

В.П.Шелест

НОВЫЙ КРУГ

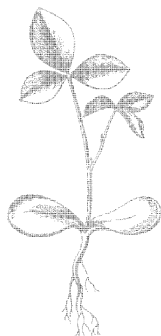


В.П.Шелест

◆
НОВЫЙ КРУГ
◆

(СТРУКТУРА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ)

МОСКВА АТОМИЗДАТ 1978



530.4
Шел.42
УДК 539.12 (023.11)

*Рисунки художника В. А. Гинюкова
и Димы Шелеста (13 лет)*

Шелест В. П.

Шел.42 Новый круг (структура элементарных частиц). — М.: Атомиздат, 1978.

144 с. с илл.

Уже много лет физики изучают на огромных и дорогих машинах-ускорителях мельчайшие частицы вещества, которые принято называть элементарными. Но оказываются эти частицы совсем не элементарными, а очень сложными. В последние годы стало ясно (в результате серии важных открытий экспериментаторов и работ теоретиков), что у «элементарных» частиц имеется неожиданно необычная структура, а разнообразие их намного больше, чем предполагали. Исследование этих новых явлений позволяет говорить о переходе в физике микромира на новый круг познания окружающего нас мира.

Из этой небольшой книги читатель узнает об открытиях 1974—1977 гг. в физике высоких энергий, о кварковых и партонных моделях, о «цветных» и «очарованных» частицах, об «огненных шарах» и о многих других моделях, фактах и теориях современной физики элементарных частиц.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся достижениями современной физики. Она будет интересна для студентов и аспирантов физических и смежных специальностей и учащихся старших классов физико-математических школ.

530.4

Ш 20402—103
034(01)—78 103—78

© Атомиздат, 1978

Наш Мир — не завершение —
Там — дальше — новый Круг —
Невидимый — как Музыка —
Вещественный — как Звук.
Он манит и морочит —
И должен — под конец —
Сквозь кольцо Загадки
Пройти любой мудрец.

Эмили Дикинсон

ВСТУПЛЕНИЕ

Эта книга ничему не научит.

Для понимания глубоких откровений природы надо писать либо читать монографии, где то, что отвоено экспериментом и теорией у незнания, изложено стальным языком формул. Статьи, доклады, а затем книги об этом, — сводки с бескровного фронта науки, с ее переднего края. Но они доступны только профессионалам. А между тем о том, что происходит сейчас в физике микромира, надо бы знать многим. Пожалуй, всем.

События, совершающиеся в последние годы в физике элементарных частиц (или, как говорят иначе, физике высоких энергий), очень серьезны. Серия значительных экспериментальных открытий и глубоких теоретических обобщений почти незаметно сформировала новый этап в нашем понимании структуры материи на ее наиболее фундаментальном (из достигнутых до сих пор) уровне. Мы хотим показать, как преобразилась за несколько лет в начале семидесятых годов картина этого мира.

Когда читатель возьмет эту книгу в руки, многое изменится, и будет сделано еще не одно существенное открытие. Не следует поэтому относиться ко

всему, что изложено здесь, как к абсолютной истине. Мы не можем угадать сегодня, куда приведут наметившиеся пути и какая именно картина составит из разрозненных штрихов. Перед читателем всего лишь моментальный снимок ситуации. Когда фотография делается врасплох, многое на снимке выглядит странно: — позы нелепы, черты лица могут быть искажены, рот раскрыт на полуслове. Но это — документ.

ГЛАВА

1

СТАРЫЕ ЗЕМЛИ НАУКИ

1. «БЕССТЫДНЫЕ УТВЕРЖДЕНИЯ ДЕМОКРИТА»

Истина все же, скорее, возникает из ошибки, чем из спутанности.

Ф. Бэкон

Древним натурфилософам многое было ясно. Для них было совершенно очевидно, например, что мир должен быть устроен просто. И вот, как сообщает Аристотель:

«...Фалес Милетский кладет в основу всего воду... С другой стороны, Анаксимен и Диоген ставят воздух раньше, нежели воду, и из простых тел его главным образом принимают за начало; Гиппас из Метапонта и Гераклит из Эфеса выдвигают огонь, Эмпедокл — четыре элемента, к тем, которые были названы, на четвертом месте присоединяя землю...»

Немного неприятно, конечно, что среди мудрецов нет полного единодушия относительно основ мироздания...

Индийские философы школы вайшешика несколько позже, уже в раннем средневековье, не стесняли себя до такой степени в количестве первоэлементов и считали, что «субстанция бывает девяти видов: земля, вода, огонь, воздух, эфир, время, пространство, душа и ум». Если этих элементов недостаточно для полного описания мира, то мудрецы вайшешика предлагают в дополнение к ним и для расцветива-

ния картины еще и «качества» в количестве двадцати четырех:

«Осязание, вкус, цвет, запах, звук, количество, разъединение и соединение, величина, определенность, отдаленность и близость, а также способность распознавания, удовольствие и страдание, желание, добродетель и порок, усилие, впечатление, неприязнь, вязкость, тяжесть, текучесть и скорость — таковы качества...»

И так далее.

На этом философско-прейскурантном фоне очень привлекательно выглядит Анаксимандр, который, по свидетельству Симплиция (сочинения самого Анаксимандра не сохранились),

«говорит неопределенно о теле, лежащем в основании, называя его *апейроном* и не определяя его по виду ни как огонь, ни как воду, ни как воздух...»

Если добавить еще, что, по мнению Анаксимандра, «у апейрона нет начала», «движение вечно», «из беспредельной природы рождаются все небеса и все миры в них» и т. д., то возникнет желание познакомиться поближе с учением этого натурфилософа — очень уж разумным кажется его подход. Может быть, он-то и знал истину? Ну что же, давайте на выбор откроем страницу трактата Аэция, где говорится, что

«...по учению Анаксимандра, первые живые существа возникли во влажном месте. Они были покрыты чешуей с шипами. Затем они вышли на сушу, их чешуя лопнула, и вскоре они изменили свой образ жизни».

Сделаем скидку на наивность изложения, простительную для эпохи детства человечества. Но чем не идея эволюции? И хотя приведенные рассуждения не имеют отношения к строению материи, что нас

сейчас непосредственно занимает, доверие к Анаксимандру укрепляется.

С приятным сознанием того, что мы черпаем из древнего кладезя истины, читаем далее:

«Анаксимандр считал, что Земля по своей форме цилиндрична, и что ее высота равна трети ширины», —

т. е. имеет форму коробки от торта.

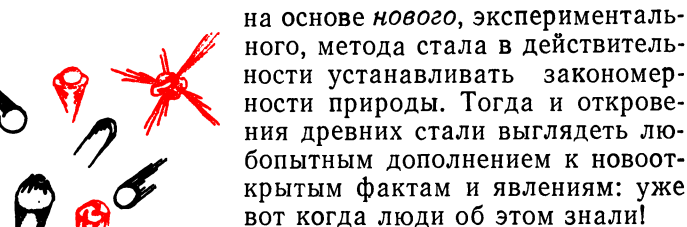
Ошибся Анаксимандр, видимо... Ничего. Дальше читаем: «По Анаксимандру, Солнце равно Земле». Снова ошибся. Может быть, и это простим ему? Оставим правильное, а отбросим неверное?

Нет. Ведь мы только сейчас знаем (по-настоящему знаем), что правильно, а что нет, и с высоты нашего накопленного знания можем выставлять оценки. А относительно древних натурфилософов придется, наверное, присоединиться к мнению Джона Бернала:

«Этот абстрактный и априорный подход неизбежно оказался гибельным для науки. Он вел поколения мыслящих людей к убеждению в том, будто они уже разрешили проблемы, которые еще даже не начали изучаться».

Догадки даже лучших мыслителей античности о конкретных деталях строения материи так и остались поэтому догадками и предположениями и мертвым грузом лежали почти две тысячи лет. До того времени, когда *новая наука*





Но не знали великие греки, китайцы и индийцы о строении материи более того, что знал сказочник русский о динозаврах (Змей Горыныч) и аэродинамике (коввер-самолет), а сказочник арабский — о роботах и ЭВМ (волшебная лампа Аладдина)... Твердо усвоив это, скажем все же, по традиции, об атомистических догадках античности, которые считаются наиболее древним выражением идей о структуре и делимости материи. Как изящно изъяснялся Цицерон:

А далее, — молчание почти в два тысячелетия. Только в прошлом, девятнадцатом, столетии фронт науки (не натурфилософии!) подошел вплотную к проблеме строения материи.

2. НА ПОДСТУПАХ К ТИГРОВОЙ ПЕЩЕРЕ

Подумать только, что на том огне, который Прометей украл у бога, сожгли Джордано Бруно.

Ст. Ежи Лец

Для очистки совести немного уточним наши предыдущие утверждения. Когда рушилась вера в непогрешимость системы Аристотеля и рождалась современная наука, атомистические воззрения Демокрита были заново открыты в древних античных и арабских рукописях. Провансальский священник Гассенди в XVII веке говорил об атомах на новом языке физики: это были частицы, обладающие массой и инерцией, и двигались они в пустоте, принципиальное существование которой было доказано опытами последователей Галилея.

Картина стала существенно более стройной, но, увы, снова все было на уровне откровения... Ибо если Гассенди весьма убедительно возвещал атомизм, то не менее красив был образ мира, заполненного вихрями, как учил Декарт.

Делом научной совести каждого естествоиспытателя было верить Гассенди или следовать за Декартом. Не было возможным задать природе в то время прямой вопрос — кто прав?

«Не забравшись в логовище тигра, не поймает тигренка» — гласит древняя китайская пословица. Как разъясняет один китайский же автор: «Если хочешь получить знания, то участвуй в практике, изменяющей действитель-



ность. Если хочешь знать вкус груши, то тебе нужно ее изменить — пожевать ее. Если хочешь узнать строение и свойства атома, то тебе нужно провести физические и химические опыты, изменить состояние атома...»

Но до этого было еще очень далеко.

