждый раз, когда мы просыпаемся утром, каждый раз, когда весной расцветает цветок, проявляется превосходство электромагнитной силы. Ее величие простирается от объектов размером с материк до слонов, микробов и составляющих их атомов.

Спускаясь по космической лестнице, электромагнитное взаимодействие сменяется сильным. В своей узко ограниченной области это взаимодействие всесильно; оно удерживает вместе протоны и нейтроны, образуя атомные ядра, в противовес электромагнитной силе, которая тут же разделила бы эти ядра. Кварки, составляющие протоны и нейтроны, также связаны сильным взаимодействием. Но всего лишь через четыре ступеньки сильное взаимодействие уступает место слабому, в результате которого частицы и ядра переживают самопроизвольный распад, испуская энергию.

Мы достигли той ступеньки лестницы, которая соответствует самым высокоэнергетическим ускорителям, имеющимся в нашем распоряжении, а до длины Планка осталось еще 17 ступенек. Наше знание физики этой области достаточно скудно и состоит, главным образом, из гипотез. Из-за потрясающе успешного объяснения стандартной теорией всех субатомных взаимодействий, которые мы в состоянии обнаружить, и из-за отсутствия в последние годы удивительных новых открытий некоторые теоретики полагают, что там вообще не происходит ничего особо интересного. Если верить этой философии отчаяния, то нас уже не ожидают никакие сюрпризы: мы не увидим ни интересных частиц, ни новых сил, ни любопытных явлений. Неужели мы действительно вступили в огромную пустыню, которая простирается от энергий в два триллиона электрон-вольт до самой длины Планка, а возможно, и дальше?

Я в этом сомневаюсь. Несколько песчинок еще не означают пустыню, но пессимистическая философия может превратить эту пустыню в самореализующееся пророчество. К счастью для науки, скоро завершится строительство нескольких ускорителей, и мы сами сможем увидеть, оказались ли мы перед Сахарой или на берегу не отмеченного на карте океана.

В конце концов, мы должны взглянуть на физику нижних ступенек лестницы, где особую важность приобретает квантовая гравитация, даже несмотря на то, что мы не можем построить ускорители, достаточно мощные, чтобы исследовать эту область. Вселенная является — или, точнее, являлась в момент своего рождения, 15 миллиардов лет назад, — самым мощным из возможных ускорителей. Быть может, если ученые окажутся достаточно проницательными, невидимые останки Большого взрыва, которые, скорее всего, окружают нас повсюду, станут ключом к физике ультравысоких энергий.

Однако многие из лучших и блестящих молодых физиков выбрали другой, чисто теоретический, подход к пониманию материи — подход, в основе которого нет экспериментов и построения которого никогда не демонстрировались. *Суперструны* — так называется их игра, синтез нескольких наиболее эксцентричных идей, которые когда-либо выдвигались. Согласно этой новой религии пространство имеет девять измерений, а не только те три, которые мы видим. Шесть измерений скручены в крошечный шарик, радиусом которого является длина Планка, а потому они слишком малы, чтобы их мог увидеть наш огромный и неуклюжий вид. Теория суперструн определяет частицы не как точечные структуры, а как крошечные петли, образованные струной. Существует всего один тип струны, а колебания петли в девятимерном пространстве определяют, действует ли она как кварк, как фотон или как еще какая-то частица.

Популярная литература кишит радужными статьями о суперструнах и последующей Теории Всего. Ее сторонников объявляют новыми последователями Эйнштейна, и все физики, работающие со струнами, убеждены, что они стоят на грани окончательного прорыва — полного понимания природы физической вселенной. Так с чем же связана вся эта шумиха?

Суперструны впервые якобы предоставляют нам теорию квантовой гравитации, и за это я готов их наградить. Более того, теория суперструн кажется уникальной или почти уникальной в том, что она не нуждается в измерении. В принципе, массу электрона, массу протона, силу электромагнитного взаимодействия и все другие измеряемые характеристики материи можно вычислить из теории, не прибегая к эксперименту. При

этом ожидается, что правила, которым подчиняются частицы и силы, образующие стандартную теорию — наше успешное описание мира низких энергий, — будут логически выведены из теории суперструн как необходимые следствия.

Но физики, работающие с суперструнами, еще не показали, что их теория действительно работает. Они не могут продемонстрировать, что стандартная теория является логическим следствием теории суперструн. Они даже не могут быть уверены, что их формализм включает описание таких вещей, как протоны и электроны. И они пока не сделали ни одного, пусть даже крошечного, экспериментального предсказания. Но что хуже всего — теория суперструн не является хотя бы логическим следствием некоторого привлекательного набора гипотез о природе. Почему, можете спросить вы, эти теоретики настаивают на девятимерности пространства? Просто потому что в любом другом пространстве теория струн не имеет смысла.

Зарыт ли в конце этого пути клад или нас ожидает только лишь трясина еще более невразумительной математики? Даже самые амбициозные защитники струн полагают, что пройдут еще десятки лет, прежде чем мы узнаем достаточно, чтобы суметь сделать хоть какие-то экспериментальные предсказания. А тем временем, была утрачена историческая связь экспериментальной и теоретической физики. Пока люди, занимающиеся струнами, не могут интерпретировать воспринимаемые нами свойства реального мира, они просто не занимаются физикой. Сто́ит ли университетам оплачивать их работу и позволять разлагать впечатлительных студентов? Найдут ли работу молодые доктора философии, чья область деятельности ограничивается лишь теорией суперструн, если и когда эти струны лопнут? Быть может, все эти мысли о струнах больше подойдут к математическим факультетам, или даже богословским школам, чем к факультетам физики? Сколько ангелов может танцевать на булавочной головке? Сколько измерений в компактифицируемом многообразии, которое в 10^{30} раз меньше булавочной головки?

Последний значительный экспериментальный сюрприз в физике частиц — открытие третьего семейства частиц — был преподнесен во время празднования двухсотлетия США. В Калифорнии был найден тау-лептон, а в Иллинойсе показался bottom- или «beauty»-кварк. Прошло более десяти лет. В Санта-Монике прошла конференция, названная «Четвертое семейство кварков и лептонов», хотя у нас не так уж много экспериментальных свидетельств и не столь сильна теоретическая мотивация, чтобы предполагать существование более чем трех семейств таких частиц. Специалисты по физике частиц настолько отчаялись найти хоть что-то, что можно было бы обсудить, что начали играть в игру «Представим, что...».

История на нашей стороне. Каждые несколько лет в физике или в космологии происходило грандиозное открытие; со времен Ньютона их было более сотни. Может ли кто-то действительно поверить, что природа истощила запас своих хитростей? Конечно же нет.

Великое объединение и будущее физики

Теорию великого объединения придумали в 1974 году. В ней все силы микромира описываются одной объединенной системой уравнений. В этой схеме всего кварки и лептоны представляются равными партнерами. Объясняется даже рождение и смерть материи.

Сначала никто не поверил в эту теорию просто потому, что ее предсказание расходилось с экспериментальными данными. Наблюдаемый параметр (слабый угол смешивания), согласно теории, должен был быть равен 27 градусов, а его практическое значение равнялось 38. Однако более тщательные эксперименты показали ошибочность предшествующих. Сегодня экспериментальный результат практически точно согласуется с предсказанием теории великого объединения. Мораль ясна: когда теория настолько изящна и настолько красива, что *должна* быть истинной, она непременно таковой и *будет*.

Силовые частицы, связанные с электромагнитным, слабым и сильным взаимодействиями, весьма различны, как показано в таблице 1.

Таблица 1. **Силовые частицы**

Тип взаимодействия	*Количество переносчиков*	*Масса силовой частицы*	*Можно ли их отделить?*
Электромагнитное	1	Безмассовая	Да
Слабое	3	Тяжелая	Да
Сильное	8	Безмассовая	Нет

Каким образом столь разные понятия можно совместить в единой объединенной теории? К этому сложному вопросу можно подойти с помощью аналогий.

Рассмотрим парадокс, создаваемый магнитом, имеющим оба полюса: северный и южный. Два конца магнита очень отличаются друг от друга, и все же законы физики совершенно симметричны и не отличают

одной стороны магнита от другой. Однако если магнит нагреть в печи, он утратит свои магнитные свойства. Таким образом восстанавливается основная симметрия природы и два конца магнита становятся идентичны. В качестве другого примера рассмотрим водяной пар. Он изотропен, однороден, невидим и, в принципе, лишен красоты. В нем невозможно выделить направления: он проявляет симметрию наших законов физики. Остудите его, и симметрия разрушится. Возникнет симметрия меньшего порядка, но более сложной структуры: появится снежинка. Магниты и снежинки — это проявления распространенного физического явления: нарушения симметрии.

Итак, оказывается, что симметрия нашей теории великого объединения проявляется только при очень высоких температурах — температурах настолько высоких, что их невозможно достигнуть ни в лаборатории, ни даже во взрывающейся звезде. Всего лишь однажды в истории нашей Вселенной симметрии теории великого объединения реализовались в явном виде: в момент ее рождения, в первичном Большом взрыве. Поразительное разнообразие явлений природы — сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия, кварки и лептоны появляются подобно снежинкам в холодной и кристаллической Вселенной, которую мы населяем сейчас.

Наша теория, объединяющая сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия, основана на малопонятном разделе абстрактной математики — теории групп Ли. Классификацию этих структур разработали в девятнадцатом веке норвежский математик Софус Ли и французский математик Эли Картан. Они показали, что обширный класс групп Ли можно выразить с помощью более фундаментальных структур, называемых простыми группами Ли. Поиск теории великого объединения — это поиск простой группы Ли, содержащей описание известных силовых частиц (фотонов, $W^{\pm}$-частиц, Z^0-частицы и глюонов) и известных материальных частиц (кварков и лептонов). Если наша периодическая таблица материальных частиц правильна, в том смысле, что в ней нет пропущенных колонок, тогда выбор простой группы Ли однозначен. Наша теория великого объединения должна быть основана на группе, известной как A_4 или $SU(5)$.

Сильное, слабое и электромагнитное взаимодействие переносят 12 силовых частиц. Однако группа $SU(5)$ содержит 24 такие частицы. Теории великого объединения предполагают обязательное существование новой разновидности взаимодействия, переносимого двенадцатью дополнительными силовыми частицами. Реакции, переносимые этой новой силой, еще не были обнаружены. Они отвечают за конечный распад всей материи. Новые взаимодействия очень слабы, поэтому материя живет долго. Бриллианты могут оказаться не вечными, но они близки к вечно-

сти. В тонне материи каждые десять лет должна распадаться всего одна ядерная частица. Тем не менее, искать этот процесс можно. В глубокой шахте, защищенной от проникновения космических лучей, можно искать случайный распад протона или нейтрона. Такие эксперименты проводятся в горных пещерах между Францией и Италией, в итальянских золотоносных шахтах и в американских шахтах. Центральное предсказание теории великого объединения — радиоактивность всей материи — очень скоро будет подвергнуто решающей проверке. Совсем скоро мы узнаем, «вечны ли бриллианты».

Однако великое объединение не только предсказывает конечный распад всей осязаемой материи, оно также помогает объяснить, каким образом в очень молодой и горячей Вселенной могла образоваться материя. Примерный сценарий рождения материи в 1967 году описал Андрей Сахаров, который является, быть может, величайшим из ныне живущих советских физиков[1]. Он утверждал, что для создания материи были необходимы три вещи. Во-первых, должен был произойти Большой взрыв — громадный взрыв, отмечающий начало времени. Сейчас эта теория полностью принята в нашей стандартной научной космологии. Во-вторых, силы природы должны были определить стрелу времени. Ее существование было установлено в процессе экспериментальной работы Фитча и Кронина, которые за свой эпохальный труд в 1980 году были удостоены Нобелевской премии. Наконец, было необходимо еще и существование механизма распада материи — ингредиента, представляемого теорией великого объединения. Последние теоретические разработки показали, что видение рождения материи Сахаровым имеет смысл и в рамках нового синтеза.

Теория великого объединения решает несколько головоломок в физике частиц. Она объясняет, почему в природе существуют кварки и лептоны и почему они объединяются в семейства. Структура периодической таблицы кварков и лептонов просто-таки навязывается нам. Почему электрический заряд протона численно точно равен заряду электрона, но имеет противоположный знак? Для теории великого объединения это не есть ни тайна, ни совпадение; именно так и должны обстоять дела. Почему фотон не имеет массы? Теория, не являющаяся объединенной, этого не требует, а в теории великого объединения — это необходимый постулат. Почему сильные взаимодействия настолько сильнее электромагнитных? В объединенной теории при очень высоких температурах эти взаимодействия имеют равную силу. В холодной Вселенной, которую мы населяем, они расходятся. И опять, наша теория успешна в том, что вещи *должны быть* такими, какими мы их видим.

[1]В момент написания данного эссе Андрей Сахаров был еще жив. — *Прим. пер.*

Однако каким бы привлекательным ни казалось великое объединение, его необходимо подвергнуть точной экспериментальной проверке. Необходимо проверить три ключевых предсказания. Первая проверка связана со структурой слабых нейтральных токов. Великое объединение требует, чтобы некоторый наблюдаемый параметр (называемый «слабым углом смешивания») принимал определенное численное значение. Данные, которыми мы располагаем сейчас, согласуются с предсказанием в пределах 10 процентов. Для проверки этой теории нужны лучшие данные. Вторая проверка касается предсказания распада протона. Протон должен не просто распадаться по истечении предсказанного времени жизни, он должен распадаться именно так, как это предсказывает теория. Чтобы проверить эти предсказания, необходимо провести немало экспериментов.

Третья же проверка великого объединения несколько отличается от двух предыдущих. Специалисты по физике частиц уже привыкли к тому, что при достижении все более и более высоких энергий они открывают новые и очень интересные явления. Каждый новый ускоритель, почти без исключения, преподнес свою долю сюрпризов. Великое объединение предсказывает, что приближается последняя достижимая граница высоких энергий. Мы должны увидеть W- и Z-частицы. Нам нужно найти t-кварк. Необходимо изучить частицы, содержащие t- и b-кварки. Не полностью исключена и возможность того, что при более высоких энергиях будет обнаружено четвертое семейство кварков и лептонов. Помимо всех этих деталей, великое объединение требует отсутствия каких бы то ни было сюрпризов. Оно предсказывает существование при высоких энергиях «великой пустыни», которая будет представлять очень скудный интерес для изучения.