Ньютон, изучавший корпускулярные проявления света, верил в атомизм и разработал модель атома, состоящего из корпускул, которые находятся внутри более крупных агрегатов, вновь сцепленных друг с другом. Так в логических построениях Ньютона впервые возникла модель, которая до сих пор, как беспокойный призрак *дурной бесконечности*, маячит перед физикой микромира: фундаментальные кирпичики, из которых построен мир, сами построены из еще более фундаментальных кирпичиков, и так далее — до бесконечности, очень унылой... Мы будем еще много говорить об этом. И вместе с тем вдохновляющее влияние грандиозной ньютоновской картины мира привело, наконец, к решающему шагу в истории атомистической мысли — опытной проверке.

Школьный учитель из Манчестера Джон Дальтон занимался в начале века изучением свойств газов. Исходил Дальтон из ньютоновских начал и стремился объяснить эти свойства взаимным отталкиванием атомов (существование которых, однако, никем еще не было доказано). Строгие количественные измерения масс различных газов (закиси азота, окиси азота, перекиси азота) дали ему в руки надежные данные о кратности этих масс определенным числам. А это, по справедливому рассуждению Дальтона, и свидетельствовало о том, что химические соединения складываются из некоторых первичных элементов — атомов...

Интересно, что сразу же с рождением научного

атомизма возникли представления о сложности атомов (в отличие от идеи древних, которые сформулировали свое отношение к атомам придуманным ими названием: *атом — неделимый*). В самом деле, атомные массы различных элементов оказались приблизительно кратными. Отсюда лондонский врач Праут сделал вывод, что все элементы построены из атомов самого легкого элемента — водорода.

Как мы знаем, это утверждение (неверное, конечно, для атомов) в общем-то справедливо для ядер...

Структурность атомов и закономерности их внутреннего строения в XIX веке очень полно были отражены в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Атомы сложны, вероятно, делимы. С этим убеждением естествоиспытатели подходили к великой научной революции на рубеже веков прошлого и нынешнего.

Не будем подробно следить за стремительным прогрессом науки о микромире в следующие годы и десятилетия. Этому посвящено много отличных книг. Перенесемся в 30-е годы XX века. Как выглядела установленная к тому времени картина строения материи?

Уровень атома оказался давно пройденным, и картина ядра, окруженного электронами, заняла привычное место в школьных учебниках. Уже были открыты некоторые (основные) элементарные частицы. Их было немного, и излюбленным занятием была раскладка пасьянсов, с помощью которых физики желали построить полный и эстетически привлекательный план мироздания. Увы, попытки эти были обречены на тот же исход, что и намерение написать энциклопедию с помощью трех или четырех букв алфавита.

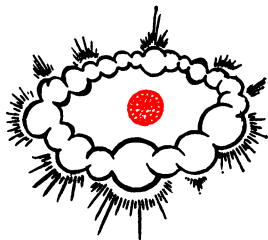
Но пора познакомиться подробнее с некоторыми основными героями нашего дальнейшего рассказа.

Электрон. Это — первая открытая элементарная частица. Живет вечно, если только не столкнется со своим антиподом (античастицей) — позитроном. Тогда дело закончится скверно для обеих — произойдет *аннигиляция*. Слово это вызывало священный ужас у некоторых философов еще двадцать — тридцать лет назад, ибо означает оно не что иное, как *превращение в ничто*. А, как мы знаем, материя в ничто не обращается. Разумеется, не происходит это и в нашем случае электрон-позитронной аннигиляции, несмотря на зловещее значение термина. Напротив, процесс аннигиляции, как мы увидим в дальнейшем, приводит к невероятно богатым следствиям — рождению целых россыпей частиц и античастиц, новых и давно известных...

Начав говорить об элементарных частицах, мы вынуждены были немедленно ввести и понятие античастиц. Существование в нашем мире частиц и античастиц следует из симметрии основных уравнений, которыми этот мир описывается. Если существует какая-либо частица с отрицательным электрическим зарядом, то должна существовать частица с такой же массой и зарядом, равным по величине, но противоположным по знаку... Так и оказывается на самом деле. Только сказанное выше надо понимать немного шире: измениться должен не только знак электрического заряда, но и знаки *всех* зарядов, которые окажется нужным приписать элементарной частице. В то время, о котором мы говорим (середина тридцатых годов), была открыта только одна античастица — античастица электрона — *позитрон*.

Электроны, как было уже надежно установлено, существуют вокруг ядра атома на орбитах, предписанных им законами квантовой механики. Согласно этим же законам, существование их не может быть

передано вполне точно привычными нам словами: «вращаются», «передвигаются» и т. д. Электрон с какой-то долей вероятности присутствует одновременно во всех областях пространства вокруг ядра, где ему не запрещено быть.



Картинка ядра, окруженного пересекающимися орбитами электронов, которую мы имеем удовольствие видеть в тысячах мест — от кафе-мороженого до эмблем издательств — конечно, нестрога, что не мешает успешной деятельности этих учреждений. Точнее будет, если мы представим себе шевелящееся и переливающееся вокруг ядра ожерелье, которое и соответствует электрону...

Заглянем теперь внутрь ядра. После опытов Резерфорда стало известно, что ядро, занимающее очень и очень малую часть объема атома, содержит в себе большую часть его массы. Ядро легчайшего из атомов — атома водорода — содержит одну частицу, и очень важную, — протон.

Протон. Атом электрически нейтрален. У атома водорода имеется один электрон. Стало быть, чтобы скомпенсировать заряд электрона, необходимо предположить, что электрический заряд протона равен заряду электрона и противоположен ему по знаку. Это и имеет место. И в ядрах атомов других элементов оказывается ровно столько протонов, сколько нужно, чтобы скомпенсировать заряд электронов, находящихся на орбитах (будем говорить привычным языком) вокруг этого ядра. Но в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева от клеточки к клеточке количество электронов на внешних орбитах увеличивается ровно на один. Именно

это изменение количества электронов и приводит к периодическому изменению химических свойств элементов. Тогда, казалось бы, и атомная масса элементов должна увеличиваться с той же регулярностью на единицу атомной массы, т. е. на массу одного протона, при переходе к каждому элементу. Значит, гелий должен весить вдвое больше водорода (атомная масса примерно два); литий, третий по счету элемент, должен иметь атомную массу три и так далее. Обратившись к эксперименту с надеждой получить подтверждение нашего вывода, мы испытаем горькое разочарование: атомная масса гелия будет четыре, а лития и вовсе семь. Дальше пойдет совсем скверно: атомная масса элементов будет стремительно обгонять их порядковый номер в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева (совпадающий с числом протонов в ядре). Однако разочарования в науке ведут не к унынию, а к открытиям.

Так и здесь: описанная ситуация заставила предположить, что в ядре кроме протонов существует еще один вид частиц.

Нейтрон. Этих нейтральных частиц в ядре столько, сколько нужно для приведения в соответствие с экспериментом атомной массы элемента: в гелии — два, в литии — четыре и так далее. Если бы нас преимущественно интересовали вопросы ядерной физики, то мы бы подробно стали говорить здесь об изотопах (ядрах с разным числом нейтронов при одинаковом содержании протонов). Но для нас важнее другое: нейтрон практически ничем не отличается от протона, кроме отсутствия электрического заряда. Конечно, отсюда будут следовать изменения и в других свойствах, связанных с электромагнетизмом, — в магнитном моменте и др. Схожесть протона и нейтрона — близость их масс (почти совпаде-

ние), свойств их взаимодействий с другими частицами — позволяет впервые объявить об установлении *семейства* элементарных частиц.

Пока что это — небольшое семейство всего из двух членов. Но лиха беда начало. В дальнейшем мы познакомимся и с гораздо более многочисленными семействами.

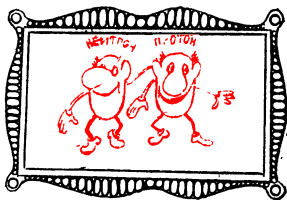
Протон и нейтрон настолько близки друг другу, что их принято считать двумя разными состояниями одной частицы — *нуклона*.

Фотон. Наше перечисление частиц, конечно, было бы совершенно неполным, если бы мы не упомянули частицу света — *фотон*. Как и положено частице света, фотон движется со скоростью света. Массы покоя он не имеет (и в покое принципиально находиться не может). Мир атомов заполнен фотонами, которые излучаются при столкновениях, торможениях, перескакивании электронов с орбиты на орбиту. Фотоны различной энергии, а значит, разного цвета, обязательно входят в последовательное рассмотрение микромира. Зарядов у них никаких нет, и фотон может считаться собственной античастицей.

Это — не все частицы, которые были открыты или предсказаны к концу тридцатых годов; но о других мы скажем позже. Итак, мир атома, а затем и атомного ядра начал изучаться всерьез.

Люди вошли в тигровую пещеру.

Ядерная физика стала наукой политической — дорогой, серьезной и секретной. Когда кроме бомб физики научились использовать ядерную энергию и для мирных, скажем энергетических, целей, когда заработала Первая в мире атомная электростанция в Обнинске, физики стали собираться на Женевские



конференции по мирному использованию атомной энергии, секретности поубавилось и ядерные исследования стали все более уходить из области чистых исследований в технологию.

В эти годы физика элементарных частиц впервые четко отделилась от ядерной физики. Стало ясно, что для глубокого изучения все новых частиц та энергия, которая использовалась при изучении ядра, уже недостаточна.

Физика элементарных частиц становилась физикой высоких энергий. Пока что эта наука не привела к столь поразительным практическим результатам, как ее предшественница — физика атомного ядра. Но такие открытия могут быть совершены в любой момент. И сегодня, когда человечество начинает медленно, наощупь, выбираться с минного поля ядерного противостояния, не лишним будет напомнить: осторожно! академические, или чистые, или абстрактные, исследования — это потенциально самое опасное из всего, что научились делать люди.

3. ЗООПАРК 50-х ГОДОВ

Очень мало людей предвидело в XIX-м веке, что потом наступит век XX-й.