Некоторых физиков пугает перспектива исчезновения границы высоких энергий. Они утверждают, что следующее поколение ускорителей, несомненно, ожидают новые чудеса. Быть может, они правы, но если мы не построим более крупные ускорители (типа LEP — Великой европейской машины мечты), мы никогда этого не узнаем. С другой стороны, вопросы стоимости, энергопотребления и ограниченных ресурсов, видимо, говорят о том, что мы не можем вечно создавать все более крупные ускорители частиц. Быть может, в ближайшем будущем мы узнаем о мире высоких энергий все, что нам нужно о нем знать. Мы найдем все ключи, которые нам необходимы, чтобы создать единственную и истинную физическую теорию. Зарождающийся предел границы высоких энергий нужно считать триумфом, а не трагедией.

Ускорители были нашим главным инструментом в течение всего нескольких десятилетий. В действительности, многие великие открытия физики частиц не зависели от такой искусственной помощи. И я уверен,

что еще будут сделаны многие великие открытия, далекие от границы высоких энергий. Мы упоминали эксперименты по распаду протона, для которых ускоритель не нужен вообще, а нужны массивные подземные детекторы. Быть может, множество великих сюрпризов лежит прямо под нашими ногами. Другой дисциплиной, не требующей еще более крупных ускорителей, является изучение нейтрино. Эти призрачные частицы могут свободно проникать сквозь Землю. Их создают Солнце, космические лучи и ускорители: маленькие и большие. Имеют ли нейтрино массу? Изменяются ли они по мере движения? Лишь совсем недавно мы начали задавать эти важные вопросы. Наше давнее подозрение, что нейтрино могут составлять преобладающую форму материи во Вселенной, становится все сильнее и сильнее. *Нейтрино* определят, замкнута ли Вселенная. Обыкновенная материя, из которой состоим мы и наши звезды, может быть лишь второстепенным наполнителем Вселенной, состоящей главным образом из нейтрино.

Освободившись от своей одержимости высокими энергиями, мы можем вернуться к изучению обычной материи Вселенной. Последним видом осязаемой материи, обнаруженным на Земле, был элемент рений, открытый в 1923 году. Возможно, бок о бок с нами существуют и другие странные вещи. Экспериментаторы жадно искали изолированные кварки с дробным зарядом. Наша теория говорит, что подобный поиск обречен на провал. Однако теории могут ошибаться.

Вероятно, при недостижимых энергиях существует новый уровень интересной физики. Это может привести к существованию на Земле новых стабильных частиц. Одним из примеров таких частиц является «магнитный монополь». Все магниты, которые мы видели, имеют два полюса: северный и южный. Может ли существовать частица, имеющая только северный полюс, или эта концепция также бессмысленна, как кусок веревки, имеющий всего один конец? Магнитный монополь придумал английский физик Поль Дирак 50 лет назад. Пока его не удалось найти никому, но многие физики продолжают поиски.

Быть может, существуют сверхтяжелые атомы, которые весят в тысячи раз больше, чем следует. Частицы, подобные этим, никогда всерьез не искали. Однако в нашей физической теории нет ничего, что запрещало бы существование таких частиц. Если они действительно существуют, они могут оказаться чрезвычайно важными для технологии. Они могут стать необходимым ключом к созданию управляемого ядерного синтеза, который, в свою очередь, решит энергетический кризис. Они могут в определенной степени отвечать за работу механизма, питающего энергией Солнце, о котором, по нашему мнению, мы знаем гораздо больше, чем, возможно, это есть на самом деле. Это еще одно направ-

ление экспериментального исследования, лежащее далеко от границы высоких энергий.

Наконец, существует гравитация и поиск воистину великого синтеза. Галилей, Ньютон и Эйнштейн верили в фундаментальное единство всех небесных и земных явлений. Недостаточно иметь теорию микромира; теорию сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Великий синтез должен включать также и описание гравитации. Гравитация господствует в мире больших явлений — планет, звезд и галактик. Властвует она и среди самых маленьких явлений, на расстояниях порядка 10^{-33} см. Наша так называемая «теория великого объединения» несколько напоминает Священную Римскую Империю — она не Священная, не Римская, да и вообще не Империя. Она не может работать ни со слишком крупными, ни со слишком мелкими объектами. Это теория того, что находится «между ними». Величайшая проблема теоретической физики по-прежнему остается с нами.

Физик и общество

SSC: машина девяностых (с Леоном Ледерманом)

Очень часто в истории физики элементарных частиц высокая энергия становилась ключом к новым открытиям. В середине девятнадцатого столетия эксперименты, проводимые при энергии в несколько электронвольт, привели к открытию спектров излучения и поглощения и к осознанию того, что атом является структурированной системой. В начале двадцатого века рентгеновские эксперименты, проводимые при энергиях кэВ-диапазона, раскрыли внутреннее строение атома и в 1913 году привели Генри Мозли к концепции атомного номера. Развитие ядерной физики от открытия в 1911 году самого атомного ядра до зрелой современной ядерной науки началось с экспериментов при энергиях порядка МэВ сначала с использованием частиц, предоставляемых естественными радиоактивными источниками, а позднее небольшими узкоспециализированными машинами, типа ускорителей Ван де Граафа. Увеличение энергии еще в тысячу раз потребовалось для раскрытия тайн субъядерного мира. На бэватроне Калифорнийского университета в Беркли, работающем при кинетической энергии 2,7 ГэВ в системе центра масс, в 1955 году было впервые зарегистрировано рождение антипротонов. В 1977 году ипсилон-частица (свидетельство существования пятого кварка) была обнаружена в Лаборатории им. Ферми, где энергия в системе центра масс равнялась порядка 27, 5 ГэВ — в десять раз больше энергии, доступной всего поколение назад.

При подобных сравнениях доступной энергии более подходящим критерием является не энергия пучка частиц, а энергия в системе центра масс. Самая большая энергия пучка, которой мы в настоящее время располагаем, создается в Лаборатории им. Ферми на ускорителе, известном как Тэватрон II. В настоящее время на нем достигают энергий пучка, равных 800 ГэВ, но поскольку он действует в режиме неподвижной мишени, энергия, доступная в системе центра масс, равна всего лишь 40 ГэВ. С другой стороны, на европейском протон-антипротонном коллайдере в CERN энергия каждого пучка имеет порядок 300 ГэВ, поэтому на нем доступна энергия 600 ГэВ, что и позволило открыть в 1983 году W- и Z-частицы.

Однако не все великие открытия зависели от доступа к самым большим энергиям. J/ψ-частица (см. глоссарий), тау-лептон, ипсилон и голое очарование были открыты в США, когда пересекающиеся накопительные кольца в CERN по достигаемой на них энергии намного опережали наши ускорители. Умения, воображение, настойчивость и опыт — все это жизненно важные составляющие исследования; высокая интенсивность пучков тоже как нельзя кстати. Именно по этой причине физика неподвижной мишени является хорошим дополнением к коллайдерам. Однако физика частиц достигла той точки, когда даже старое доброе американское «ноу-хау» не может состязаться с более высокими энергиями, которые становятся доступными на коллайдерах. Коллайдер в CERN, подтвердив основные предсказания теории электрослабых взаимодействий, безусловно, заслужил Нобелевскую премию для европейских физиков, работающих с высокими энергиями, — первую за много лет. Но еще важнее то, что Европа показала направление исследования, необходимого для работы с открытыми вопросами, — это адронный коллайдер, оснащенный встроенными и очень сложными детекторами.

Развитие физики встречных пучков началось в Стэнфордском университете, в котором в 1963 году действовал электрон-электронный коллайдер. Затем во Фраскати, Орсее и Новосибирске появились электрон-позитронные коллайдеры. Пересекающиеся накопительные кольца в CERN — первый адрон-адронный коллайдер был запущен в эксплуатацию в 1971 году. Несколько электрон-позитронных колец действовали в Стэнфордском центре линейного ускорения частиц (SLAC), в Орсее, во Фраскати, в Новосибирске, в Гамбурге и в Корнеллском университете. Однако, учитывая наличие в CERN $p\bar{p}$-коллайдера, можно утверждать, что все поле исследований остается открытым для европейцев, пока в Лаборатории им. Ферми не начнет реально действовать Тэватрон I. В таблице 1 собраны уже существующий и еще планируемый список частиц, найденных на ускорителях.

Мы проделали долгий путь в поисках понимания, полученного из того, что сейчас является четырьмя поколениями послевоенных ускорителей. Мы идентифицировали шесть кварков, из которых состоят все адроны, то есть все частицы, участвующие в сильном взаимодействии. Мы располагаем свидетельствами существования шести лептонов. Мы частично объединили теорию электрослабых взаимодействий и весьма многообещающую теорию сильного (цветового) взаимодействия — квантовую хромодинамику. Полученные данные свидетельствуют в пользу идеи о том, что все силы описываются калибровочно-инвариантной квантовой теорией поля. Мы уже определили все соответствующие калибровочные бозоны, переносчики взаимодействий: фотон, $W^{\pm}$, Z^0 и глюоны.

Таблица 1. **Глоссарий жаргона физики высоких энергий**

J/ψ	Компромиссное название частицы, открытой одновременно в Брукхейвене (J) и в SLAC (ψ). Очень скоро эту частицу стали рассматривать как связанное состояние очарованного кварка и очарованного антикварка. Очарованный кварк был предложен в 1964 году Дж. Д. Бьеркеном и Глэшоу.
τ-лептон	Третий заряженный лептон (после электрона и мюона), открытый в SLAC в 1976 году.
Υ	Три близко расположенных состояния частицы, открытые в 1977 году Ледерманом и его соратниками в Лаборатории им. Ферми, очень скоро стали интерпретировать как связанные состояния нового кварка, b-кварка, и его антикварка. Вместе с τ-частицей это основало третье поколение кварков и лептонов.
Голое очарование	Поскольку J/ψ содержит очарование и антиочарование, внутренние свойства кварков являются скрытыми. Состояние, содержащее очарованный кварк вместе с, скажем, анти-u-кварком, раскрывает квантовые числа очарования и представляет голое очарование. (Υ — это аналогичная система, содержащая b-кварки.)
W, Z	Переносчики слабого взаимодействия, которые были открыты в CERN в 1983 году.

Все они образуют мощный синтез, называемый стандартной моделью (см. таблицу 2).

Не раз говорилось, что стандартная модель дает полное и правильное описание всех наблюдаемых явлений на Земле и, возможно, даже во Вселенной. Нечто подобное говорили и раньше: о Вселенной Роберта Бойля, напоминающей часовой механизм, о великом синтезе Исаака Ньютона и Джеймса Клерка Максвелла. Гораздо позднее, в 1947 году, Джордж Гамов писал:

Сегодня мы располагаем гораздо более здравыми причинами, чтобы считать, что наши элементарные частицы действительно являются основными единицами и не могут быть разделены далее. Тогда как якобы неделимые атомы проявляли очень и очень разнообразные и довольно сложные химические, оптические и прочие свойства, элементарные ча-

Таблица 2. **Адронные ускорители высоких энергий**

Машина	*Место нахождения*	*Тип*	*Энергия пучка* (ТэВ)	*Энергия в системе центра масс* (ТэВ)	*Статус*
SPS	CERN	Неподвижная мишень	0,4	0,03	Действующий
Тэватрон II	Лаб. им. Ферми	Неподвижная мишень	0,8	0,04	Действующий
ISR	CERN	pp-коллайдер	0,03	0,06	Остановлен
СВА (Isabelle)	BNL	pp-коллайдер	0,4	0,8	Аннулирован
$Sp\bar{p}S$	CERN	pp-коллайдер	0,32	0,64	Действующий (1984/5)
Тэватрон I	Лаб. им. Ферми	$p\bar{p}$-коллайдер	$\geq 0,9$	$\geq 1,8$	1986
Посвященный коллайдер	Лаб. им. Ферми	$p\bar{p}$-коллайдер	3,0	6,0	Не рекомендован
УНК	СССР	$p\bar{p}$-коллайдер	20,0	40,0	1993?
SSC	Техас	$p\bar{p}$-коллайдер			Наша мечта

стицы современной физики обладают чрезвычайно простыми свойствами; в действительности, по своей простоте, их даже можно сравнить со свойствами геометрических точек. Кроме того, вместо достаточно большого количества «неделимых атомов» классической физики, сейчас в нашем распоряжении остались всего три существенно различные категории: нуклоны, электроны и нейтрино. И несмотря на сильнейшее желание и стремление свести все к самой простейшей его форме, все невозможно свести к ничему. Таким образом, мы, судя по всему, действительно достигли цели своих поисков основных элементов, составляющих материю.

Подобная надменность никогда не была долговечной. В 1947 году были найдены пионы, затем обнаружились странные частицы, а шестидесятые годы стали свидетелями демографического взрыва новых «элементарных частиц».

Стандартная модель действительно объясняет многое. Тем не менее, она пока не является истинной теорией, главным образом потому, что не удовлетворяет наивной вере физика в элегантность и простоту. Она содержит порядка 17 якобы элементарных частиц и точно такое же количество произвольных параметров, типа постоянной тонкой структуры, отношения масс мюона и электрона и различных таинственных углов смешивания (Каббибо, Вайнберга, Кобаяши – Маскавы). Уж конечно, Бог не крутил 17 раз телефонный диск на своем черном ящике перед Большим взрывом и его славным сиквелом — человечеством. Наша современная теория незаконченна, недостаточна и неэлегантна, хотя вполне возможно, что ее долго будут помнить как важный поворотный момент. Она останется в анналах истории, независимо от того, что сделаем мы, оказавшись на пороге глобального синтеза: повернем назад или продолжим двигаться вперед. Выбор предстоит сделать нам, и он может быть воплощен в по-прежнему гипотетическом Сверхпроводящем суперколлайдере (SSC).

В июле 1983 года Консультативная Группа по физике высоких энергий Департамента Энергетики рекомендовала, чтобы строительству SSC был отдан наивысший приоритет. Рекомендованная энергия на один пучок этого ускорителя равна 20 ТэВ, или 20 000 ГэВ, — это макроскопическая энергия порядка 32 эрг-секунд на каждый протон в пучке. В результате этого прямые столкновения протонов с протонами обеспечат в системе центра масс энергию порядка 40 ТэВ, что более чем в 60 раз превысит энергию, доступную в современном коллайдере в CERN, и в 20 раз — энергию, которая станет доступной в ближайшем будущем в Национальной лаборатории ускорения частиц им. Ферми. Более того, комиссия настоятельно рекомендовала, чтобы эта установка была завершена и отдана в распоряжение исследователей в течение не более чем десяти лет. Важность именно этой рекомендации была подчеркнута параллельными решениями отказаться от всех остальных предложений ускорителей высоких энергий. Сюда вошли ускоритель на встречных пучках, значительные усилия в создание которого были вложены Брукхейвенской национальной лабораторией, и Посвященный коллайдер, предложенное расширение комплекса Лаборатории им. Ферми.

На необходимость гигантского шага в создании ускорителей указывают несколько аргументов. Теоретики и экспериментаторы сошлись на

параметре огромной важности — энергии в системе центра масс, равной 40 ТэВ. Консультативная группа по физике высоких энергий, после длительных и жарких споров, приняла это значение и рекомендовала именно SSC из всех предложенных вариантов. Практически все теоретики согласны с тем, что на SSC непременно должны возникнуть новые явления, которые можно будет учесть; возможно, это такие явления, которые на коллайдерах в CERN или Лаборатории им. Ферми едва различимы и заметны только лишь как смутные тени. Действительно, экспериментаторы, которым посчастливилось работать на коллайдере в CERN, уже докладывали о множестве редких «моноджетов» — любопытных событий, которые кажутся необъяснимыми в рамках стандартной модели. Через крошечное окошечко мы, возможно, видим новые, сбивающие с толку явления, для объяснения которых вполне может понадобиться SSC. Но, кроме аргументов эксперимента и теории, существует еще и история: большой скачок вперед в физике всегда происходит при каждом значительном повышении энергии; мы планируем, что в девяностые годы новое действие произойдет в физике энергий, измеряемых мульти-ТэВ.

Основные параметры SSC, энергия центра масс, равная 40 ТэВ, и «... интенсивность пучков до 10^{33} частиц/см^2» определены научными целями. Возможности и неполнота стандартной модели указывают область энергий, где данные должны разрешить дилеммы, препятствующие прогрессу в физике частиц. Целью здесь является «масштаб массы в 1 ТэВ». Это означает, что столкновения должны без особых трудностей исследовать такой масштаб массы — например, рождая предполагаемую новую частицу с массой в несколько ТэВ. Однако сталкивающиеся протоны — это сложные объекты, образованные кварками и глюонами, поэтому более подходящими можно считать жесткие столкновения точечных составляющих. Стандартная модель определяет движения составляющих, которые разделяют импульс сталкивающихся протонов. Общие эффекты известны очень подробно, а их описание можно найти в статье, опубликованной в *Reviews of Modern Physics*, где в общих чертах представлены сечения ожидаемых процессов новой физики[1]. Из-за разделения импульса энергию протонов нужно делить примерно на 10, поэтому протоны с энергией порядка 40 ТэВ позволят исследовать диапазон масс вплоть до 2–4 Тэв.

Интенсивность пучков — это мера количества столкновений определенного типа, которые происходят за секунду. После очень большого количества семинаров и дискуссий (а также работ типа статьи Эстии Эйштена и его соратников) ученые пришли к некоторому консенсусу:

[1]E. Eichten, I. Hinchliffe, K. Lone, C. Quigg, Vol. 56, p. 579, 1924

энергия в 40 ТэВ и интенсивность пучков в 10^{39} см$^{-2}$ сделают возможным тщательное исследование диапазона масс в 1 ТэВ.

А что же мы ищем? Мы можем перечислить все конкретные проблемы, хоть какое-то решение которых мы стремимся найти, но мы должны признать урок, который преподала нам история: чаще всего прочего нашим уделом были сюрпризы.

Да, мы верим, что объединенная теория сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий должна быть правильной, но ее подтверждение и разработка деталей требуют наличия данных, которые помогли бы дать те ответы, которыми мы сейчас не располагаем.

Главная наша проблема связана с симметрией триумфальной теории электрослабых взаимодействий, а именно с тем, что данная симметрия нарушается, и, в частности, с тем, что W- и Z-частицы имеют большую массу, тогда как тот же самый фотон имеет нулевую массу. Для решения этой проблемы был постулирован «бозон Хиггса» — частица, масса и свойства взаимодействия которой не определяются симметрией. Именно изучение этого решения в отношении проблемы масс указывает на масштаб в 1 ТэВ, ниже которого должны показаться какие-то новые явления, должна появиться новая физика. Эта проблема носит более общий характер: честно говоря, в действительности, мы не понимаем, откуда же вообще взялись массы всех основных частиц. Они представляют собой всего лишь параметры стандартной модели, так что мы опять пришли к задаче, содержащей 17 параметров. Масштаб массы в 1 ТэВ появляется из-за тесной связи этих параметров с электрослабой симметрией — так называемым *сектором Хиггса*.

Быть может, мы ошиблись, когда допустили, что кварки и лептоны действительно первичны. Вероятно, они состоят из еще более основных «прекварков». Если это так, тогда должна существовать новая сила, и объединение не будет полным, пока мы ее не поймем. Важные исследования точечной природы электронов, мюонов и кварков должны проводиться, по крайней мере, в масштабе 1 ТэВ, как и предлагает наша успешная стандартная модель. Здесь можно также добавить, что мы не понимаем, зачем нужны две «фотокопии» первого поколения (u, d, e, ν_e), и не знаем, существуют ли еще и другие поколения.

Симметрия всегда была маячком для нашего мировоззрения, и все же в слабых взаимодействиях присутствует нарушение CP-инвариантности, которое давно заботит нас. Здесь опять-таки присутствует некоторая связь с бозоном Хиггса, а значит, и с масштабом в 1 ТэВ.

Чтобы получить возможность обратиться к этим и другим проблемам, было написано огромное количество теоретических работ, в которых делались попытки расширить стандартную модель. Вводилось множество новых концепций с ключевыми словами типа «техницвет», «ги-

перцвет» или «суперсимметрия». Однако эти зачастую изящные идеи не обременены никакими экспериментальными фактами. SSC нужен, чтобы найти данные, которые направят физику к истинному пониманию.

Наконец, следует отметить глубокую новизну, появившуюся в состоянии физики частиц в эпоху SSC, а именно: новое объединение этого предмета с космологией и данные, предоставленные величайшим небесным ускорителем, ранней Вселенной. Машина, создающая энергию в 40 ТэВ, позволит нам изучать материю в состоянии эквивалентном тому, в котором она находилась спустя 10^{-16} секунд после Большого взрыва; полученные при этом данные могут оказаться чрезвычайно важными для понимания того, как мы все сюда попали.

Быть может, мы убедили вас, что «пустыня» — не содержащая новой физики область высокой энергии, превышающей массу W-частицы, — это мираж. Быть может, вы допустите, что с помощью SSC могут быть сделаны поразительные новые открытия. Но вы можете и не согласиться с этим. Вы можете сказать: физика частиц перестала быть «относящейся к делу». Стандартная модель — это все, что мы знаем, и все, что нам *нужно* знать для создания технологии, да и для всей науки, кроме разве что космологии, да и самой физики элементарных частиц. Наша дисциплина, продолжает критик, судя по всему, погрузилась в себя и больше не относится к остальной части научных стремлений человечества. Это своего рода искусство, которое творится ради самого искусства, только заниматься им очень дорого. И опять, спросит критик, кому нужен SSC?

Мы дадим несколько ответов с разных позиций: с позиций вызова, спин-офа, гордости и долга.

Вызовы. Вспомните Артура, разумного инопланетянина, прибывшего с далекой планеты, который оказывается на Вашингтон-Сквер (Нью-Йорк Сити) и видит двух стариков, играющих в шахматы. Любопытный Артур ставит перед собой две задачи: узнать правила игры и стать гроссмейстером. Физика элементарных частиц напоминает первую задачу. Физики, которые занимаются конденсированным состоянием, достаточно хорошо и абсолютно точно знающие правила своей игры, сталкиваются со второй задачей. Бóльшая часть современной науки, включая химию, геологию и биологию, со времен падения витализма[1] относится ко второй категории. Правила игры известны лишь частично только в космологии и в физике частиц. Оба вида стремлений важны, просто

[1]Витализм (от лат. vitalis — жизненный) — течение в биологии, признающее наличие в организмах нематериальной сверхъестественной силы («жизненная сила», «душа», «архей» и др.), управляющей жизненными явлениями. Элементы витализма присутствовали в философии Аристотеля (энтелехия); наиболее известные виталисты 17–19 вв.: Я. ван Гельмонт, Г. Шталь, И. Мюллер, Х. Дриш. — *Прим. пер.*

одно в бóльшей степени «релевантно», а другое — «фундаментально». Оба они являют собой явный вызов человеческому интеллекту.

У вызова есть еще один аспект. По мере стремления физиков ко все более высоким энергиям и все более мелкой структуре материи задача становится все более сложной. Создание больших машин, сложных детекторов и эффективных методов обработки данных выводит нас на границу современной технологии. Наши рабочие и наши заводы будут вынуждены столкнуться со множеством непреодолимых технических препятствий. Если мы сумеем ответить на брошенный нам вызов и решить эти проблемы, американская промышленность станет более конкурентоспособной, она будет производить и процветать во все более технологическом обществе.

Спин-оф. Все аргументы, которые последуют ниже, хорошо знакомы нашим коллегам-физикам. Они используются, и используются по полному праву, во всех разделах физики. А в действительности они даже усиливаются вследствие перекрестного опыления. Физика высоких энергий делает свой вклад в то благо, которое физика несет обществу.

Проектирование, создание и действие большого ускорителя таким образом, чтобы он оправдывал деньги, потраченные на него, требует технологических инноваций, которые могут оказаться весьма ценными в любой другой отрасли. Интенсивное изучение сверхпроводящих магнитов может иметь большое значение для многих социально важных технологий: сверхбыстрого перехода, систем хранения энергии, передачи электроэнергии, например. Лаборатории ускорения частиц ощутимо продвинули технологию, которая выросла из науки об основных материалах. SSC потребует создания огромного туннеля, а поиск более дешевых методов строительства этого туннеля приведет к патентам, которые могут оказаться важными для систем канализации, метро и тому подобного.

Истории известно множество примеров прошлых достижений. Разработки, которые начинались в физике частиц, оказали влияние на компьютеры и информатику, физику низких температур, технологию копировальных устройств, медицинскую диагностику и лечение, развитие синхротронных источников света, промышленные и медицинские ускорители, а также разведку и восстановление запасов нефти — и это лишь немногие примеры. Нельзя забывать и о том, что устройства, имеющие наиважнейшее значение в программах как ядерной, так и материальной науки, — это высокоэнергетические электронные ускорители, созданные из ускорителей высокой энергии, впервые появившихся в Корнелле и Стэнфорде.

Кроме новых и более совершенных технологий, физика частиц готовит высококвалифицированных специалистов, привыкших решать нере-

шаемые проблемы. Эти люди нередко играют ключевые роли и во многих других науках. Очень много физиков, которые специализировались именно по нашей дисциплине, можно найти вне ее, в других областях, где их с радостью берут на работу и щедро ее оплачивают и где они делают что-то отличное от физики и делают это хорошо. Один из «нас» недавно получил Нобелевскую премию по химии за открытие генетического репрессора. Другой получил Нобелевскую премию по медицине за открытие компьютерного томографического сканирующего устройства. Андрей Сахаров, объяснивший происхождение материи в «горячем Большом взрыве», пошел дальше и в 1975 году получил Нобелевскую премию мира. Многие из нас сделали важный вклад в мир энергетических ресурсов, нейрофизиологии, контроля над вооружениями и разоружение, большие финансы, оборонную технологию и молекулярную биологию. Время от времени среди нас вырастают даже писатели или художники.

Физика высоких энергий продолжает привлекать и вербовать в науку свою долю лучших и умнейших. Если бы у нас не было всех тех, кто начал свою карьеру с соблазна и мечты принять участие в интеллектуальном приключении, наш народ был бы намного хуже, чем он есть сейчас. Без SSC это станет именно тем, что пришло, чтобы уйти. Мы признаем, что другие составляющие физики элементарных частиц имеют равные права, но давайте подумаем обо всей области в целом: будет ли у нас физика элементарных частиц и ее очень важный для науки следующий этап в отсутствие этого предмета?

Гордость. Хотя гордыня и является одним из семи смертных грехов, мы гордимся успехами наших предшественников и гордимся нашей страной, которая щедро поддерживала изучение самой фундаментальной структуры материи. Физика — это международная дисциплина, и со времен Галилея физики работают в конкурентно-совместном режиме. Однако истинное сотрудничество требует примерного равенства. И все же бóльшая часть последних открытий в физике частиц была сделана за границей. Глюоны впервые были найдены в Германии, где рекордное значение энергии e^+e^--столкновений принадлежит коллайдеру PETRA. CERN, после триумфального открытия в 1973 году нейтральных токов, продолжил свою деятельность, открыв W, Z и t-кварк, и теперь предоставляет нам целый набор аномалий, которые заводят нас в тупик. Многие наши коллеги приходят к нам с вопросом: «что происходит в физике частиц?». Раньше мы обычно отвечали: «Только что началось строительство машины HERA, гигантского электрон-протонного коллайдера», или «В процессе разработки находится большой электрон-позитронный коллайдер (кольцо диаметром в 27 километров) в CERN, недалеко от Женевы», или «Блестяще возобновил свою деятельность коллайдер в CERN»,

или «PETRA сейчас работает при 47,6 ГэВ», или «В девяностых Европа точно превратит туннель LEP в большой адронный коллайдер», или «К 1994 году у нас, возможно, появится SSC». Все чаще и чаще об американских достижениях говорят либо в прошедшем времени, либо в будущем условном, тогда как европейцы следуют настоящему изъявительному. Конечно, как ученые, мы должны радоваться блестящим достижениям своих заморских коллег. Мы переживаем лишь из-за того, что если мы откажемся от возможностей, которые SSC предлагает девяностым, то это будет не только потерей для нашей науки, но и гораздо более глобальной проблемой для национальной гордости и уверенности в своей технологии. Когда мы были детьми, Америка была лучшей во многом. И она опять должна стать такой.

Таблица 3. **Стандартная модель**

Элементарными частицами стандартной модели являются шесть кварков и шесть лептонов. Кварки могут быть трех «цветов»: r, y, b. Частицы взаимодействуют через силы, описываемые в квантовой теории как калибровочно-инвариантные поля, квантами которых являются бозоны со спином 1. Электрослабое взаимодействие переносится фотоном, Z^0, W^+ и W^-. Сильное (квантово-хромодинамическое) взаимодействие переносится глюонами. Четвертое взаимодействие, тяготение, не входит в стандартную модель. Пятое взаимодействие, которое отвечает за нарушение симметрии остальных, отсутствует в нижеприведенной таблице, поскольку мы ничего о нем не знаем.