Ст. Ежи Лец

Прошло двадцать лет. К 60-му году мир известных элементарных частиц возрос чрезвычайно. Чтобы понять, что происходило дальше, нам необходимо привыкнуть к этому необычному миру.

Будем ли мы рассматривать каждую из новооткрытых частиц, а их к тому времени было известно около двухсот, по-отдельности? Да нет, разумеется; это невозможно, да и довольно скучно.

Редко кто, придя в зоопарк, тщательно осматривает всех без исключения парнокопытных, входя в детали строения их жевательного аппарата и системы пищеварения. Это — дело специалистов.

Мы же будем, как это обычно делает рядовой посетитель зоопарка, смотреть на тех зверей, которые по каким-либо причинам нам понравятся. И еще, будем стремиться не пропустить ни одного важного семейства зверей, чтобы нам не показалось, что все животные похожи, скажем на белку. Есть ведь и крокодилы.

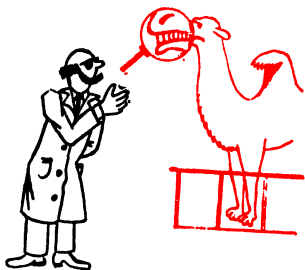
По какому же признаку будем мы объединять частицы в группы и семейства? Вопрос этот задавали себе физики уже много лет. Но когда частиц много — важно не только, каковы они, но и то, как они взаимодействуют между собой.

Значит, наших зверей будем делить на хищников, травоядных и так далее...

Итак, типы взаимодействия. В природе их существует, к счастью, не очень много — всего четыре.

Взаимодействие гравитационное связано со всемирным тяготением. Подвержены этому взаимодействию все частицы.

Однако эта сила, движущая в космосе мирами, в микромире оказывается очень-очень слабой. настолько слабой, что при расчете даже наиболее тонких эффектов ядерной физики и кван-





товой электродинамики ею можно полностью пренебречь. Обычно при этом добавляют: стало быть, в мире элементарных частиц гравитация роли не играет. Вероятно, не следует связывать себя такими категорическими утверждениями. Многие указывают на то, что, напротив, в глубинном строении элементарных частиц гравитационные взаимодействия могут играть чрезвычайно важ-

ную роль. Но окончательное решение этого вопроса — дело будущего: нужны значительно более мощные ускорители, более высокие энергии, более изощренный эксперимент.

Гравитационное взаимодействие — самое старое из известных нам. Проявления его наблюдал и использовал еще неандерталец, сталкивавший камень на попавшего в западню мамонта, а в надежную сферу научного эксперимента гравитация была введена Ньютоном еще в XVII веке.

Следующая фундаментальная сила — *электромагнетизм*. Простые проявления электрических и магнитных сил, известные с древности, в XIX веке были выстроены в последовательную и самосогласованную систему трудами прежде всего Фарадея и Максвелла. Последовавшее в конце века открытие электрона (как мы уже знаем, первой элементарной частицы) и фотона — кванта электромагнитного взаимодействия — в принципе завершило построение картины электромагнитных взаимодействий.

Этот тип взаимодействия гораздо сильнее гравитационного и играет весьма существенную роль в микромире. Дело в том, что в формулу для грави-

тационной силы входит масса объекта, которая для элементарных частиц, естественно, очень мала. В формуле для сил электромагнитных (очень похожей по виду на такое же выражение для гравитации) вместо массы стоит электрический заряд, весьма существенный в масштабах атомных и ядерных явлений.

Конечно, электромагнитные силы, хотя и сильнее гравитационных, но имеют гораздо более ограниченную сферу влияния: между электрически нейтральными частицами этого взаимодействия не существует. Два типа фундаментальных взаимодействий — гравитационное и электромагнитное — известны людям очень давно. И связано это не только с силой таких взаимодействий, но и с их, как принято говорить, дальностью действия. Строго говоря, вокруг тела, обладающего массой (или электрическим зарядом), создается поле, которое не исчезает даже на сколь угодно больших расстояниях. Авторучка, лежащая на столе читателя, своим полем гравитации воздействует даже на самые отдаленные галактики. Легко понять, однако (и расчет весьма убедительно показывает нам это), что такое воздействие не чрезмерно велико...

Два других типа взаимодействия заведомо не могли быть открыты современниками Лукреция Кара или даже Ньютона. Они проявляют свое воздействие лишь на очень малых внутриядерных расстояниях. Для того чтобы открыть эти взаимодействия, необходимо было проникнуть внутрь атомного ядра. Такая возможность появилась только в наше время.



Два типа взаимодействия, о которых мы говорим, — так называемые сильное и слабое.

Сильное соответственно своему названию и есть самое сильное среди всех четырех типов. Оно связывает ядерные частицы в ядре, и именно благодаря ему высвобождается при делении ядра та могучая энергия, которую принято называть *атомной* (или ядерной). Почему же в нашей обычной жизни мы не замечаем этой мощной силы? Потому что ее действие не выходит за пределы расстояний порядка атомного ядра, а дальше очень быстро уменьшается (практически до нуля).

Когда мы говорим о силе или слабости взаимодействий, следует постоянно помнить об этом их свойстве — короткодействии или дальнодействии. Если поместить две ядерные частицы (да еще электрически заряженные) на расстоянии, равном примерно их собственным размерам, то сильные взаимодействия будут действительно наиболее сильными; следующим по величине фактором окажутся взаимодействия электромагнитные и, наконец, гравитация будет пренебрежимо мала.

Если разнесем эти частицы в разные углы комнаты, и снова исследуем их взаимодействия, то места в этом соревновании распределятся уже по-другому: чемпионом окажется взаимодействие электромагнитное; гравитация, хотя она еще уменьшится по сравнению с предыдущим случаем, выйдет на второе место, а вот ядерное (или сильное) взаимодействие из-за своего короткодействия потерпит сокрушительное поражение, займет последнее место (хотя и призовое...).

Но у сильного взаимодействия есть и еще один серьезный дефект: оно существует далеко не между всеми частицами, а лишь между особо удостоенными этого качества. Такие, сильновзаимодействующие

щие, частицы принято называть *адронами* (от греческого слова, означающего сильный).

Из наших знакомых к адронам относятся нуклоны: протон и нейтрон. А вот электрон и фотон к аристократии адронов не причислены. И сколько их не сближай, ядерные силы между ними не проявятся.

Наконец, последний тип — взаимодействия *слабые*. Это очень странные взаимодействия. Они слабые, это верно, слабее ядерных и даже электромагнитных взаимодействий, но намного сильнее гравитации. Проявляются они лишь в глубоком микромире, как и сильные взаимодействия, но при этом слабые взаимодействия заняты в основном разрушениями.

Если распад какой-нибудь элементарной частицы запрещен законами, установленными нами при изучении остальных трех видов взаимодействий, то мы все же не можем быть спокойными за ее судьбу. Она живет, и живет довольно долго (по ядерным понятиям), потом неизвестно почему распадается, нарушая при этом такие красивые правила, которые мы уже были готовы взять в рамочку как абсолютный закон природы.

Так случается с нейтроном, который живет невероятно долго (больше десяти минут), а затем, не выдержав зловредного подрывного действия слабых сил, все-таки разваливается (или точнее говоря, исчезает, оставив вместо себя целые три новые частицы — протон, электрон и антинейтрино. Эти уже живут практически вечно...). Так происходит и в десятках других типов реакций.

Между прочим, нарушение законов, выведенных для одного типа взаимодействия, при учете другого типа — дело очень обычное. Больше всего ненарушаемых законов у могучего и строгого сильного взаимодействия. Так хищник в нашем зоопарке с вели-

чественным отвращением отвернется от предложенной ему зеленой травки. Бодрые и подвижные (дальнодействующие!) электромагнитные силы некоторые из этих законов готовы нарушить и нарушают.

Для подрывного слабого взаимодействия вообще почти никакой закон не писан — при учете слабого взаимодействия список строгих правил, которые применяются при расчетах и описании реакций элементарных частиц, сводится к весьма жалкому перечню. Спасибо хоть за то, что это взаимодействие слабое и нарушения законов тоже поэтому бывают не очень уж большими: можно учитывать их как поправки к законам сильных взаимодействий.

С другой стороны, слабые взаимодействия отличаются от сильных своим чрезмерным и неуместным демократизмом. Если круг адронов четок и строго определен, то слабое взаимодействие, напротив, проникает повсюду... Почти все частицы заражены им, поэтому неприятностей, связанных со слабыми распадами и переходами, можно ожидать постоянно...

До сих пор мы говорили о взаимодействиях, не задаваясь вопросом о том, как же именно, с помощью чего эти взаимодействия совершаются. А это — очень важный вопрос. Давно прошли те схоластические аристотелевские времена, когда считалось, что все движения происходят потому, что каждое тело стремится в исконно свойственное ему место — и никаких взаимодействий вообще не требуется для объяснения процессов в природе. Истории принадлежит уже и картина мира, построенная Ньютоном, в которой взаимодействия переносились через пустоту, и к тому же мгновенно. Если задуматься над этим, то покажется невероятным, что ньютонов мир казался обычным и единственно возможным. В самом деле, что может быть фантастичнее мгновенно-

го дальнего действия? Вы в Москве переставляете подсвечник, а приборы в Сиднее мгновенно замечают это. Кроме того еще, согласно ньютоновской схеме, никакого материального носителя между этими двумя пунктами, как и между материальными телами нет, — их разделяет холодная и абсолютная пустота.

Нет, это не только странно и непривлекательно, это, как показало дальнейшее развитие науки, просто неверно. Не существует на самом деле абсолютной пустоты, а мир заполнен физическими полями, кванты которых и переносят взаимодействие между телами...

В гравитации такой переносчик и поныне гипотетичен, из-за того что квантовая гравитация как последовательная наука не построена до сих пор. Войти в обсуждение и пояснение этой ситуации опасно для автора, так как разговоры о гравитации, кроме очаровательной увлекательности обладают также свойством неисчерпаемости... Поэтому, боясь бездны гравитационной премудрости, умолкаем здесь, заметив лишь, что ввиду своей теоретической недосказанности и двусмысленности частица — переносчик гравитации (гравитон), экспериментально, естественно, пока не обнаружена.