	Первое поколение	*Второе поколение*	*Третье поколение*
Кварки	u	c	t
	d	s	b
Лептоны	e	μ	τ
	ν_e	ν_μ	ν_ν

Взаимодействия	*Переносчики*
Электромагнитные	Фотоны
Слабые	W^+, W^-, Z^0
Сильные	Глюоны

Чувство долга. Эту мотивацию создания SSC объяснить наиболее сложно, но именно она является движущей силой для специалиста по физике частиц. Вера в основную простоту природы — достаточно необос-

нованная, уж будьте уверены, — снова и снова приводила к открытиям. Нас поражают невероятные успехи физики двадцатого века и ее огромное положительное (и, к сожалению, иногда отрицательное) влияние на повседневную жизнь. Вселенная удивляет нас самой своей постижимостью. Именно в ней мы слышим призыв: поскольку мы родились на непонятной планете, расположенной на краю средней галактики среди сотен миллиардов галактик стареющей Вселенной, наш священный долг — узнать ее глубочайшие секреты настолько хорошо, насколько это возможно. Дельфинов и шимпанзе можно научить повторять произнесенные фразы. Но только люди будут смотреть на звезды и задаваться вопросом, что они такое, как они действуют и почему мы находимся здесь и видим их. Это не поможет нам создать ни улучшенной мышеловки, ни телевизора, который можно носить как часы на запястье, — это всего лишь триумф человеческого воображения. Это лишь *потребность знать*, что заставляет нас строить более крупный и более совершенный ускоритель и приближаться к пониманию нашей общей матери — Большого взрыва — и его любопытного побочного продукта — материи, из которой состоим все мы.

Наши коллеги осмотрительно заявляют, что специалисты по физике частиц на границе высоких энергий не могут оказать прямого влияния на нашу технологию. Если это окажется действительно так, это будет первый подобный случай в истории науки. Но в чем мы можем быть уверены, говоря о технологиях будущего? Человеческое общество с помощью науки должно обрести лучшую способность справляться с превратностями жизни на Земле, чем это могли делать динозавры. И тем не менее, последние господствовали на Земле в течение 300 миллионов лет. Можно надеяться, что наш вид сумеет продержаться, по крайней мере, не меньше. Сейчас мы не можем аргументированно утверждать, что сегодняшняя чистая физика не станет жизненно важной для технологии отдаленного завтра.

Насколько мы понимаем, SSC — это двойное кольцо, образованное сверхпроводящими магнитами и расположенное в подземном туннеле окружностью 90–180 км (см. рис. 1). В нем будет от четырех до шести областей взаимодействия, где вращающиеся в противоположных направлениях протоны совершают лобовые столкновения для создания в системе центра масс энергии в 40 ТэВ. В январе 1984 года около 150 физиков и инженеров со всех Соединенных Штатов собрались в лаборатории им. Лоуренса в Беркли и к маю того же года создали «Обзор предварительного проекта». Этот документ должен был сузить неопределенности стоимости и плана проекта, а также определить наиболее эффективные темы, к которым должны обратиться исследование и разработки (R&D).

Предварительный проект не стал ничем радикально новым в основной науке по ускорителям. Он является беззастенчиво увеличенным и усовершенствованным вариантом сверхпроводящего Тэватрона, существующего в Лаборатории им. Ферми, который использует как опыт, накопленный в этой лаборатории, так и интенсивные R&D в технологии магнитов, которые сейчас происходят в Брукхейвене, лаборатории им. Ферми, LBL и Техасском центре ускорения частиц. Другими усовершенствованными системами станут управление низкими температурами и компьютерами, причем обе они будут использоваться в беспрецедентном масштабе. Огромный размер SSC показан на рисунке 2.

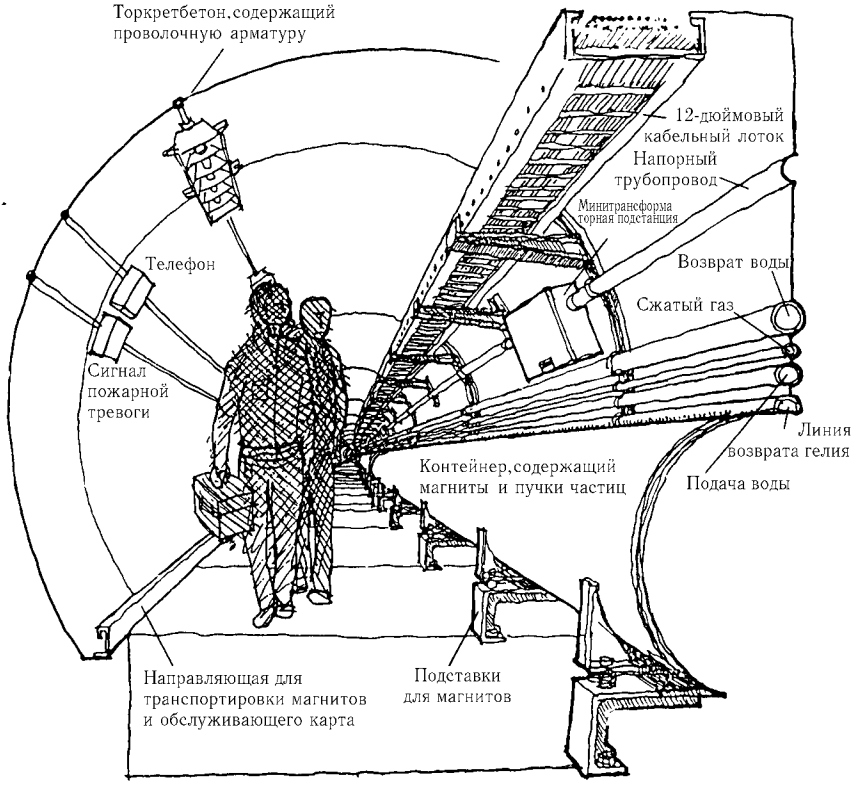


Рис. 1. Перспектива главного кольцевого туннеля в проекте Сверхпроводящего суперколлайдера.

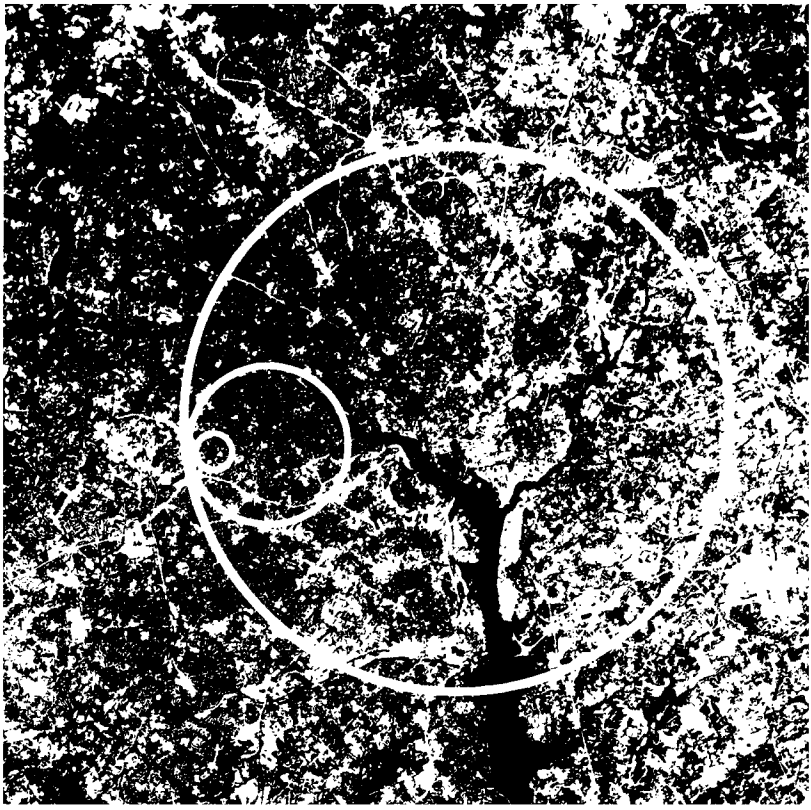


Рис. 2. Масштаб Сверхпроводящего суперколлайдера (при использовании 5-Т магнитов) показан в сравнении с Тэватроном в Лаборатории им. Ферми (самое маленькое кольцо) и LEP в CERN (кольцо побольше). Все три кольца наложены на масштабное изображение района Вашингтона, DC. Обратите внимание, что SSC по размеру примерно равен Вашингтонскому Белтвей[1]. Эта фотография была сделана NASA в ноябре 1982 года с орбиты искусственного спутника.

Работа над сверхпроводящими магнитами началась в ускорительных лабораториях после открытия жестких сверхпроводящих материа-

[1]Белтвей (Beltway) — кольцевая автомобильная трасса, опоясывающая Вашингтон DC. Это кольцо соразмерно с ускорителем SSC, строительство которого сейчас остановлено. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

лов, примерно в 1960 году. Скоро были созданы очень большие магниты для спектрометров и других инструментов. В конце шестидесятых годов лаборатории начали разрабатывать импульсные сверхпроводящие магниты, вследствие чего возникли некоторые сложности в работе с быстро меняющимися полями. В Лаборатории им. Ферми работа по R&D началась в 1972–1973 гг. при использовании опыта многих лабораторий, в числе которых главными были Лаборатория им. Резерфорда в Англии, а также LBL и Брукхейвен в США. Строительство сверхпроводящего магнитного кольца началось в июле 1979 года. В мае 1983 года шестикилометровое кольцо, состоящее более чем из 1 000 магнитов, было охлаждено до температуры в 4,5 градусов Кельвина. К июлю 1983 года было осуществлено ускорение протонов. Эксперименты начались в октябре 1984 года, а сегодня пучки с энергией в 800 ГэВ ежедневно направляются на восемь мишеней. Существуют все признаки того, что сверхпроводящая машина будет надежным и эффективным устройством.

Тэватрон сделал доступной энергию от 400 до 800 ГэВ (наша цель — 1000 ГэВ) и, в то же время, сократил потребление электроэнергии в четыре раза. Наша уверенность в достижимости SSC основана на успешной реализации Тэватрона.

Предварительный проект представляет комплекс по ускорению частиц, включающий «... центральное здание, где будут расположены рабочие кабинеты и лаборатории, размеры которого позволяют разместить около 3 000 ученых, работающих там постоянно и приезжающих на время, а также обслуживающий персонал; инжекторные устройства, состоящие из двухсотметрового линейного ускорителя, низкоэнергетический бустер в 1,2 км и высокоэнергетический бустер в 6 км, созданный для обеспечения протонного пучка с энергией в 1 ТэВ, который должен впрыскиваться в главное кольцо SSC». В двух концентрических кольцах сверхпроводящих магнитов вращающиеся в противоположных направлениях протоны будут ускоряться (каждый до 20 ТэВ), накапливаться, а затем приводиться в столкновение в областях взаимодействия. Ожидается, что обычным временем накапливания станет время, превышающее 10 часов.

Современная программа R&D рассматривает две силы магнитов: 3-Т-магнит со «слабым полем», который образует стовосьмидесятикилометровое кольцо, и 6-Т-магнит с «сильным полем», который требует наличия в туннеле девяностокилометровой окружности (см. рисунки 3 и 4). Эти два магнита также реализуют две разные философии: 3-Т-проект очень сильно зависит от формы железных частиц полюса, определяющих качество магнитного поля, управляющего протонами; в 6-Т-проекте форму поля определяют сверхпроводящие проволоки, несущие ток, как и в Тэватроне.

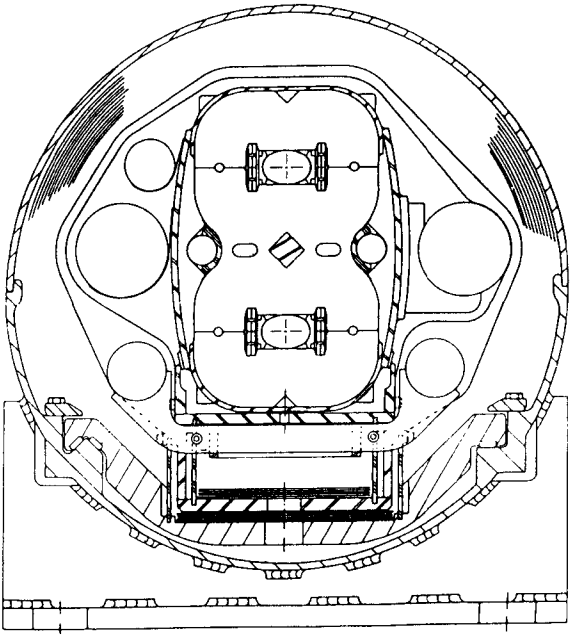


Рис. 3. Проект 3-Т-магнита из сплава с высоким содержанием железа для Техасского центра ускорения частиц. Этот магнит содержит два магнитно-независимых канала пучков. Для управления полем в каждом канале используются восемь витков размером в 10 килоампер. 3-Т-магнит был назван проектом «С» в прошлогоднем Обзоре предварительного проекта.

Согласно предварительному проекту необходимы тысячи магнитов отклоняющего и (квадрупольного) фокусирующего типов, а мощная криогенная система должна доводить температуру этих магнитов до температуры жидкого гелия и поддерживать ее не выше данного значения. Управление системой такого масштаба потребует оборудования и системы управления очень внушительных размеров.

Обзор предварительного проекта (ОПП) и последующие семинары пока что не обнаружили никаких препятствий для реализации нашего плана построить такую машину. Беспрецедентную помеху технологического плана представляет масштаб проекта. Главная проблема заключена в технологии и технике, хотя остаются и некоторые вопросы, связанные с физикой. Эксперты заключили, что необходимо около трех лет на-

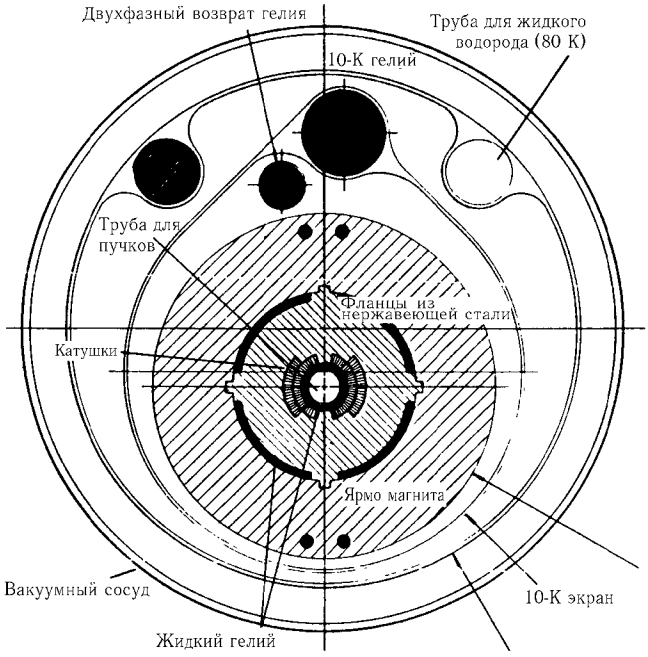


Рис. 4. Предварительный проект 6-Т-сверхпроводящего магнита, разрабатываемый Буркхейвеном, Лабораторией им. Ферми, Лабораторией им. Лоренса в Беркли. Этот проект, обозначенный «D», является компромиссным между проектом «А» для 6,5-Т-магнита и проектом «В» для 5-Т-магнита, которые были рассмотрены в прошлогоднем Обзоре предварительного проекта. Вакуумный сосуд на этом рисунке имеет диаметр, равный 53 сантиметрам.

пряженной работы, которые позволят создать альтернативные проекты, а также выдвинуть и проверить какие-то идеи, которые позволят сэкономить затраты и повысить надежность всей конструкции. Цель — подготовить машину для проведения физических экспериментов примерно к 1994 году.

Некоторые неопределенности, которые необходимо устранить перед принятием окончательного проекта, сосредоточены вокруг следующих вопросов:

Каково минимальное рабочее отверстие в магните? Отверстие в магните Тэватрона в диаметре равно около 7 см, благодаря чему со-

здается область «хорошего поля», равная около 4 см. При подведении к SSC высокоэнергетического инжектора будет достаточно более маленького отверстия, вследствие чего можно сэкономить значительные финансовые средства. Определение «хорошего поля» также требует точных характеристик.

Каково наилучшее значение магнитного поля и наилучший тип конструкции? В ходе ОПП были рассмотрены три типа магнита и создаваемых им полей. С тех пор это количество было сведено к двум выше рассмотренным. После соответствующих проверок нескольких моделей каждой конструкции необходимо принять решение и усовершенствовать выбранный дизайн во время всестороннего тестирования системы.

Можно ли сгруппировать зоны взаимодействия из соображений более экономичного распределения поддерживающих устройств или их нужно равномерно распределить по окружности, равной примерно 100 *км?* Сообщество исследовало и будет продолжать исследовать также и другие варианты типа $p\bar{p}$-столкновений, ep-столкновений и устройств с неподвижной мишенью. Однако в настоящее время все эти варианты не входят в основную тенденцию исследований.

Физика высоких энергий может похвастаться долгой традицией активного и тесного международного сотрудничества. Лучшим тому примером является создание первого в мире европейского консорциума — CERN, который управляет очень большим ускорительным комплексом, расположенным вблизи Женевы. Команды европейских и американских физиков используют оборудование друг друга легко и часто. Мы также подписали официальные соглашения по обмену с Японией, Китаем и Советским Союзом.

В 1975 году специалисты по физике высоких энергий организовали Международный комитет по будущим ускорителям (ICFA)[1] У ICFA было две миссии: изо всех сил улучшать коммуникации и минимизировать дублирование высокотехнологичного оборудования, а также готовиться к тому времени, когда ресурсы, необходимые для достижения следующего уровня энергии, потребуют сотрудничества ученых всего мира. Недавно это обширное движение было дополнено публикациями экономического саммита, во время которого главы промышленных государств (Европейского экономического сообщества, Японии, США, Канады) выбрали несколько научных и технический областей и, в сущности, обязались посвятить себя интеллектуальному процветанию этих областей, в то же время настоятельно требуя представления согласованного, совместного, долгосрочного плана. За саммитом, состоявшимся в июне

[1]International Committee on Future Accelerators. — *Прим. пер.*

1984 года в Лондоне, последовал съезд специалистов по физике высоких энергий, который прошел в июле того же года в Брюсселе. Там был создан комитет для исследования проблем международного сотрудничества в долгосрочном планировании нового оборудования. Понимая, что данная задача отнимет два-три года, комитет запросил представление предварительного отчета к июню 1985 года.

Американское сообщество, достаточно оптимистично настроенное в отношении SSC вследствие решения секретаря по энергетике (в августе 1984 года) продолжать реализацию плана R&D, тем не менее, очень серьезно отнеслось к обнародованию решения, принятого на саммите. Наши европейские коллеги уже продвинулись до середины амбициозной программы создания новых ускорителей в CERN и DESY (в Гамбурге). По завершении этой программы в 1990 году они потратят уже около двух миллиардов долларов на основное оборудование, включая детекторы. (Здесь мы попробовали сделать некоторые расчеты затрат на американскую систему, в которые включаются, к примеру, зарплаты сотрудников.) После этого можно понять, что Западная Европа могла бы объединиться с другими странами и сделать какой-то вклад в строительство SSC. Среди государств, которые могут оказать финансовую помощь, приняв на себя некоторые обязательства по строительству этого ускорителя, — Япония и Канада. Возможны и другие разновидности сотрудничества. Очевидно, что нам не избежать изрядной доли риска, и, кроме того, что, впрочем, не столь очевидно, принимающей стороне вряд ли удастся сэкономить большие суммы денег. Тем не менее, по мере удорожания оборудования, как в финансовом, так и в интеллектуальном плане, все больше распространяется осознание того, что имеет смысл создать согласованный международный план. Мы надеемся, что шерпы[1] направят главы государств к созданию такого плана в ближайшие несколько лет.

В ходе ОПП была проведена тщательная оценка затрат на SSC, которые, видимо, составят около трех миллиардов долларов (1984 года). В эту оценку заложен даже резерв на непредвиденные обстоятельства, который был предложен Департаментом Энергетики и составляет около 20 процентов. К этой сумме необходимо добавить стоимость детекторов (порядка 4–8 миллиардов долларов) и затраты на предварительные операции (1–2 миллиарда долларов).

О необходимых свойствах детектора общего назначения очень многое поведал коллайдер с энергией в системе центра масс, равной

[1]Шерпы — тибетцы, населяющие южные склоны Гималаев. Они очень часто становятся проводниками в горах или носильщиками во время горных экспедиций. — *Прим. любезно предоставлено автором.*

600 ГэВ, работающий в CERN. Детектор коллайдера Тэватрон в Лаборатории им. Ферми будет стоить 60 миллионов долларов. Судя по оценкам, увеличение этого детектора, имеющего энергию 2 ТэВ, до энергии в 40 ТэВ будет стоить около 200 миллионов долларов. Специализированные детекторы, предназначенные для более конкретных исследований, обычно стоят гораздо дешевле.

Послужной список строительных проектов физики высоких энергий очень хорош. Ввиду непременно консервативной технологии и нового очень тщательного рассмотрения финансовых затрат на крупные проекты превышение заложенных затрат практически невероятно. С другой стороны, если потратить на R&D еще два или три года, можно будет добиться значительной экономии. Более того, международное сотрудничество может послужить и для уменьшения гнета американских налогоплательщиков, сняв с них часть бремени. Самым крупным строительством, которое затеяла физика высоких энергий ранее, было создание Лаборатории им. Ферми, на которую ушло около 900 миллионов долларов (1984 года). Таким образом, мы лицом к лицу оказались почти с четырехкратным увеличением стоимости установки девяностых по сравнению со стоимостью установки семидесятых.

Ввиду повсеместного увеличения спроса на более сложное оборудование этот рост не выбивается из общей тенденции. Это всего лишь очень крупная сумма денег. После реализации данного проекта и при условии неизбежного сокращения финансирования остальных проектов физики высоких энергий ее бюджет может быть возвращен на прежний уровень, которого придерживались до SSC. Ежегодный бюджет на действие новой установки оценили в 200 миллионов долларов. К этой сумме нужно добавить около 50 миллионов на совершенствование детектора и различных механизмов. В 1985 году бюджет физики высоких энергий составляет порядка 600 миллионов долларов. Ясно, что новая машина потребует от текущей программы основных усилий и ресурсов. Судя по всему, нет никакой причины, по которой Соединенные Штаты не могли бы позволить себе эту и другие установки для исследований. Безусловно, важно, чтобы все эти затеи проходили строгие проверки для определения их научной ценности.

Некоторых волнует тот факт, что столь огромный проект окажет неблагоприятное влияние на другие стóящие программы физики. Изучение истории финансирования проектов за последние 25 лет говорит об отсутствии такой проблемы, и это показывает рисунок 5. Хотя мы не в состоянии предсказать будущий темп финансирования науки, вероятно, что общественность и ее представители в правительстве не перестанут ценить хорошую науку и выделять ей постоянно растущую долю федерального бюджета. Однако это трепетное отношение не продлится

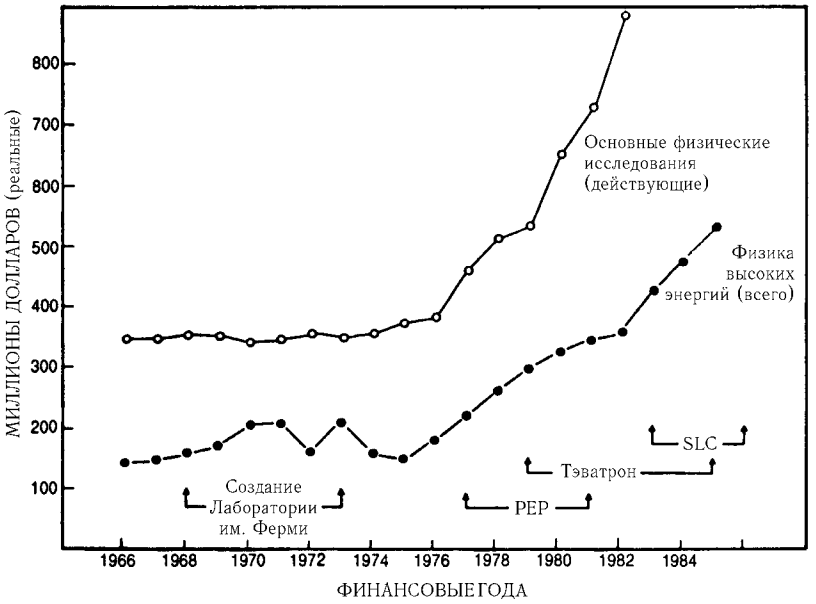


Рис. 5. (Федеральный бюджет на физику. Вертикальная ось показывает реальные доллары без учета инфляции. Источник: «Physics Survey», 1984 г.).

долго, если научное сообщество утратит свое видение и единство и превратится в ветреное сборище, в котором каждый тянет одеяло на себя. Да, у нас существует дефицит национального бюджета; да, перед нами стоят социальные проблемы, которые не терпят отлагательств. Но если мы верим в долгое будущее нашего народа, то основные исследования должны продолжаться непрерывно и двигаться в том темпе, какой сочтет жизнеспособным молодой ученый.

Сообщество физиков, работающих с высокими энергиями, поступало достаточно разумно, рекомендуя завершение старых, но по-прежнему полезных для науки, исследований и отказ от прежних установок, чтобы обеспечить финансирование ускорителей, с помощью которых мы могли бы попытаться решить более насущные проблемы.

На каждом этапе растущие затраты и сложность вынуждали нас собирать все более обширные команды и растягивать исследования на более длительные периоды времени — идиллия, когда ускоритель стоит у тебя на заднем дворе, сейчас является уделом совсем немногих, тогда

как связь, охватывающая всю страну, — норма. Эта сложность никому не нравится, и она, к тому же, требует огромного внимания, чтобы мы могли быть уверены, что по-прежнему общаемся со своим студентами, своим младшим поколением, своей сменой. Например, до недавнего времени университеты были тем самым полигоном, на котором готовили строителей ускорителей и тех, кто будет ими руководить. По мере того как технология создания ускорителей усложнялась, ученые специализировались все больше как физики по ускорению частиц и физики по изучению частиц. По мере уменьшения количества ускорителей и удаления их от университетов становилось все труднее подготавливать людей, которые были бы специалистами по частицам и руководили бы такими специалистами. SSC — это еще один шаг данного процесса, но мы не видим другой альтернативы, которая сохранила бы жизнеспособность науки, и даже, скорее, не жизнеспособность науки, а *реальность* научной деятельности. Мы считаем, что физика высоких энергий должна двигаться в этом направлении или завершить поиск понимания архитектуры субъядерного мира, который длится вот уже 3 000 лет.

Современная физика частиц унаследовала огромное богатство, следуя по пути — сознательно или нет, — проложенному для нас древними философами. Этот непрерывный поиск породил несколько великих интеллектуальных переворотов, два из которых произошли в двадцатом веке: один связан с восприятием пространства-времени и причинно-следственной связи (относительности), а другой — с пониманием поведения материи на атомном уровне (квантовая теория). Нельзя забывать и о постепенном создании научной основы технологии и взаимозависимости наук, благодаря их общему содержанию и распространению единых научных инструментов. Физика частиц, подобно своим интеллектуальным соседям, идет рука об руку с космологией и ядерной физикой. Методы и устройства, разработанные в ускорительных лабораториях, нашли готовое применение в других областях науки. Из всех подразделов науки мы извлекли многочисленные выгоды как в интеллектуальном, так и в технологическом планах. Однако превыше всего прочего все мы разделяем удивление и благоговейный восторг перед тем расстоянием, которое мы прошли, стремясь понять нашу Вселенную.

Сейчас мы просим своих соратников-физиков присоединиться к нам, хотя, возможно, им чужда наша область, в великом приключении, которое может стать не меньше, чем гигантским шагом в преследовании нашей общей цели — стремлении к более глубокому пониманию природы, крупинкой которой является человечество.

Передавая факел

Американцы заслужили львиную долю Нобелевских премий по физике, химии и медицине. Очень часто, но ошибочно, этот факт называют свидетельством здоровья американской науки. В действительности, это лишь проценты, заработанные благодаря прошлым инвестициям. Исследования, которые были награждены этой премией, проводились от 10 до 25 лет назад, когда науку поддерживали более щедро, нежели сейчас. Ученые, награжденные этой премией, получили жизненно важное школьное образование в первой половине двадцатого века. С тех пор европейские вложения в обучение науке и исследования были гораздо больше (на душу населения) наших. Это проявится при вручении Нобелевских премий двух следующих десятилетий.

Когда-то эта страна была неоспоримым мировым технологическим центром. Сегодня бóльшая часть нашей промышленности находится в глубоком кризисе. Сталь, корабли, швейные машины, стереосистемы и обувь можно справедливо назвать потерянными промышленными отраслями. Японские машины повсеместно считают более дешевыми и более качественными. Гордая RCA[1] стала рядовым дистрибьютером японских товаров, собранных в Корее. «Американ Моторс» находится под контролем французского правительства. Мы даже покупаем польских роботов. Передовая электроника и компьютеры очень скоро сдадут свои позиции под напором японской техники. Как только мы потратим все основные материалы и сырье, мы, американцы, уже не сможем позволить себе жить в технологическом обществе, к которому мы привыкли. Мы останемся со своими «Биг Маками», обедами из замороженных полуфабрикатов и, возможно, с нашей военной промышленностью, которая щедро субсидируется из федерального бюджета.