Совсем другая картина открывается нам в электромагнетизме. Здесь все классически ясно и в теории, и в эксперименте. Переносит электромагнитные взаимодействия наш старый приятель — фотон. Расчеты электромагнитных эффектов, сделанные на основе этой теории, исключительно точны, — пожалуй, это вообще максимальная точность, достигнутая современной наукой. И с неохотой покидаем мы милый сердцу физика (особенно — теоретика, оазис электромагнетизма, направляясь в более суровые «страны» сильных и слабых взаимодействий.

История открытия переносчика сильных взаимодействий весьма непростая. Еще в 30-х годах японский физик Юкава предсказал существование такого переносчика и даже приблизительно рассчитал его массу. Однако, как сказал Энгельс, «история без случайностей была бы мистикой». Частица с массой, близкой к предсказанной Юкавой, была быстро открыта, и столь же быстро оказалось, что она совершенно не годится для предписанной ей роли. Просто-напросто выяснилось, что новооткрытая частица (*мю-мезон*) в сильных взаимодействиях вообще не участвует, оставаясь абсолютно «равнодушной» и к протону, и к нейтрону...

С протоном, впрочем, *мю-мезон* как частица электрически заряженная взаимодействует по обычным законам электромагнетизма. И *мю-мезон* ведет себя совсем как электрон, только очень тяжелый. Зачем природе это расточительство — непонятно, но физикам она причинила немало неприятностей, пока не была открыта, наконец, истинная юкавская частица — переносчик сильных взаимодействий. Эта частица, *пи-мезон* (*пион*), была открыта гораздо позже *мю-мезона*. А еще позже были открыты и другие частицы с нужными (юкавскими) свойствами — *векторные мезоны*... Но не будем забегать вперед. Заметим лишь, что переносчики сильного взаимодействия открыты (и не один), открыты надежно и особых споров по существу у физиков не вызывают.

А вот со слабыми взаимодействиями дело обстоит в этом отношении похуже. Переносчика у них нет, пока есть только гипотезы. И хотя наука об этих «промежуточных», или дубль-вэ-частицах, как называют эти объекты, довольно хорошо развита и мы знаем много о том, какими они были бы, если бы существовали, экспериментаторы пока что не порадовали нас открытием дубль-вэ-частиц. Может быть,

их вообще нет. Это будет не изящно, неблагоприятно для многих расчетов и теорий, но в общем-то ничего катастрофического не произойдет... А природа, как известно, к трудностям теоретиков предельно безразлична.

Разобравшись в типах взаимодействия, мы можем двинуться от ворот нашего зоопарка вдоль его клеток. Мы уже кое-что будем понимать и узнавать.

4. СЛИШКОМ МНОГО!

Что такое Хаос? Это режим, уничтоженный при Сотворении Мира.

Ст. Ежи Лец

Первым мы видим фотон. В единственном числе он занимает целый класс в семье элементарных частиц. В любой таблице он записан под первым номером, и для нас он уже привычен.

Дальше встречается целое семейство... Это разные частицы — и тяжелые, и легкие, и совсем без массы — но у всех одно общее свойство: в сильных взаимодействиях они участия не принимают. Как мы уже можем сказать профессионально — они не адроны. Отвлекаясь на минуту, заметим, что профессиональный язык физиков-теоретиков, занимающихся элементарными частицами, с каждым годом становится все красочнее. Вот краткий обзор таких — вполне серьезных — терминов из области физики частиц: странность, очарование, призраки, струны, цветные частицы, заговоры, тюрьмы... Со многими этими понятиями мы познакомимся ближе. Вообще же, не усвоив хотя бы основной словарный запас профессионального жаргона, бывает очень трудно понять сущность проблем и открытий, сделанных в

какой-либо области науки. Конечно, это условие недостаточное, но очень часто необходимое.

Вернемся, однако, к нашему семейству частиц... И здесь уже не все ново для нас: среди этих частиц — лептонов, т. е. в переводе с греческого легких, — присутствуют электрон и его тяжелый двойник мю-мезон. Конечно, в этом же семействе, как всегда будет и впредь, присутствуют и соответствующие античастицы: позитрон и анти-мю-мезон. Да, мюонов было открыто два: положительный и отрицательный, один из которых является античастицей другого. Обычно принято считать частицей отрицательный мюон (по аналогии с выбором в качестве частицы электрона, имеющего отрицательный заряд). Но кроме этих «солидных» частиц с массой, легко обнаруживаемых экспериментально, замечаем в этом же вольере создания совсем другого рода: страшно быстрые (летят со скоростью света), легкие (наверное, вообще без массы) и всюду проникающие *нейтрино*. И антинейтрино, конечно.

Предсказанные еще в начале 30-х годов, эти частицы из-за своей неуловимости были экспериментально обнаружены лишь в середине 50-х, в мощных потоках излучения, идущего от ядерного реактора. Сейчас, когда экспериментальные возможности выросли неизмеримо, реакции, идущие с участием нейтрино, составляют большой раздел исследований в физике высоких энергий, и экзотичность, которой эти частицы были окружены многие годы, постепенно уступает место привычке.

Говоря до сих пор просто нейтрино, мы допускали большую некорректность. На самом деле двойники природы — электрон и мюон, — не ограничиваясь сходством своих взаимодействий, решили еще раз продублировать природу. Разделив сферы своего влияния, эти частицы завели каждая свое от-

дельное, персональное, нейтрино. Так они официально и именуются: *нейтрино электронное и нейтрино мюонное*. В тех процессах, где участвует электрон, может появляться нейтрино только его, электронное, и то же самое происходит с процессами мюонными. Итак, расточительность природы уже здесь начинает немного беспокоить нас: начиналось все с электрона; оказалось еще нужным нейтрино. Введение античастиц удвоило количество клеточек в таблице, а никому может быть ненужное существование мю-мезона еще раз выдало нам четверку. Итак, всего, вместе с фотоном, мы осмотрели уже девять элементарных частиц. Однако это еще только начало.



Переходим к следующему семейству нашего зоопарка и видим надпись: *мезоны*.

Известный нам мю-мезон, хотя и носит в своем названии этот термин, мезон не настоящий — мы уже знаем, что и открыт-то он был вместо настоящего, «добропорядочного» мезона, дело которого — переносить сильные (ядерные) взаимодействия. Вот эти-то «хорошие» мезоны и собрались под своей вывеской. Однако почему же мы употребляем множественное число? Разве и этих частиц не одна? Увы, их более чем достаточно... Пи-мезон (пион), о котором мы уже говорили в предыдущем разделе, является в трех ипостасях: пион положительный, пион отрицательный (античастица по отношению к положительному) и пион нейтральный (сам себе античастица)...

Кроме того, здесь же мы можем осмотреть (наберитесь терпения) следующих членов этого же, мезонного, семейства:

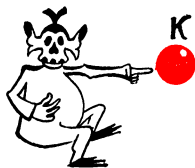
эта-мезоны, ро-мезоны, омега-мезоны, эта-штрих-мезон, дельта-мезон, фи-мезон, А-мезон, эф-мезон, А-два-мезон, Е-мезон, целое семейство К-мезонов, а также великое множество других, установленных не вполне достоверно или измеренных не вполне точно и не нашедших поэтому постоянного места в таблице.

Теперь очевидно, что мы должны отказаться от явно невозможной попытки поговорить хоть немного о каждой из элементарных частиц отдельно. Отныне будем лишь немногие из них удостаивать такого пристального внимания.

К числу подобных фаворитов надо будет, конечно, отнести *К-мезоны (каоны)*. Они были открыты несколько раньше, чем все остальные мезоны, перечисленные выше. Частиц тогда, в эти не очень отдаленные, но уже легендарные времена, было известно совсем немного, и каждую новооткрытую изучали с большой расстановкой и тщанием. Но не этим было вызвано огромное оживление, которым сопровождалось исследование К-мезонов. Частицы эти оказались необычными, странными какими-то. Они не желали рождаться, как все прочие: при достижении должной энергии просто возникать в реакции. Нет, К-мезоны не рождались до тех пор, пока энергия не возростала настолько, что ее уже хватало и на рождение анти-К-мезона. Вот тогда пара каон-антикаон и производилась на свет. Создалось впечатление, что у каона есть какое-то качество, с которым ему никак нельзя выходить на люди и которое надо прятать или как-то прикрывать, компенсировать. Вот если рядом находился антикаон, у которого то же качество было с другим знаком, то

все компенсировалось прекрасным образом.

Качество это физики, в память своих недоумений, назвали *странностью*, и говорят с тех пор без особых уже эмоций, что у K -плюс-мезона странность равна единице, а у K -минус-мезона — минус единица. Соответственные значения были приписаны и оставшимся членам этой семейки — K -нуль- и анти- K -нуль-мезонам.



Хорошо. Но вот представим себе, что откуда-то из космоса прилетел к нам каон. Странность у него пусть будет единица. Может ли он на что-нибудь распасться? А на что: на электроны, скажем, или на пионы, или на мюоны? Но ведь у этих частиц нет качеств, подобных каонам: парами им рождаться не обязательно и странность у них у всех поэтому — нуль. Значит, распадаясь на эти частицы, каон потеряет свое особое качество, свое *особое квантовое число* — странность. Возможно ли это? Или каон будет жить вечно из-за своей неспособности распасться?

Нет, не будет он вечно жить и в конце концов развалится на пи-мезоны в разных комбинациях. Но все эти распады будут происходить (по ядерным масштабам времени) весьма медленно. А это, как известно, признак того, что процесс идет через *слабые* взаимодействия.

Итак, слабые взаимодействия не сохраняют странность. И это — только один из примеров того разрушительного действия слабых взаимодействий — и по отношению к самим частицам, и по отношению к их законам, — о котором мы уже предупреждали.