Как же случилось так, что рыночные силы обрекли нас на провал? Неужели уже слишком поздно для технологического возрождения? Мы уводили свою молодежь от науки и технологии. Частичную ответственность за это несут наш Вьетнамский опыт, неудавшееся производство ядерной энергии и угроза ядерной катастрофы. Свою роль сыграло и почти повсеместное отсутствие в средних школах преподавателей, компетентных в науке и математике. Законы рынка вынудили и тех немногих,

[1]Radio Corporation of America. — *Прим. пер.*

которые были, переметнуться в безысходные, но более высокооплачиваемые, объятия промышленности. К кому потом обратится наша промышленность? Большинство наших школьников не понимает ни алгебры, не химии. Мы не можем рассчитывать, что они сумеют возродить наше технологическое общество.

Я получил образование в системе бесплатных средних школ Нью-Йорка. Государственные экзамены требовали серьезной, обстоятельной и стандартной учебной программы. У нас очень часто проверяли уровень чтения и математики, причем учеников оценивали в соответствии с их умениями. Сегодня подобное тестирование популярностью не пользуется. Учеников распределяют на «открытые классы» и говорят им «заниматься своим делом». Важно самовыражение, а грамматика и история, не говоря уже о науке и математике, — дело десятое. Наши школы просто-таки очарованы сложными и дорогими научными игрушками и «наглядными пособиями». Но что им нужно на самом деле — так это грамотные преподаватели, знающие науку. Лягушек, коровьих сердец, сифонов, нескольких листочков, воды из пруда, ночного неба, недорогого микроскопа, хорошего химического набора и нескольких батареек, проводов и электрических лампочек достаточно, чтобы научить значительной части науки. Однако в действительности моих детей кормят расфасованной коммерческой псевдообразовательной кашей типа «волшебных порошков». Но при этом они не могут отличить дуб от других деревьев по форме его листьев. Пятьсот не занимающихся наукой студентов Гарварда проходят мой курс: «От алхимии к кваркам». Многие из них не могут назвать ни одного химического элемента или определить хоть одну планету или созвездие. Они станут знаменитыми социологами или политологами, но цифры вызывают у них сильнейшую аллергическую реакцию. Они, подобно большинству американцев, страдают от «дисметрии». Быть может, именно в их руки через несколько лет попадет американский бюджет.

В 1910 году мой отец видел комету Галлея. Затем он был свидетелем технологического роста этой страны, подобного взрыву; мой отец очень гордился этой страной. Когда я был ребенком, отец объяснил мне, что комета Галлея вернется в 1985 году и что американские ученые отправятся в космос, чтобы встретить ее там и разгадать ее загадки. Ему было бы неприятно узнать, что не мы, а русские, французы и японцы запустят свои станции к кометам. Мы, конечно, тоже могли бы сделать это и сделали бы это лучше всех, но мы выбрали этого не делать. Факел научных стремлений был передан другим людям.

Когда-то мы первенствовали в физике высоких энергий, моей специальности. Мы изобрели «атомодробители», и до недавнего времени нам принадлежал самый большой и лучший из них. Со времени открытия

в CERN пересекающихся накопительных колец в 1971 году и коллайдера в 1981 году наши европейские друзья оставили нас далеко позади. Волнующая область электрон-позитронных столкновений была открыта во Франции, Италии и Советском Союзе в шестидесятые годы, но в семидесятые торжествовали мы. Однако, начиная с 1978 года, нас постоянно опережают немцы. Поскольку Европа тратит на физику высоких энергий в два раза больше чем США, будущее этой области в нашей стране видится далеко не в розовом цвете. По иронии судьбы европейцами движут именно законы рынка. Быть может, они лучше нас видят, что ключом к здоровому промышленному обществу является технология.

Обучая наименьший общий знаменатель

Моя жена, Джоан, баллотировалась в Бруклинский (штат Массачусетс) школьный комитет с политической программой «Больше математики и науки». Она проиграла силам, лозунгами которых были «Равенство, а не превосходство» или «Меньше уроков, ибо больше дебилов!».

Мы, американцы, стремимся к наименьшему общему знаменателю, который очень низок. Знание нашими детьми математики просто-напросто скандально мало. Наши лучшие ученики даже близко недостаточно подготовлены, а большинство выпускников средней школы страдают от Приобретенной Неизлечимой Дисметрии, которая еще известна как Боязнь Математики.

Недавние исследования установили относительную математическую безграмотность, начиная с учеников первого класса и далее, в американских школах по сравнению с иностранными. Номер *Science* от 14 февраля 1986 года сообщает о результатах сравнительного исследования, в котором принимали участие 2 300 учеников с Тайваня, из Японии и из Миннеаполиса. Уже в первом классе наши ученики отстают от своих азиатских сверстников, а к пятому классу разница между ними не может не броситься в глаза.

Еще более масштабное исследование, которое финансировал Государственный департамент образования Америки и которое задействовало 6 648 американских детей, а также школьников многих других стран, показывает, что с возрастом это заболевание безжалостно прогрессирует. Наши восьмиклассники оказались на тринадцатом месте среди 17 изученных стран. Японские, нидерландские и венгерские школьники опередили наших детей ровно настолько, насколько наши опередили школьников из Нигерии и Свазиленда.

Наше общество — это общество высоких технологий, и оно нуждается в математически компетентных специалистах, которые могли бы управлять его роботами и компьютерами и понимать его надежды, связанные с еще более высокими технологиями. Другое исследование Департамента образования сфокусировано на 5 процентах самых лучших учеников из 12 стран. На этот раз у Америки последнее место. Наши лучшие из лучших ученики старших классов средней школы (в плане

математики) ничуть не лучше средних учеников из Финляндии и во многом уступают произвольно выбранным японским ученикам.

Первокурсники, пришедшие в колледж, в основном, не в состоянии следовать выбранным им профессиям. Математическая грамотность необходима для изучения физики, химии, математики, информатики, экономики и программ подготовки к врачебному делу или стоматологии. Сколько наших второкурсников было отчислено из университетов из-за слабости их среднего образования? Большинство.

В Америке существуют десятки первоклассных школ для обучения аспирантов науке и инженерному делу, но им не хватает достаточно квалифицированных американских кандидатов на поступление. Более половины наших аспирантов — иностранцы, причем соотношение иностранцев и американцев растет, и явно не в нашу пользу. Многие иностранцы по окончании учебы остаются в этой стране, чтобы получить высокооплачиваемую работу, связанную с использованием высоких технологий, а американцы-недоучки подметают их пол и подстригают их траву.

Почему же американские ученики так слабы в математике? Согласно *Science*

Большинство американок, с которыми беседовали во время этого исследования, не казались недовольными школами, где учатся их дети... Дети, которые видят, что родителей, в общем, устраивает то, что происходит в школе, и они одобряют это, вряд ли осознают необходимость тратить больше времени и усилий на учебу в школе.

Таким образом, плохое знание американскими детьми математики отражает глобальное непонимание того, что американские школьники учатся неэффективно и что существует настоятельная необходимость совершенствования и перемен в системе образования, если Соединенные Штаты не хотят потерять свою способность конкурировать с другими странами...

Существуют и другие причины. В Америке немного учителей, понимающих математику, которой они обязаны обучать. Если бы они ее действительно понимали, то могли бы заработать гораздо больше, уйдя в промышленность (как они и сделали бы). Учебники по науке и математике нередко содержат объяснения, которые не имеют смысла, и задачи, которые невозможно решить. Будучи родителем четверых детей, которые учатся в средней школе, и практикующим ученым, я это точно знаю.

Затем есть еще и телевидение. Есть ли в Америке хоть один ребенок, который тратит больше времени на домашнее задание, чем сидит, приклеившись к идиотской трубке? Вряд ли. А изучение математики, подобно обучению игре на гобое, требует времени и практики.

Изменится ли эта ситуация? Вряд ли. Несмотря на предостережения, прозвучавшие в 1983 году в отчете президентской комиссии *Народ в опасности*, ситуация стала еще более угрожающей. Отрасли нашей промышленности вымирают друг за другом, став жертвами превосходящих иностранных технологий: сталь, обувь, стерео, корабли, кремниевые чипы, автомобили, роботы, текстильное и сельскохозяйственное оборудование и, совсем скоро, компьютеры и самолеты. Не удивительно, что мы уже столкнулись с чудовищным внешнеторговым дефицитом. И дело здесь не столько в дешевой рабочей силе или во всемогущем долларе, сколько в отсутствии инженерного воображения или того, что мы когда-то гордо именовали «ноу-хау».

Наши умные ребятишки, которым наши преступно нищие (в плане интеллекта) школы не дают сделать для американской технологии ничего полезного, вынуждены заниматься юриспруденцией и рекламой. Они сделают с вами то же, что сделали с AT&T[1], и убедят вас, что вам это нравится.

Тем временем, французы запускают спутники, не страшась потерять человеческие жизни, потому что используют свои непилотируемые ракеты «Ариан»; русские присылают нам фотографии кометы Галлея, сделанные с очень близкого расстояния; канадцы продают нам электричество, генерированное на безопасных и надежных реакторах; европейцы находят все элементарные частицы, а японцы предлагают фотоаппараты, настолько простые, что с ними могут справиться даже американцы. Покуда мы можем позволить себе бесплатный проезд, это не такая уж плохая сделка. Но осторожно! Желтая кирпичная дорога, по которой мы катимся вниз, не ведет в страну Оз.

[1] American Telephone and Telegraph. — *Прим. пер.*

Наука и насилие

Осознанно или нет, ученые глубоко и неминуемо вовлечены в политическую и военную историю человечества. Великий Архимед создал оружие, чтобы защитить Сиракузы от римлян, но война была проиграна, а Архимед — убит. Георг Брандт открыл фосфор в Гамбурге. Триста лет спустя его город был разрушен зажигательными бомбами, которые не появились бы без его открытия. Антуан Лоран Лавуазье — первый, кто сумел понять дар Прометея, — был казнен после Французской революции. «Франции ученые не нужны», — изрек судья. Генри Мозли — человеку, открывшему понятие атомного ядра, — позволили сражаться и погибнуть в траншеях. Англии ученые тоже не были нужны. Расовая политика Германии положила конец ее превосходству в физике. Германии были не нужны ученые. Не отстали и Соединенные Штаты Америки, выкинув из страны как британского шпиона Графа Румфорда и опозорив Оппенгеймера.

Ученые дали миру ядерное оружие: Отто Ган, открыв деление атомного ядра; Энрико Ферми, построив ядерный реактор; Альберт Эйнштейн, создав свое знаменитое уравнение и написав не менее знаменитое письмо; Ричард Гарвин и Эдвард Теллер, сделав вклад в создание водородной бомбы; и многие, многие другие. Как производители автомобилей и игрушек отвечают за свою продукцию, так и ученый ответственен за свои открытия.

За многие годы гонки вооружений мировой запас ядерного оружия перешел все разумные границы и продолжает расти. Если бы им воспользовались, то произошла бы катастрофа, какой мир не видывал. Луис Альварес утверждает, что подобная катастрофа — столкновение с достаточно крупным метеоритом — 70 миллионов лет назад привела к вымиранию всего живого и наступлению мелового периода. Так закончилась эпоха динозавров, длившаяся 300 миллионов лет. Нашей цивилизации всего несколько тысяч лет, и мы уже стоим перед лицом похожего бедствия, причем сотворенного своими собственными руками.

Мое мнение предельно просто и наивно. Я верю в окончательное и полное уничтожение ядерного оружия: полное ядерное разоружение, вследствие которого у нашей цивилизации может быть будущее.

Многие из присутствующих предпочитают концепцию взаимного гарантированного сокращения ядерного оружия. Каким бы безумным это

ни казалось, это *действительно* помогло избежать ядерной войны целому поколению. И все же мне невыносима такая постановка вопроса, и, по-моему, в качестве постоянной опоры для общества она тоже неприемлема. Взаимное разоружение привело к продолжению гонки вооружений, которая не просто истощает финансы и противоречит морали, но представляет опасность: такую опасность, которая делает ядерную катастрофу неизбежной. Взаимное разоружение — это эффективное краткосрочное лекарство с летальными долгосрочными последствиями. Существует слишком много правдоподобных сценариев, которые вполне могли бы привести к ядерной войне: несчастный случай, просчет, безответственные главы государств, получившие ложную информацию, несанкционированный доступ, неуместная провокация, *ad nauseum*. Кто может гарантировать, к примеру, что будущие главы государств будут обладать умом и цельностью Никсона, Хрущева, Рейгана или Брежнева? Кто стал бы отрицать, что любой из них, сделай он такой выбор, запросто мог бы развязать ядерную войну. Кеннеди очень близко подошел именно к такой позиции. Можно ли кому-то доверять настолько?

Вы скажете: полное ядерное разоружение невозможно. Некоторое количество ядерного оружия небольшого размера всегда можно скрыть, особенно в закрытом обществе. Быть может, это действительно так. Быть может, в наших силах — только лишь приблизиться к полному ядерному разоружению. Давайте сократим два громадных запаса стратегического ядерного оружия. *Им* нужны тысячи ракет, потому что у *нас* есть тысячи ракет. Пусть обе стороны сократят свое вооружение в 10 раз. Тогда у *них* будут сотни неуязвимых ракет, равно как и у *нас*. Это все еще взаимное разоружение, но в то же время оно в 10 раз ближе к полному разоружению. И если это сработает, то, быть может, возможен еще один коэффициент 10...

Неужели взаимное разоружение должно сопровождаться потенциальным уничтожением целых народов? Не достаточно ли держать в качестве заложников Москву и Нью-Йорк, а остальных не трогать?

Предотвращение ядерной войны должно стать общепризнанной главной целью человечества. Существует немало других важных проблем, к которым следует обратиться: бедность, голод, болезнь, ненависть, расизм, загрязнение, человеческое достоинство — лишь немногие из них. Но предотвращение ядерной войны — это первая и самая главная проблема.

На протяжении всей истории человечества люди воевали. Они воюют и сегодня. Они будут воевать в будущем. Но эти войны не должны быть ядерными. Тактическое и театральное ядерное оружие направлено на «ограниченную ядерную войну». Я не думаю, что подобная война возможна. Я верю генералу гораздо меньше, чем президенту. Мне

не совсем ясно, почему нельзя подписать договор, запрещающий такое оружие. Граждане мира хотят такой договор, нуждаются в нем и должны его требовать. Я предпочту противостоять 20 000 русских танков, оснащенных 20 000 более дешевых противотанковых орудий, чем ядерному оружию или «нейтронным бомбам». Давайте для начала запретим маленькие бомбы.