И, наконец, мы обращаемся к самому многочисленному виду фундаментальных частиц — *барионам*. Слово это в переводе с греческого означает тя-

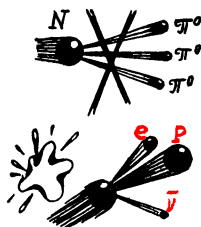
желые. Прежде, когда частиц было известно меньше, в самом деле *все* барионы были тяжелее *всех* мезонов. Но с тех пор и эта не бог весть какая, но все же закономерность оказалась нарушенной: многие тяжелые мезоны, открытые недавно, тяжелее самых легких барионов. Чем же тогда принципиально отличаются эти две группы частиц — мезоны и барионы?

Происходят не все возможные реакции с адронами, а только некоторые из них. А именно, обнаруживается вид частиц, которые могут переходить друг в друга, но не могут совсем исчезать из реакции. Эти-то частицы мы и называем барионами, и для выражения описанной особенности им приписываем неисчезающую величину — барионный заряд. В конце реакции сумма барионных зарядов должна быть точно такой же, что и в начале. Это простое требование оказывается довольно мощным.

Давайте рассмотрим пример. Убедимся, прежде всего, из таблицы элементарных частиц, что наши старые знакомые нуклоны (протон и нейтрон) — это барионы, причем самые легкие из известных. Нейтрон чуть тяжелее протона. Зная это, попробуем угадать — на что мог бы распасться нейтрон? (Из таблицы элементарных частиц известно, что он нестабилен).

Нам известна другая нейтральная элементарная частица: пи-нуль-мезон. Масса его намного (почти в семь раз) меньше массы нейтрона. Кажется, можно ожидать, что нейтрон будет время от времени разваливаться на пи-нуль-мезоны. Однако экспериментально никогда этого не получить. Почему? А потому, что пи-мезоны — это мезоны, а не барионы. Барионное число у каждого из большого семейства мезонов — нуль, а у нейтрона барионное число — единица. Процесс и не идет. Нейтрон мог бы рас-

пасться так, чтобы в результате этого родилась частица с барионным зарядом, снова равным единице. Однако в природе существует только один барион легче нейтрона — это протон. Итак, можно ожидать, что нейтрон распадается на протон и еще на что-нибудь. Зачем что-нибудь, спросите вы, если забудете о законе сохранения электрического заряда. Нейтрон родил протон, положительный заряд которого должен быть скомпенсирован отрицательным зарядом еще какой-нибудь частицы, например, электрона. Итак, еще раз: нейтрон распадается на протон плюс электрон... Теперь — почти верно! На самом деле именно это и происходит в природе, только в дополнение к протону и электрону из «горячей зоны» процесса вылетает еще и электронное антинейтрино...



Примерно таким образом и пользуются законами сохранения *квантовых чисел* (заряда, барионного заряда, странности и т. д.) для определения разрешенных и запрещенных реакций.

Строго сохраняющихся, т. е. сохраняющихся во всех взаимодействиях, квантовых чисел очень мало: электрический и барионный заряды, с которыми мы уже знакомы, и еще два заряда — электронный лептонный и мюонный лептонный. Итак, свои квантовые числа есть и у лептонов, но только у электрона и электронного нейтрино — свое квантовое число, а у мюона и мюонного нейтрино — свое. Впрочем, это нас уже удивить не может. А вот странность — квантовое число, не вполне сохраняющееся (ведь слабые взаимодействия ее не сохраняют). С такими величинами мы встретимся еще не однажды.

Мы несколько отвлеклись от наших барионов. Много ли их? Этого, естественно, пока никто точно



не знает. Более того, неизвестно даже, сколько барионов открыто сегодня. Как и для мезонов, множество барионоподобных объектов еще находится под тщательным «следствием», и когда их выпустят из карантина (и выпустят ли вообще), сказать нельзя. А примерно? Примерно, не считая античастиц, 50—60, если учитывать и резонансы.

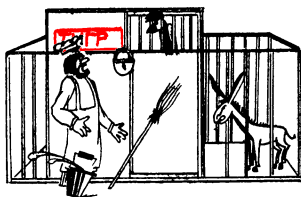
Мы употребили сейчас новый термин, и надо его объяснить. *Резонанс* — это, грубо говоря, очень-очень короткоживущая элементарная частица (мезон или барион — все равно). Живет она настолько мало, что возникает сомнение, родилась ли она вообще? Времени ее жизни едва хватает на то, чтобы почти со скоростью света пролететь через ту область, где происходит реакция, — и тут же распасться.

Но более тонкий анализ показывает, что частица, хотя и на очень краткий срок, все же родилась и принципиальной разницы между резонансом и обычной нестабильной частицей нет. А непринципиальная состоит в том, что резонансы рождаются всегда только в сильных взаимодействиях и распадаются тоже только благодаря им. Впрочем, об этом легко догадаться — такой быстрый распад, как у резонансов, может происходить только при сильных взаимодействиях, иначе они жили бы дольше.



Вот каковы наши частицы, словно в насмешку все еще называемые элементарными... Разные типы взаимодействия, разные семейства, строгие и полустрогие законы, которым они подчиняются, разные до бесконечности сроки жизни

(от вечных протона и электрона до эфемерных резонансов)... Квантовые числа, количество которых все растет и растет... Кроме того, частицы превращаются друг в друга: как сами по себе, так и сталкиваясь друг с другом. Как бы



вам понравилось, если бы вы заперли вечером клетку с тигром, а утром обнаружили в ней осла и попугая?

Нет, зоопарк — это слишком примитивная модель. В мире частиц все намного невероятнее. Слишком много их! Слишком много мелких законов придумали мы, наблюдая их. А ведь по словам Блейка, «лисица знает много мелких истин, а еж знает одну большую истину». Куда лучше было бы и нам, подобно ежу, свести все это обилие к чему-то более простому, более фундаментальному.

Вот о чем думали теоретики в начале 60-х годов XX столетия. И важные события не заставили себя ждать:

ГЛАВА

2

КВАРКИ

(НАУКА О ТОМ, ЧЕГО, ВОЗМОЖНО, НЕТ)

5. ОТ ФЕРМИ К ДЖОЙСУ

Если уж задают вопрос, из чего состоит **нечто**, то требуют, чтобы указали **некое другое**, сочетание которого составляет это нечто.

Гегель

Решающий прорыв — открытие симметрии элементарных частиц — совершился в 1963 году. Но история поисков частиц, более фундаментальных, чем так называемые элементарные, началась намного раньше — еще в те годы, когда появление новых частиц нарушило лаконичное изящество картины мира и вызвало внутреннее беспокойство у теоретиков, для которых эстетическое совершенство теории было иррациональным доказательством ее обшего совершенства...

Это (эстетическое) чувство отнюдь не всегда считалось респектабельным в среде физиков. В начале

века один из великих естествоиспытателей-теоретиков Больцман провозгласил: «Оставим изящество портным и сапожникам!..»

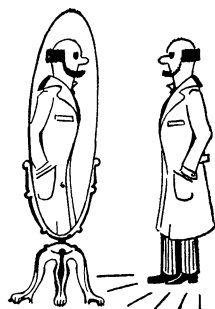
Но эта позиция оказалась неблагодарной, и уже Дирак, создавая основы релятивистской квантовой механики в 20-х годах, опирался на эстетическое чувство очень последовательно и очень успешно. Позитрон (и другие ан-



тичастицы), которые по Дираку должны были существовать для того лишь, чтобы не разрушить симметрии выведенного им уравнения, существовали на самом деле.

Итак, ситуация представлялась следующим образом: было в наличии множество объектов и хотелось свести все это обилие к меньшему числу совсем уж простых сущностей. К тому же и прецедент был перед глазами: атомное ядро. Действительно, разнообразные ядра более чем ста химических элементов (а если считать, как надо бы, еще и изотопы, то более тысячи разных видов ядер), оказалось, состоят всего из двух видов частиц — протонов и нейтронов. И все! Конечно, построить по-настоящему всю сложную картину взаимодействия, иерархии и тонкостей структуры внутри ядра очень и очень непросто. Но это не меняет принципиальной картины: есть два и только два кирпичика, из которых все ядра и построены.

В 1949 году впервые была предложена составная модель такого же типа для элементарных частиц. Великий итальянский физик Ферми и его, молодой в то время, сотрудник Янг предположили, что пи-мезоны не являются элементарными («по-настоящему») частицами, а состоят из нуклона и антинуклона. Точнее говоря, пи-плюс-мезон рассматривался в этой модели как связанное состояние протона и антинейтрона (электрический заряд такого состояния, как нетрудно видеть, и будет единичным положительным), пи-минус-мезон состоял из нейтрона и антипротона, а пи-нуль-мезон был смесью протон-антипротонного и нейтрон-антинейтронного состояний. Квантовые числа пи-мезонов получались пра-



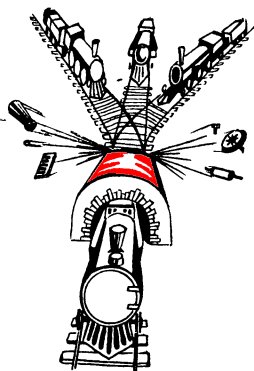
вильно, и таким образом число «истинных» элементарных частиц уменьшалось сразу на три. И, как и для ядер, фундаментальными частицами снова оказывались нуклоны (правда, для постройки пи-мезонов нужны были и антинуклоны, которые в ядрах не присутствуют).

Заметим сразу же, что все попытки построения элементарных частиц из еще более элементарных относятся только к адронам. Лептоны, как и много лет назад, принято считать неделимыми и даже точечными. Неизвестно, всегда ли будет так. Но вся мощность современных ускорителей и изощренность анализирующих приборов оказалась пока бессильной нащупать структуру лептонов.

Вернемся теперь к модели Ферми — Янга. Она не показалась вам странной? Подумайте еще раз: в этой модели пи-мезоны построены из нуклонов и антинуклонов, каждый из которых тяжелее пи-мезона, как мы уже упоминали, почти в семь раз! Из двух тяжелых частиц спокойно строится одна легкая — возможно ли это? Хотя это может показаться непривычным, но вполне возможно.