Насколько необходимо исказить и разрушить западную цивилизацию, чтобы обеспечить безопасность в непрерывной гонке вооружений? Нужно ли нам проводить в Нью-Йорке учения по эвакуации, чтобы посмотреть можно ли будет спасти его граждан? Неужели мы запятнаем американскую мечту бомбоубежищем и пушкой в каждом подвале? Неужели мы пожертвуем одним или двумя штатами для размещения там ракет МХ? Предпочли бы вы стать крысой (шпионом) или красным? Или все же есть более разумный способ?

Ядерное оружие нужно человечеству так же, как оспа. И у меня все еще достаточно глупости, чтобы верить, что с ядерным оружием мы разделаемся точно также.

Благодарности

Я приношу искреннюю благодарность следующим изданиям за разрешение вновь напечатать ранее опубликованный материал.

Эссе Физика элементарных частиц и я основано на лекции, прочитанной на праздновании столетнего юбилея Физической лаборатории им. Джефферсона в Гарвардском университете 4 мая 1984 года. Это также было и тридцатилетие работы Глэшоу в Гарварде. Аномальные результаты, полученные в CERN и обсуждавшиеся в той лекции, с тех пор исчезли.

Эссе Университетский изгнанник в Калифорнии впервые публикуется в данной книге. Стихотворение «Свободному морскому ушку» впервые появилось в *Physics Today* в декабре 1984 года, стр. 19. В нем автор сетует на поток невоспроизводимых результатов. Фиаско, которое потерпел холодный синтез, показало, что ничто не меняется в земле заходящего Солнца.

Эссе Тайны материи — интервью, которое Шелдон Глэшоу дал Питеру Коста. Его транслировали по радио ЮПИ[1] на всю страну в общественной серии «Знаменитые люди Гарварда». Версия, приведенная здесь, адаптирована из «Беседы с Шелдоном Глэшоу», опубликованной в *Harvard Gasette* 7 апреля 1989 года.

Эссе Взгляд на Вселенную было подготовлено как дополнение к программе основного гарвардского курса *От алхимии к кваркам*, который Глэшоу преподавал в течение более десяти лет.

Эссе Жизнь в логарифмическом масштабе времени было подготовлено как дополнение к гарвардскому курсу *От алхимии к кваркам*.

Эссе Игра чисел на английском языке впервые опубликовано здесь. Наряду с несколькими другими работами, первоначально ее попросил профессор Антонио Цикики для еженедельного раздела *Cultura Moderna* газеты *Il Tempo*, где оно появилось на итальянском 3 марта 1981 года.

Эссе Добро пожаловать в систему радиовещания Вселенной было подготовлено как дополнение к гарвардскому основному курсу *От алхимии к кваркам*.

[1] «Юнайтед Пресс Интернэшнл» — информационное агентство. — *Прим. пер.*

Эссе Одиноки ли мы во Вселенной? было подготовлено как дополнение к гарвардскому основному курсу *От алхимии к кваркам*.

Эссе Большая картина было подготовлено как дополнение к гарвардскому основному курсу *От алхимии к кваркам*.

Эссе Что такое элементарная частица? было прочитано 30 ноября 1984 года для учеников средней школы в Чикагском университете как одна из Рождественских лекций Иллинойской ассоциации научных лекторов. Рукопись была подготовлена организаторами с записи на пленке, но, насколько известно автору, никогда не публиковалась.

Эссе В поисках кварка первоначально было опубликовано в *The New York Times Magazine* 18 июля 1976 года. Авторское право принадлежит The New York Times Company. Перепечатано с разрешения.

Эссе Кварки с цветом и ароматом адаптировано из эссе, первоначально опубликованном в *Scientific American* в октябре 1975 года, стр. 35–50. Авторское право принадлежит Scientific American, Inc. Все права оставлены за этой компанией.

Эссе Создание и открытие очарованного кварка в отредактированном варианте появилось в *Il Tempo* 28 сентября 1983 года. На английском языке здесь публикуется впервые.

Эссе Антинейтрино и геология в отредактированном варианте появилось в *Il Tempo* 28 января 1984 года. На английском языке здесь публикуется впервые.

Эссе Физика элементарных частиц как бесполезная трата времени и денег здесь публикуется впервые.

Эссе Есть ли будущее у физики элементарных частиц? впервые было опубликовано в «Уроке квантовой теории», под редакцией J. de Boer, E. Dal, O. Ulfbeck, Elsevier Science Publishers B. V., 1986, pp. 143–153. Эта глава адаптирована из лекции, прочитанной в Копенгагенском университете 4 октября 1985 года на симпозиуме, посвященном столетию Нильса Бора. Двадцатью пятью годами ранее, по завершении своих постдокторских исследований в институте им. Бора, Глэшоу написал статью, где в общих чертах описывается алгебраическая структура теории электрослабых взаимодействий.

Эссе Большое и малое впервые было опубликовано под названием «Замыкая круг» в октябрьском номере *Discover* за 1989 год, стр. 66–72.

Эссе В направлении единой теории: нити в гобелене адаптировано из лекции, прочитанной в Стокгольме 8 декабря 1979 года по случаю получения Нобелевской премии по физике. Авторское право 1980 года принадлежит Фонду Нобеля.

Эссе Объединенная теория взаимодействий элементарных частиц, написанное Шелдоном Ли Глэшоу и Говардом Джорджи, впервые публиковалось в *Physics Today*, сентябрь 1980 года.

Эссе Великое объединение было написано во время Шотландской летней школы 1980 года и впервые опубликовано в *New Scientist* от 18 сентября 1980 года.

Эссе На пути к объединенной теории поля было впервые опубликовано в *Progress in Scientific Culture*, Научный и культурный центр Эторре Майорана, Эрика, Италия, 1982 год.

Эссе Запутавшийся в суперструнах в исправленном варианте было опубликовано в книге «Взаимодействия: путешествие через разум физика, занимающегося частицами», написанной Шелдоном Глэшоу и Беном Бова, Warner Books, 1988, стр. 22-25.

Эссе Великое объединение и будущее физики адаптировано из эссе, подготовленного для публикации в *Il Tempo*. На английском языке здесь публикуется впервые.

Эссе SSC: машина девяностых, написанное Шелдоном Глэшоу и Леоном Ледерманом, первоначально было опубликовано в *Physics Today*, март 1985 года, стр. 2–11. Оно привело к энергичной переписке с редактором этого журнала.

Эссе Передавая факел было впервые опубликовано в *Physics Today*, апрель 1983 года.

Эссе Обучая наименьший общий знаменатель впервые было опубликовано под названием «Математика наименьшего общего знаменателя» в *The Los Angeles Times* от 30 марта 1986 года, часть IV, стр. 5. Она отражает растущую озабоченность Глэшоу качеством преподавания в школах математики и науки.

Эссе Наука и насилие адаптировано из лекции, которая открывала *Международный семинар по всемирным последствиям ядерной войны*, прошедший в Эрике 14 августа 1981 года. Данное эссе присутствует в трудах этого семинара, собранных Э. Этимом и С. Стипикем, Фраскати, Италия, стр. 7–10, 1982 год.

Автор также благодарен следующим людям за разрешение напечатать материалы, написанные в соавторстве.

Питер Коста, директор новостей и общественной деятельности в Гарвардском университете.
Говард Джорджи, профессор физики Гарвардского университета.
Леон Ледерман, профессор Фонда Фрэнка Зульцбергера Чикагского университета.

Предметный указатель

J/ψ-частица, 19, 118, 160, 163, 176–177, 179–182, 189–190, 199, 236, 294–295, *см. также* Мезоны
SU-группы, 165, 167, 169, 171, 230–236, 245, 247, 249–260, 262–263, 270–271, 285
— элементарные частицы, 256
W-частицы, 20, 117, 118, 125, 131, 140, 143, 145–146, 174–175, 249, 251–253, 255, 268, 274–275, 279, 287
Z-частицы, 20, 117, 118, 125, 131, 140, 143, 145–146, 174, 185, 234, 235, 251–253, 255, 274, 279, 287, 295
3C 144 (туманность Рака), 82
3C 273, 82–84
3C 274 (M 87), 82
3C 405 (Cygnus A), 82

CERN (Европейский центр ядерных исследований), 20, 117, 140, 294
Cygnus A, 79, 80

M1 (туманность Рака), 82
M101, 54
M5, 82
M82 (3C 231), 82
M87 (3C 274), 82

NGC 1952 (туманность Рака), 82

SPEAR (Станфордский электрон-позитронный коллайдер), 20, 139, 160–161, 189

Адамас, Джон Кауч, 47
Адлер, Стивен, 171
Адроны, 137, 152, 155–157, 159, 161, 163–164, 167, 171–172, 177, 180–183, 198–199, 234–235, 243
— количество, 208
— очарованные, 160–161, 275
— супермультиплеты, 165, 169, 176–178
Алгебраические числа, 73–74
Алеф-единица, 74
Алеф-нуль, 71–74
Альварес, Луис, 23, 321
Альфа-распад, 121
Алюминий, 133
Аминокислоты, формирование в первичной атмосфере Земли, 99
Английские слова астрологического происхождения, 39–40
Антиматерия, 116, 144, 151
Антинейтрино, 158, 191–193
Антипротоны, 145, 151, 164
Аполлон, 47
Аппелквист, Томас, 177
Аристотель, 42
Аромат, 163, 172, 174, 267
Арп 220 (галактика вспыхнувших звезд), 96
Асимметрия материя-антиматерия, 115–116

Асимптотическая свобода, 179, 245, 247, *см. также* Квантовая хромодинамика
Астрология, 39
Астрономия, 62
Атомы, 131, 135, 163, 293
— свойства, 120–121, 148–149

Барионное число, 164
Барионы, 20, 137, 152, 158, 164, 166, 168–169, 176–178
— очарованные, 183, 184
Бартел, Норберт, 54
Бернелл, Жокелин Белл, 109
Бета-распад, 115, 121, 138, 158, 174, 249, 253, 268, 274
Бете, Ханс, 217
Бозон Хиггса, 141, 209
Бозоны, 20, 164, 279
Бойсджоли, Роджер, 185
Большой взрыв, 55, 58–61, 75, 84, 88–90, 113, 146, 221–222, 262–263, 281, 285–286
Бор, Нильс, 202
Браге, Тихо, 43–45
Бруно, Джордано, 92
Бьеркен, Дж. Д., 159, 175, 188

Вайнберг, Стивен, 34, 117, 174, 274
Ван де Хальст, Х. С., 111
Ван-дер-Мер, Симон, 117
Векторные бозоны, 161, 172, 174
Венера, 47, 94, 97
Венеция, 45
Взаимное гарантированное разоружение, 322–323
Вильсон, Кеннет, 172
Вильсон, Роберт В., 75, 89
Вильчек, Франк, 222
Внеземная жизнь вероятные звезды для возникновения, 95–96, 100
— время выживания, 108
— поиск, 95, 102, 109, 111–112
— связь с, 110–112
Внесолнечные системы планет, 96
Водород, 149
— гипертонкая частота, 110
— излучение длиной 21 см, 110–111
— обилие во Вселенной, 116
Восьмеричный путь, 122–123, 132, 135, 136, 148, 155, 165–167, 169, 176–178, 187, 198, 209
Время выживания разумного вида, 108
Время, стрела, 286
Вселенная, Эпоха атомов, 59
— Эпоха звезд и галактик, 59
— Эпоха ионов, 59
— Эпоха кварков и глюонов, 58
— Эпоха лептонов, 58
— Эпоха нуклонов и антинуклонов, 58
— Эпоха ядерного синтеза, 58–59
— количество протонов, 64–66
— нарушение симметрии, 222, 285
— расширение, 52–54, 113
— эволюция, (рис. 3), 58–61
Ву, Т., 145
Вулканы освобождение от накопленного газа, 98–99
— происхождение атмосферы Земли, 98

Галактика Андромеда, 49, 51
Галактики, вспышка звезды, 96
— распределение, 85–87
— расстояние, 54
Галилео, 45–46, 48
Галлий, 133
Гамма-распад, 122
Гамов, Джордж, 88, 119–120, 135, 197–198, 295–296

Ганимед, 45
Гейзенберг, Вернер, 31
Гелий, 58, 107
— обилие во Вселенной, 116–117
Гелиоцентрическая теория, 42–43, 46
Гелл-Манн, Мюррей, 20, 118, 122, 135–137, 156, 165, 167, 171, 187–188, 198, 209
Георг III, король Англии, 47
Германий, 133
Герц, Генрих, 76
Гершель, Уильям, 47
Гильберт, Уолтер, 31
Глэшоу, Шелдон Л., 15–36, 117, 175
Глюоны, 58–59, 117, 140, 148, 158, 172–174, 242–243, 255, 268, 274–275
Гольдхабер, Джордж, 161, 190
Горовиц, Пол, 94, 111
Гравитация, 117, 129, 158, 172, 217, 274, 279–280, 289
Гравитоны, 117
Греческая космология, 39–40
Гринберг, Оскар В., 170
Гросс, Дэвид, 97
Группы Ли, 165, 285
Гюйгенс, Христиан, 92

Дальтон, Джон, 121, 148, 196
Движения звезд, 40, 41
Движения планет, 40–48
— скорость в зависимости от расстояния до Солнца, 45
Детектор с хрустальным шаром, 27
Дзета-частица, 25
Динозавры, вымирание, 48, 321
Дирак, Поль Адриен Морис, 25, 150, 289
Дисметрия (боязнь математики), 316, 318–320
Длина Планка, 202, 279–281
Дни недели, 40, 41
Дрейк, Франк, 111
Дроби, 72
Дэвис, Реймонд, 218–219

Египетские боги, 76
Единицы длины, 66, 67

Женщины, в физике, 36

Загрязнение, 103
Закон Хаббла, 51, 52
Законы движения планет Кеплера, 43–46
Законы сохранения, 164
Земля, антинейтрино из радиоактивного распада, 192–193
— атмосфера, 98–99
— возраст, 98–99
— вулканы, 98
— нагревание радиоактивным распадом, 98–99, 192

ИКАС (инфракрасный астрономический спутник), 96
Изотопический спин, 166, 168, 198
— мультиплеты, 165
Изотопы, 131–132
— количество, 207, 208
— свинца, 98
Илиопулос, Джон, 159, 175, 189
Ио, 45
Ипсилон-частицы, *см.* Мезоны, ипсилон
Иррациональные числа, 72–73
Иттрий, 133

Калибровочная инвариантность, 241–242, 252, 257–258
Калибровочная теория, 20
Калибровочные взаимодействия, 172, 227