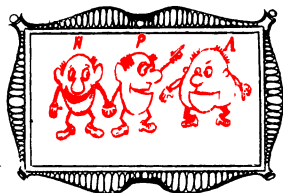
Дело в том, что в релятивистской, т. е. учитывающей теорию относительности, квантовой механике существует понятие: *дефект масс*. Означает оно следующее. Если мы возьмем несколько частиц, взаимодействие между которыми велико, то масса их общего, связанного, состояния окажется меньше, чем сумма масс этих же частиц в свободном состоянии. Причем чем сильнее взаимодействие, тем больше эта потеря массы — дефект масс. Можно сказать, что взаимодействие «съедает» массу, и какой-нибудь объект с небольшой массой может оказаться состоящим из гораздо более тяжелых частиц, если только силы между ними достаточно велики, чтобы этот излишек массы «съесть».

В атомных ядрах дефект масс имеется, но не очень велик: нуклоны в ядре теряют только незначительную часть своей массы. А вот нуклон в пи-мезоне, если мы только примем модель Ферми—Янга, теряет более 90% своей массы. Ну что же, значит, надо считать взаимодействие там чрезвычайно сильным. Заметим, что, как это часто бывает, работа, ставшая впоследствии классической, в первое время не привлекла к себе широкого внимания. Более того, как рассказывает Янг, сам он пытался отговорить Ферми ее печатать, считая, что в работе лишь ставится вопрос и не дается на него ответа. По воспоминаниям Янга, Ферми полушутя-полусерьезно отвечал ему, что настоящие ученые лишь задают вопросы, а ответы на них дают студенты. Это высказывание Ферми достаточно точно характеризовало ситуацию, создавшуюся в 40-х годах в физике высоких энергий: главное, что требовалось тогда,— это идеи, время же для решения конкретных проблем еще не наступило.



Модель Ферми—Янга тихо существовала несколько лет, объясняя некоторые эффекты и сталкиваясь с затруднениями при описании других. В последнем случае вводились незначительные поправки в модель, и все шло своим чередом — можно было начать привыкать к мысли, что нуклоны — настоящие элементарные частицы, а мезоны — составные.

Но открытие ка-мезонов (каонов) нанесло этой простенькой



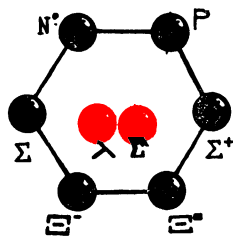
модели решительный удар. Никак нам не удастся и ка-мезоны втиснуть в схему Ферми — Янга: ведь у каонов есть странность! Значит, из нуклонов, не обладающих странностью, построить каоны невозможно. Однако жаль отказываться от красивой идеи Ферми — Янга. И эта модель была обобщена Сакатой и М. А. Марковым. Обобщение было естественным: кроме протона и нейтрона к числу фундаментальных частиц была добавлена еще одна — лямбда-гиперон, открытый в те же годы. Лямбда-гиперон — странная частица, и с его помощью вполне возможно строить ка-мезоны.

Таким образом, мезоны строятся из фундаментальных частицы и античастицы. А так как этих фундаментальных частиц в модели Маркова — Сакаты три, то можно построить всего девять (трижды три) вариантов разных мезонов.

Наши простые рассуждения, конечно, не годятся для количественных расчетов. А между тем, основываясь на этих идеях, можно построить строгую математическую теорию (*теорию групп*). Нам же здесь достаточно знать, что нахождение симметрий между частицами позволяет найти ту группу симметрии, в которой все эти частицы содержатся. А это, в свою очередь, позволит рассчитать и сравнить с экспериментальными данными множество величин. Если расчеты эти окажутся правильными, то, стало быть, и группа симметрии выбрана хорошо.

Так хороша ли модель Маркова — Сакаты? Для мезонов — неплоха. И если бы мы ограничились только придумыванием моделей для мезонов, все было бы в порядке. Однако, почему бы нам, имея набор фундаментальных частиц, не построить из них вообще все адроны — и мезоны, и барионы? Группа симметрий, в основе которых лежат несколько основных (фундаментальных) частиц, поз-

воляет строго и последовательно построить из этих частиц и мезоны, и барионы. Мезоны будут состоять из частицы и античастицы, барионы — из трех частиц... Группа симметрий, основанная на наборах из трех частиц и трех античастиц, была предложена в 1963 году. Называется эта группа (название стоит знать) $SU(3)$ -группой [$SU(3)$ -симметрией].



Теория симметрий адронов, построенная с помощью $SU(3)$ -группы, оказалась очень удачной. Мезоны объединялись с ее помощью в изящные восьмерки (*октеты*) и примыкающие к ним единички (*синглеты*). Массы мезонов внутри каждого из этих семейств были близки друг другу, так что объединение выглядело вполне естественным. Более того, из $SU(3)$ -симметрии следовало для каждого мезона свое собственное, единственно возможное место, которое он мог занимать согласно своим квантовым числам. Частицы расположены надежно и плотно; нет ни одного пустого места и нет ни одной «бездомной» частицы — мезона с массами — в этой области. А для мезонов потяжелее теория опять дает такую же картину, и снова она заполняется точно.

Прежде чем посмотреть, как обстоит дело с барионами, где предыдущие схемы не работали, зададимся вопросом — строгий ли закон $SU(3)$ -симметрия? Мы ведь уже научены опытом физиков прошлых лет, на глазах у которых то один, то другой закон давал трещины или совсем рушился из-за слабых или, скажем, электромагнитных воздействий.

Да, вопрос этот оказывается нелишним, и ответ на него тоже нетривиален. Допустим, закон $SU(3)$ -

симметрии оказался бы точным, доставило бы это нам радость? Если вы подумаете, что и гадать тут нечего — строгий закон всегда надежней, то вы очень сильно просчитаетесь.

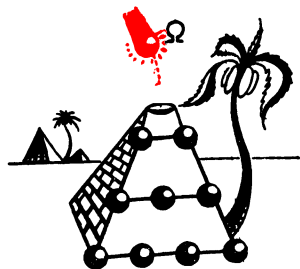
Если бы $SU(3)$ -симметрия (да и любая другая симметрия) была абсолютно точной, то отсюда следовало бы, в частности, что массы всех частиц, входящих в одно семейство, были бы в точности одинаковы. И тогда массы пи-мезонов, ка-мезонов и эта-мезона, входящего в восьмерку мезонов, совпали бы. Как нетрудно видеть, предсказание это совершенно никуда не годится, ибо масса эта-мезона в четыре раза больше масс пи-мезонов! Ошибка в 400% при самых либеральных требованиях к теории — все же вещь абсолютно недопустимая. Где же выход, и почему мы так рады $SU(3)$ -симметрии? Потому что она не точна. И, зная закон, по которому эта симметрия нарушается, мы сможем посчитать и меру, в какой разойдутся друг от друга массы элементарных частиц. Вот эти формулы, связывающие массы адронов с учетом нарушения симметрии (*массовые формулы*), и дают прекрасное согласие с экспериментом. Отсюда и энтузиазм теоретиков начала 60-х годов, хорошо памятный тем, кто участвовал в развитии этих идей или хотя бы наблюдал как делалась эта история, ныне нашедшая место на страницах университетских учебников.

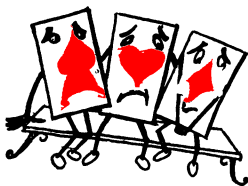
Стало быть $SU(3)$ -симметрия — не строгий закон, она нарушается? Да, нарушается. Хорошо. А за счет какого же взаимодействия, спросите вы, вспомнив наши прежние разговоры? Здесь ответ будет уже несколько туманным.... Общепризнанное ныне мнение таково: существует *очень* сильное взаимодействие, при котором массы всех частиц в семействах одинаковы [$SU(3)$ -симметрия точна]. А если включить другую часть сильных взаимодей-

ствий — *умеренносильные взаимодействия*, то $SU(3)$ -симметрия как раз и расплзется нужным образом и частицы приобретут свои различные массы, хорошо описываемые массовыми формулами. Что такое умеренносильное взаимодействие, сказать я вам не смогу; просто это та часть сильного, которая нарушает симметрию. Ничего больше.

Поистине, прав был В. О. Ключевский, когда говорил, что иногда необходимо нарушить правило, чтобы спасти его силу. То, что подметил русский историк в обществе, вполне справедливо и в причудливом мире элементарных частиц.

А каким образом $SU(3)$ -симметрия действует в компании барионов? Не хуже, чем для мезонов. Снова предсказаны семейства частиц: восьмерка (октет) и десятка (декуплет). Вот здесь-то, в десятке, и встретила $SU(3)$ -симметрия свое решающее испытание. В этом семействе девять частиц занимали свои места в схеме четко, как это было и с мезонами. Но десятое место пустовало. Пирамида декуплета была обезглавленной. А если место, предсказанное теорией для частицы, пусто, то и вся схема дрожит, как при землетрясении, и грозит рухнуть совсем. Набор предсказанных частиц — как цифровая комбинация у сейфа: одна ошибка — и бронированная дверь, скрывающая закон природы, не откроется. Частица в вершине десятки должна была существовать. Теория предсказала ее квантовое число. Из массовой формулы для декуплета была рассчитана ее масса. И экспериментаторы приступили к поискам этой частицы, названной *омегой*.





Напряжение теоретиков длилось недолго — уже в 1964 году открытие омега-частицы триумфально подтвердило справедливость $SU(3)$ -симметрии. У физиков появилась надежная теория, с помощью которой адроны мож-

но было разнести по группам и рассчитывать их массы (и другие характеристики).

Все это очень и очень хорошо, но вспомним теперь, с чего все начиналось. И в модели Ферми — Янга, и в модели Маркова — Сакаты адроны строились из кирпичиков, которых было два или (после открытия странности) три.