Каллисто, 45
Кант, Иммануил, 49, 97
Каон, *см.* Мезон, *K*
Картон, Эли, 285
Квазары, 75, 82–85
Квантовая гравитация, 203–205, 279, 281
Квантовая механика, 119, 121, 129, 134, 161, 266
Квантовая теория поля, 266
Квантовая хромодинамика, 20, 27, 118, 123, 132, 140, 143, 157, 199, 203–205, 227, 239–245, 267, 269, 294
— асимптотическая свобода, 245–247
— поляризация вакуума, 246–248
Квантовая электродинамика, 140, 150, 227, 240–241, 243, 266–267
Квантовые числа, 164
Кварки, 20, 23, 25, 30, 33, 58–59, 94, 114, 118, 120, 123, 132, 137–139, 143, 145, 148, 156–157, 159, 161, 163, 165, 167–170, 172–177, 183, 187–190, 198–201, 204, 234, 236, 239, 241–245, 247–249, 253–257, 260, 267, 278–279, 284, 289
— *b*, 139, 275, 282, 287
— *t*, 123, 139, 275, 282, 287
— аромат, 183, 185
— дробный заряд, 243, 255, 257
— очарованный, 24, 114–115, 139, 145, 159, 169, 175, 177, 182–183, 185–190, 200, 234, 275
— прелестный, 139, 145
— происхождение названия, 156–157, 188
— странный, 138, 156, 200, 275
— цвет, 183
Кварковая модель, 20, 160
Кельвин, (лорд) Уильям Томсон, 205
Кеплер, Иоганн, 43–45, 48
Клайн, Дэвид Б., 183
Когут, Джон, 172
Коккони, Джузеппе, 92, 109
Константы связи, 227, 241, 249, 254, 258, 260
Коперник, 42–43
Космические лучи, 144–145, 191
Космическое фоновое излучение (3 градуса), 88, 113–114
Космологический принцип, 55, 85
Космология, 113, 129, 194, 216–217, 220, 265, 278–279
Коста, Питер, 29
Красное смещение (галактик), 52–54
Кронин, Джеймс В., 286
Кси-частицы, 136, 188
Кюри, мадам, 192

Лаборатория им. Ферми, 293
Лавуазье, Антуан Лоран, 120–121, 141
Леверье, Урбен, 47
Ледерман, Леон, 31, 138
Лептон-кварковая симметрия, 200
Лептоны, 114, 120, 123, 137–138, 152, 159, 163–164, 174, 188–189, 199, 241, 247–248, 254, 275, 284, 295
Литий, 58
Ловелл, Персиваль, 48, 94
Логарифмический масштаб, 57–58
Луна, 41, 45
Лямбда-частица, 166, 168, 184, 188

Магнитные моменты, 231
Магнитные монополи, 25, 257, 272, 289
Майани, Лучано, 159, 175, 189

Максвелл, Джеймс Клерк, 25, 76, 119, 265, 267, 274
Маленький Зеленый Человечек, 110
Мальтус, Томас Роберт, 104
Манн, Альфред, 183
Манхэттенский проект, 34
Маркони, Гульельмо, 77–78
Марс, 47, 94, 97
Международная конференция по физике высоких энергий (Лейпциг, 1984 г.), 27
Международный комитет по будущим ускорителям, 304
Мезоны, 132, 137, 144–145, 151–152, 157, 164, 166, 170, 176, 182, 188
— ϕ, 179
— K, 129, 169, 175, 235
— ипсилон, 275, 293–295
— пи, 151–152, 155, 170–171, 184, 191, 198, 296
Менделеев, Дмитрий Иванович, 131–133, 196–197
Меркурий, 47
Местная группа (галактик), 86
Метрическая система, 67, 68
Метродор, 92
Механика, Ньютона, 46–48, 119
Миллер, Стэнли Л., 99
Млечный Путь, 39, 45, 48, 75, 85–86, 97
Мозли, Генри, 124, 293
Моррисон, Филип, 92, 109
Мюонное нейтрино, *см.* Нейтрино, мюонные
Мюоны, 114, 129, 138, 145, 163, 171, 184–185, 191, 276

Нарушение четности, 145, 212, 253
Небесная сфера, 40
Нееман, Юваль, 122, 135, 137, 165, 171, 187, 209
Нейтральные токи, 140, 175, 230, 233–235, 251, 253–254, 268, 274, 286
Нейтринная астрономия, 191
Нейтрино, 117, 119, 129, 135, 138, 143, 145, 152, 160, 174–175, 183, 185, 191, 200–201, 219–220, 248, 253, 255, 268, 276, 287
— масса, 235, 272
— мюонные, 114, 138, 163, 175, 185, 189
— осцилляция, 235, 272
— от сверхновой звезды 1987a, 220
— спин, 247
— тау, 114
— электронные, 114, 138, 163, 185, 189
Нейтроны, 122, 132, 135, 137, 149–150, 155–156, 163
Немезида, 24, 48
Нептун, 47–48
Нептуний, 48
Несветящаяся материя, *см.* Темная материя
Нисеты, 42
Нобелевские премии (американские), 315
Нобелевские премии по физике, 33–34, 89
Новый Галактический Каталог (NGC), 82
Нуклоны, 119, 123, 152
Ньютон, Исаак, 45, 46, 148

ОМЗ (очарованные массивные частицы), 220–221
Обозначение через степени десяти, 64
Образование математика, 318–320

— наука, 315–317
— физика, преподавание, 31–32, 131, 316
Обращение времени, 115–116
Объединенная теория поля, 274–276
«Один, два, три, бесконечность» (Гамов, 1947 г.), 119, 135
Омега-минус частица, 136, 145, 169, 188, 198, 209
Острова Вселенной, 49
Относительность, 119, 129, 162, 266
Очарование, 19, 24, 148, 159–161, 163, 175, 182, 295

ПВЗР (Поиск внеземного разума), 111
Парадокс Олберса, 55
Парниковый эффект, 75–76, 97
Паули, Вольфганг, 152, 164–165, 191
Пензиас, Арно, 75, 89
Перенаселение, 104
Перенормируемость, 231–233
Периодическая таблица, 121–122, 131–132, 134
Периоды жизни, 56–58
Перл, Мартин, 139
Перселл, Эдуард, 25, 110–111
Пи, 64, 73
Пиблс, П. Дж. Э., 89
Пионы, *см.* Мезоны, пи
Планеты, 41–42
Плутарх, 42
Плутон, 48, 94
Плутоний, 48
Позитроны, 144, 150, 255
Политцер, Дэвид, 177, 247
«Поминки по Финнегану» (Джойс), 156
Постоянная Хаббла, 52–54
Правило Цвейга, 177, 179
Прелестный кварк, *см.* Кварк, b
Принцип запрета Паули, 152, 164–165, 169
Природные ресурсы, истощение, 106–107
Проект Озма (ПВЗР), 111
Промежуточные векторные бозоны, 20, 158, 174, *см. также* W- и Z-частицы
Протоны, 122, 132, 135, 137–138, 144, 149–151, 156, 158, 163–164, 276
— распад, 191, 227, 235, 240, 260–261, 270–271, 286–287
Протопланетные диски, 96
Пси-частица (мезоны), *см.* J/ψ-частица, Мезоны
Пузырьковые камеры, 23
Пульсары, 109

Раби, Изидор, 138, 204
Радар (радио-обнаружение и установление дальности), 79
Радиоактивность, 115, 149, 192
— распад, 97–98, 192
— счет времени по, 97–99, 192
Радиоастрономия, 79, 111
Радиоволны, 78
Радиогалактики, 79–84
— Cygnus A, 79, 80
— M82, 82
— M87, 82
Размеры, единицы измерения, 66
Райт, Томас, 97
Ранняя Вселенная, 61
Рассеяние альфа-частиц, 144
Расстояние, логарифмический масштаб, 68, 69
Рациональные числа, 72

Резерфорд, Эрнест, 121, 125, 163, 192, 197
Рейган, Рональд, 34
Рентгеновские лучи, 124
Римская католическая церковь, 42–43
Рихтер, Бертон, мл., 176, 177
Рост народонаселения, 104, 106
Руббиа, Карло, 117, 140, 143, 145, 183

СВМЧ (слабо взаимодействующие массивные частицы), 220
Салам, Абдус, 34, 117, 174, 274
Самиос, Николас П., 136, 183, 190
Сатурн, 47
Сахаров, Андрей, 116, 286
Сведение к абсурду (*reductio ad absurdum*), 72–73
Сверхновая звезда, 45, 100
— 1987a, 219–220
Сверхновая звезда Кеплера, 45
Сверхновая звезда Тихо, 45
Сверхпроводящий супер коллайдер, 23, 34, 125, 146, 222, 293–313
— изучение начального проекта, 307
— магниты, 307–309
— международное сотрудничество по, 309
— причины создания, 296–300, 302–304
— проблемы, 300–301
— проект, 304–308
— спин-оф от, 301–302
— стоимость, 310–313
Сверхскопление Девы, 86
Сверхтяжелые атомы, 289
Свет, 62–64
Силовые частицы (переносчики), 117, 284
Сильное взаимодействие, 20, 117, 140, 151, 158, 163, 172, 199, 274, 278–280, 294
Система Коперника, 42–43
Система Птолемея, 41
Сицци, Франческо, 46
Скандий, 133
Скорости, логарифмический масштаб, 68–70
Слабые взаимодействия, 117, 158, 163, 174, 189, 247–249, 251, 268, 275, 278–280
Созвездие Девы, 86, 90
Созвездия (звезды), 39
Солнце, 217–218
— генерирование энергии, 217
— нейтрино от, 218–219
— эволюция, 217
Соль, симметрии, 251–253
Специальные унитарные группы, *см. SU*-группы
Спиновый момент, 164, 168–169
Спонтанное нарушение симметрии, 251–254, 257, 260, *см. также SU*-группы и теория великого объединения
Стандартная модель, 38, 118, 146, 203, 227, 282, 302, *см. также* Теория великого объединения
Станфордский центр линейного ускорения частиц (SLAC), 20, 24, 294
Статистика Бозе – Эйнштейна, 164, 169
Статистика Ферми – Дирака, 164, 169
Стейнбергер, Джек, 138
Стоней, Джордж Джонстоун, 25
Странность, 148, 166, 168–169

Странные частицы, 135, 138, 156, 198, 296
Субатомная физика, 29, 33
Супермультиплеты, 165, 169, 176–178, *см. также* адроны
Суперструны, 205–206, 281–282
Сусскинд, Леонард, 172

Танг, 23
Таоны, *см.* Тау-частицы
Тау-лептоны, 114, 139, 145, 185, 236, 276, 282, 294–295
Тау-нейтрино, *см.* Нейтрино, тау
Темная материя, 203, 220–221
Теория Всего, 213, 281–282
Теория великого объединения (GUT), 131, 227, 268–273, 276, 284–289
Теория электрослабых взаимодействий, 20, 27, 118, 132, 140, 143, 146, 158–159, 174, 203, 212, 227–236, 268, 294
— история, 228–235
— перенормируемость, 231–233
— правила отбора, 235
Термодинамика, второй закон, 115
Тефлон, 23, 34
Тинг, Сэмюэл, 176, 189
Торий, 97, 100
Трансцендентные числа, 73–74
Третий Кембриджский каталог (3C Catalog), 82
Туманность Рака (M1 или NCG 1952), 82
Тэватрон II, 293

Углы Вайнберга, 240, 254, 284, 287
Уилкинсон, Денис, 199
Унитарная симметрия, 234, *см. также SU*-группы
Уран (планета), 47–48
Уран (химический элемент), 34, 47, 97, 100
Ускорители, 195, 235, 296, *см. также* сверхпроводящий супер коллайдер
Ученые, ответственность за создание оружия, 321

Фермионы, 123, 164, 279
Физика высоких энергий, *см.* Физика элементарных частиц
Физика частиц, *см.* Физика элементарных частиц
Физика элементарных частиц, 113, 124, 129, 148, 194–196, 216–217, 265, 278–279, 316–317
Физика, федеральный бюджет на, 311
Фитч, Вал Л., 286
Фотоны, 117, 124, 140, 150–151, 157, 172, 255, 274–275

Хаббл, Эдвин, 49–54
Хазард, Сирил, 82
т'Хоофт, Герардус, 174

Цвейг, Джордж, 156, 167, 188, 198
Цвет, 20, 146, 157–158, 163, 170–175, 242–245, 255, 267, 270
Целые числа, 71–73
Центр Галактики, радиоизлучение, 79
Цирконий, 133
Цицерон, 42

Чармоний, 19, 160, 177, 179, 180, 182, 199, *см. также* J/ψ-частица
Черные дыры, 81
Числа, 64, 66

Шапиро, Ирвин, 54
Шварц, Мел, 138

Швингер, Юлиан, 174
Шмидт, Мартен, 84

Эвен, Гарольд, 111
Эйнштейн Альберт, 31, 33, 81, 266, 271, 274
Экванты, 41–42
Эксперимент Миллера – Юри, 99
Эксцентрическое движение, 41–42
Электромагнетизм, 76, 117, 119, 139, 148, 157–158, 163, 172, 174, 265–266, 274
Электромагнитное излучение, 62, 64, 150
— проникновение сквозь атмосферу Земли, 77
— радиоволны, 77
Электрон-позитронная аннигиляция, 19
Электронное нейтрино, *см.* Нейтрино, электронное
Электроны, 25, 114, 119–121, 135, 138, 143, 148, 150–152, 158
Элементарные частицы, 204, 212
— классификация, 152
— количество, 141, 187, 209
— определения, 154, 155, 295
— периодическая таблица, 211
Элементы, количество известных, 206, 207
Энергетические ресурсы, 106–107
Эпициклы, 41–42
Эрозия, 104

Юкава, Хидеки, 144, 151, 174, 198
Юпитер, 45–47
Юри, Гарольд, 99

Ядерная катастрофа, 102–103, 321–323
Ядерная физика, 26, 122, 134
Ядерное разоружение, 321–323
Ядро, атомное, 131
Янский, Карл, 79

Глэшоу Шелдон Ли

Очарование физики

Дизайнер М. В. Ботя
Технический редактор А. В. Широбоков
Компьютерная верстка С. В. Высоцкий
Корректор М. А. Ложкина

Подписано в печать 29.06.01. Формат $60 \times 84^{1}/_{16}$.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,53. Уч. изд. л. 19,12.
Гарнитура Антиква. Бумага офсетная №1.
Тираж 1500 экз. Заказ №

Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»
426057, г. Ижевск, ул. Пастухова, 13.
Лицензия на издательскую деятельность ЛУ №084 от 03.04.00.
http://rcd.ru E-mail: borisov@rcd.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленных диапозитивов в ГИПП «Вятка».
610033, г. Киров, ул. Московская, 122.