Не потеряли ли мы этой привлекательной черты в гораздо более сложной математически $SU(3)$ -симметрии? Нет, так не случилось. Математика очень четко указывает, что все мезоны и все барионы строятся из тройки частиц, лежащих в основе $SU(3)$ -симметрии. Но эти частицы — не протон, нейтрон и лямбда-гиперон, как в модели Маркова — Сакаты. Если это предположить, то массовые формулы для барионов оказываются совершенно негодными. Да и вообще, $SU(3)$ -теория предсказывает для фундаментальных частиц совершенно не те квантовые числа, которыми обладают нуклоны и лямбда-гипероны. Любые другие известные частицы, примеряя хрустальный башмачок высокого звания «фундаментальных частиц», тоже оказываются в незавидной роли сестер Золушки...

Прежде всего, у фундаментальных частиц, предсказываемых $SU(3)$ -симметрией, дробный электрический заряд. А все без исключения частицы, которые были в таком изобилии открыты к этому времени, обладают целочисленным электрическим зарядом, если измерять его в единицах электрического

заряда электрона, или нулевым, если, конечно, частица нейтральна.

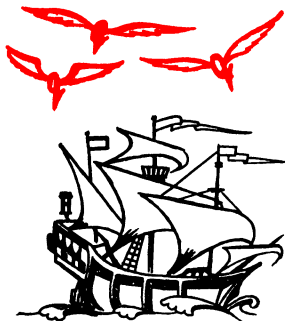
Значит, эти фундаментальные частицы — новые объекты. Один из первых теоретиков, изучавший их, Цвейг, дал им название «тузы» (надо полагать, в знак уважения к их важной роли в природе). Но это название не прижилось. Частицы эти стали широко известны под другим именем, придуманным Гелл-Маном — физиком, очень удачливым в изобретении новых терминов (он придумал и термин странность, например). Итак, фундаментальные частицы, лежащие в основе $SU(3)$ -симметрии, частицы, из которых построены все мезоны и барионы, получили имя:

Кварки

Это слово взято из бредового сна героя романа Джойса «Поминки по Финнегану», которому чудятся чайки, летящие за кормой его корабля и резко вскрикивающие человеческим голосом: «Три кварка для мистера Марка!» Причем далее никакого участия упомянутых кварков в сюжете романа не следует. Однако слово звучит приятно и коротко, кварков действительно три, а законы социально-лингвистической психологии неисповедимы.

Кварки суть кварки, как кошка есть кошка. Почему ее так называли?... Потому и кварки называли кварками...

Предсказание омега-частицы и ее открытие укрепили уверенность физиков в своих возможностях.



Теперь были предсказаны новые частицы — кварки. Что же, можно, наверное, открыть и их!

6. СРАЖЕНИЯ ПРОИГРАНЫ, КАМПАНИЯ ВЫИГРЫВАЕТСЯ

Не спрашивай Бога о дороге на небо: он укажет самую трудную.

Ст. Ежи Лец

Однако не так все просто.

За двенадцать лет, прошедших после начала активного экспериментального поиска кварков (1965 год), совершилась любопытная эволюция во взглядах теоретиков и экспериментаторов на эти частицы, оказавшиеся крайне многоликими.

Теоретики применяли кварковую модель все шире и шире, привыкли к кваркам и, не задумываясь, использовали их в расчетах и моделях наравне с вполне «добропорядочными» и должным образом открытыми частицами. А экспериментаторы, потратив на безуспешные поиски кварков месяцы, а затем и годы, приобрели к ним по-видимому, довольно стойкую антипатию. Вплоть до того, что поиски кварков начали считаться не вполне хорошим тоном.

Начиналось же все очень весело. Казалось, что кварки можно захватить молодецкой атакой, и все лихое предприятие было окрашено в радужные нобелевские тона. Но разберемся в этом подробнее.

Основным свойством, на котором строилась идея поиска кварков, был их дробный электрический заряд. Теория предсказывает, что у одного из кварков заряд равен $\frac{2}{3}$ электронного, а у двух остальных —

$\frac{1}{3}$. Если окажется, что кварки — частицы нестабильные и начнут распадаться, то они будут сбрасывать по одному электронному заряду в процессе распада; в результате опять мы получим частицу с дробным зарядом. А других таких частиц ведь (кроме кварков) и не бывает. (Это, если верить в то, что и сами-то кварки существуют.) Итак, распадаясь, одни кварки перейдут в другие. Отсюда следует, что по крайней мере один вид кварков абсолютно стабилен. Если при столкновениях обычных частиц, например, в космическом излучении образуются кварки (пусть даже очень мало!), то они должны были за многие миллионы лет накопиться в заметных количествах. Ведь дальше им распадаться некуда. Если, например, эти стабильные кварки несут отрицательный заряд, то они будут захватываться ядрами вместо электронов на боровские орбиты. Получатся атомы с нецелым зарядом, и вот их-то и надо искать. Разные способы есть для этого: можно, например, искать кварк-атомы, намагничивая пылинки вещества и удерживая их в подвешенном состоянии магнитным полем. Для удержания обычного атома, сидящего на пылинке, понадобится одно поле, а для удержания кварк-атома — совсем другое.

Эти эксперименты ничего не дали, т. е. не было зарегистрировано ни одного случая наблюдения пылинки с дробным зарядом. Можно, конечно, утешаться тем, что кварки пока не нашлись случайно, а если их еще поискать, то, может быть, они и обнаружатся. Но это весьма слабое утешение.

Химический анализ тоже не помог: искали кварки и в нефти, и в морской воде, и в байкальской... Нет кварков. Попробовали и другие способы. Если на звездах или в солнечной короне есть кварк-атомы, то спектр излучения, испускаемого ими, будет сдвинут по сравнению со спектрами обычных атомов.

Будет лететь набор фотонов другого цвета. Этот сдвинутый спектр искали — и тоже безуспешно. Нет кварков и в космическом излучении, и не рождаются они в реакциях на ускорителях.

Казалось бы, положение очень скверное и теоретикам пора подумать об отказе от теории, предсказывающей то, чего нет.

Однако теоретики, напротив, отнеслись к затянувшимся и, возможно, вообще сомнительным поискам кварков с редким хладнокровием. И на это, конечно, были свои, весьма веские причины.

Из теории не предсказывается масса кварка. Вспомните историю открытия омега-частицы! Формула четко указала, с какой массой должна существовать эта частица. И именно в этой области шли поиски. А обнаруженную в другом месте шкалы масс частицу (даже с квантовыми числами омеги) надо считать уже совсем другим объектом.

А как с кварками? Какая масса кварка предсказывается $SU(3)$ -теорией? Какую угодно массу можете приписать кварку. Ну, естественно, не меньше полмезонной или трети барионной, а то не из чего будет частицы строить. И этого, пожалуй, мало. Частицы ведь не разваливаются слишком быстро. Протон вообще живет так долго, что мы не можем даже уточнить время его жизни, считая для простоты вечным. А если бы массы кварков были равны в точности одной трети протонной массы, то и протон был бы очень хрупок: стукнешь его чуть-чуть чем-нибудь, он и развалится. Чтобы этого не случилось, надо бы предположить у кварков массу существенно больше, и чтобы излишек этой массы «съедался» взаимодействием сильнее. Это взаимодействие и будет держать наш протон целым. Так что граница снизу для массы кварков есть, хотя и весьма неопределенная. А вот сверху кварковую массу ничто

не ограничивает вообще. Пусть будет хоть и бесконечная...

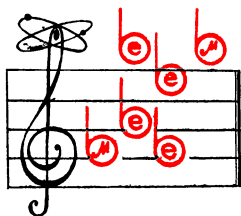
Кстати, кварки с бесконечной массой для теории даже удобнее: легче формулы выводить. Но что означает бесконечная масса кварков с физической точки зрения? Ее, бесконечную, может «съесть» только бесконечная сила же, связывающая кварки внутри адрона. И, стало быть, чтобы развалить адрон на составляющие кварки, надо эту — бесконечную! — силу преодолеть. Но настоящей бесконечности и вся Вселенная не перетянет. Вот частица и не распадется на кварки ни в каких столкновениях: хоть на ускорителях, хоть в космическом излучении.

Свободных кварков мы не обнаружим.

Хорошее рассуждение, и все объясняет. Но неуютно физикам иметь дело с бесконечностью. Частица с такой массой — это уже и не частица вроде, а так — математический образ, фантом. Поэтому говорят аккуратнее: эксперименты на ускорителях показывают, что масса кварков не может быть меньше 10 Гэв , примерно в 10 раз тяжелее массы протона. (Согласно теории относительности и по сложившейся традиции, масса частиц в физике высоких энергий выражается прямо в энергетических единицах.) И эта оценка возникает просто по той печальной причине, что поиски в области меньших масс ни к чему положительному не привели. А в космическом излучении — там ведь энергии намного больше? Но там зато плотности потока маленькие, и всегда найдется отговорка, что мало еще намеряли, надо долго ждать...

Но кроме нефиксированной массы оказалось, что и с зарядами кварков не очень-то все понятно. Чтобы разобраться в этом, нам придется сделать небольшое отступление.

Много лет назад, еще в героические времена соз-



дания квантовой механики, Паули установил принцип, очень важный для теории микромира. Принцип этот называют принципом Паули, и состоит он в запрете двум в точности одинаковым частицам находиться на одном энергетическом уровне. Напомним, что в квантовой

механике частицы не могут иметь энергию совсем уж какую захотят; значения возможных энергий для них определяются строгими квантовомеханическими уравнениями (конечно, для каждой системы набор таких энергий будет своим — для водорода один, для лития другой, для того же водорода в магнитном поле — третий и так далее). Если обратиться для наглядности опять к аналогиям, то частицы размещены по энергетическим уровням подобно нотам на нотном стане, а отнюдь не разбросаны по всему листу бумаги.

И вот принцип Паули вносит очень существенное ограничение на размещение такого рода. Теперь только частицы, отличающиеся квантовыми числами, а стало быть, *разные*, могут спокойно находиться рядом на одной нотной линейке. Скажем, электрон и мюон. А два электрона? Казалось бы, нет. Но если мы найдем такое квантовое число, которое у двух электронов будет различным, оставляя электрон при этом электроном, то можно будет и два электрона поместить на один энергетический уровень.

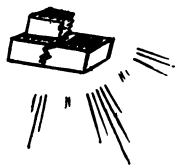
Самое время сделать важное уточнение. Принцип Паули работает совсем не для всех частиц, а только для тех из них, которые носят название *фермионов*.

Ничего не поделаешь, придется нам привыкнуть и к этому слову... А означает оно вот что. Элементарные частицы обладают еще одним свойством,

которому нет полного аналога в классической физике. Это свойство называется *спин*, что в переводе с английского означает *закрученность*. Если бы частицы были привычными для нас (классическими), то это свойство можно было бы описать как вращение их вокруг своей оси. Как очень грубую аналогию будем считать, что и в квантовом мире спин частиц — это мера их вращения вокруг своей оси. Вы, наверное, уже не очень удивитесь, если узнаете, что законы квантовой механики и на значение спина вводят ограничения. Спин частицы может быть равен только определенному числу или быть его половиной, или кратным этому числу или его половине. Частицы с целочисленным спином — это так называемые *бозоны*, а частицы со спином полуцелым ($1/2, 3/2, 5/2 \dots$) — *фермионы*.

Зачем мы занимались всеми деталями квантовой механики? Потому что кварки — фермионы, и, следовательно, принцип Паули для них должен работать. Хорошенько запомним это, а сейчас посмотрим, откуда известно, что кварки — именно фермионы.

Это следует из их роли фундаментальных кирпичиков для построения адронов. Давайте посмотрим, как получается этот результат. Протон, нейтрон и другие барионы (из не очень тяжелых) — все имеют спин, равный половине. Вместе с тем мы намереваемся построить такие частицы из трех кварков. Если бы у кварков был целый спин, то ясно, что нам это никак не удалось бы — из целых кирпичей никак не сложишь конструкцию, в которой есть и половинка кирпича. А вот из кварков со спином $1/2$ (кварков-фермионов) вполне можно построить протон и другие частицы-фермионы. В самом деле, пусть спин одного кварка направлен, например, вверх (спин — векторная величина, т. е. может изображаться стрелкой). Тогда спин второго кварка мы



направим вниз и он скомпенсирует спин первого: в сумме будет отсутствие всякого спина. И, наконец, оставшийся третий кварк дает нам ту самую половинку спина, которая и нужна для правильного описания бариона.

Итак, мы убедились, что кварки должны быть фермионами. Следовательно, на одном уровне могут «сидеть» не более двух одинаковых кварков — и те отличаются только направлением спина. А уже третий кварк, попавший в их компанию, должен пристраиваться на каком-то другом, соседнем уровне. Значит, в системе из трех кварков будет довольно большая несимметричность по отношению к кваркам, составляющим ее: два из них будут на одном уровне, а оставшийся окажется выделенным.

Ну и что, скажете вы? Пусть себе будут в несимметричном состоянии!

А вот это уже не выйдет. Теория $SU(3)$ -симметрии требует, чтобы протон, нейтрон, лямбда-частица и другие — основные! — барионы представляли собой строго симметричные комбинации кварков. Получается довольно прискорбная картина:

- или мы должны перестать доверять $SU(3)$ -симметрии, тогда все предыдущие ее успехи списываются в корзину для черновиков;

- или мы считаем, что кварки — не фермионы (и тогда абсолютно непонятно, каким образом строить из них частицы с полуцелым спином);

- или мы отказываемся обсуждать вопрос о том, являются ли кварки фермионами (а значит, ставим под сомнение их физическую реальность во-

обще, так как частица согласно всем предыдущим достижениям науки либо фермион, либо не фермион — увильнуть от серьезного ответа невозможно);

— или, наконец, надо что-то серьезно менять в нашем представлении о кварках.

Только последняя возможность не кажется, пожалуй, совсем удручающей.

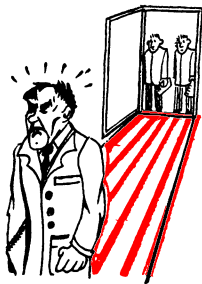
Что же мы можем изменить?

Посмотрим еще раз, что мешало нам «усадить» в симметричное состояние (скажем, на один уровень) три одинаковых кварка. Мы могли отличить два из них направлением спина, а состояние третьего уже совпадало обязательно с состоянием одного из первых двух кварков.

А что, если кварков — много видов, т. е. существует набор из трех кварков с теми квантовыми числами (зарядами, спинами), как это предписано $SU(3)$ -симметрией? Положим, у нас один такой набор лежит в красной коробке, другой — в синей, третий — в желтой. И когда мы «подсаживаем» третий кварк того же вида на уровень, где уже есть два, принцип Паули не может столкнуть его оттуда — мы возмущенно скажем: «Это из другой коробки кварк! Он из красной коробки, а те — из синей!». А по закону Паули, разным частицам на одном уровне «сидеть» не возбраняется.

Получается, что мы находим выход из положения так: если есть несколько наборов кварков, то просто номер этого набора может служить дополнительным квантовым числом, отличающим кварки из разных наборов друг от друга. Или, как мы уже говорили, можно маркировать эти набо-





ры цветом. Тогда проблема снимается и $SU(3)$ -теория по-прежнему прекрасно описывает адроны. Идея о том, что нужно вводить несколько наборов кварков, была выдвинута еще на заре истории кварков в 1965 году Н. Н. Боголюбовым и некоторыми западными учеными.

...Рассказывают, что лет 30 назад один известный физик-теоретик читал в университете курс теоретической физики — и на таком высоком научном уровне, что студенты в какой-то момент «отключились» и только продолжали обреченно записывать все, что лектор излагал, уже не пытаясь понимать, о чем идет речь. На одной из лекций преподаватель оговорился и сказал вещь довольно бессмысленную. К его изумлению студенты никак на эту ошибку не реагировали. Тогда, чтобы убедиться в промелькнувшей у него неприятной догадке, лектор не меняя тона сказал: «Электроны бывают белые, синие, красные, желтые...» И когда студенты спокойно записали и это, теоретик взорвался, хлопнул дверью аудитории и устроил в деканате скандал — невозможно работать с такими невежественными студентами!

... Теперь же научные журналы полны статьями, посвященными «цветным» кваркам. Так меняются ландшафт науки и понятие о допустимых вещах в ней. Конечно, цветные кварки — это чистая условность, ибо понятие цвета в привычном, житейском, смысле для микрочастиц смысла не имеет.

Мы далеко ушли от обсуждения экспериментальных поисков свободных кварков. А между тем введение цвета кварков имеет к этим поискам прямое отношение. Дело в том, что если существует три на-

бора кварков вместо одного, то теория позволяет им иметь не только дробные электрические заряды, но и целочисленные. И тогда вся идея поиска кварков оказывается построенной на песке: в самом деле, как мы узнаем, что открыли именно кварки, если мы о них не знаем теперь ничего достоверного?

Масса кварка не определена. Заряды кварков в одной теоретической модели могут быть дробными, а в другой — целочисленными. И других, особых, квантовых чисел, по которым бы мы узнали кварк, нет. Можно, правда, искать просто очень тяжелую частицу, не вписывающуюся в какие-либо семейства, предписанные теорией групп. Но и этот путь привел к разочарованию. Поиски кварков с массой от 6 до 16 Гэв показали, что стабильных, целозарядных кварков в природе, по крайней мере, в миллиард раз меньше, чем предсказывается хорошей и надежной теорией горячей Вселенной. Приходится полагать, что и целоразрядных кварков тоже нет.

Может, лучше бы поэтому решить две задачи сразу — объяснить неудачи экспериментаторов и освободить теоретиков от нелегкой задачи узнавания незнакомца без особых примет?

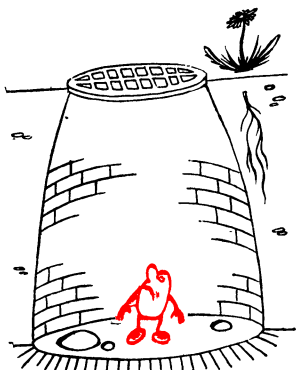
Это можно сделать, если мы строго запретим кваркам быть свободными.

7. «ТЮРЬМА» ДЛЯ КВАРКОВ

Там тюремщик узника заковал
во мгновение ока в оковы.
— Что значит практика! — дьявол
изрек.
— Раз-два — и готово.

С. Т. Кольридж

Надо построить надежную *тюрьму* для кварков. Эта деятельность началась почти сразу после того, как кварки родились под пером теоретиков и стало



ясно, какой узел противоречий и проблем связан с ними.

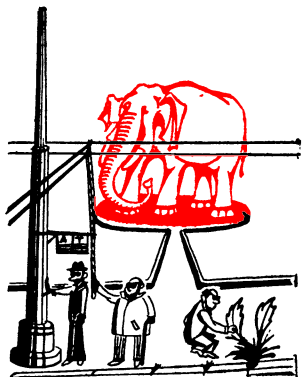
Попробовали сначала очень простые варианты. Вот ведь атом водорода мы можем построить из протона и электрона так, чтобы он не разваливался. Такое же связанное состояние можно построить из кварка с антикварком (чтобы получить мезон) или из трех кварков (для образования бариона). Это удастся в принципе сделать, если поместить кварки в потенциальную яму.

Этот теоретический термин означает примерно то же самое, что и посадка в обыкновенную яму. Если собака сидит в яме, вырытой в земле, то ей надо затратить энергию (подпрыгнуть), чтобы из ямы выскочить. А если у нее силы не хватит, то она и не выскочит. Так и кварк, посаженный в «энергетическую яму», не выскочит из нее, если не получит дополнительной энергии для выпрыгивания. А в очень глубокой яме кварк сидеть будет надежнее, как пленник в земляной тюрьме — зиндане Бухарского эмира.



Позже стало принято называть модели такого рода *мешками*. Если не пытаться входить в математические тонкости, а мы этого ни в коем случае делать не будем, то можно сказать, что все эти подходы формировали примерно такую картину состоящих из кварков адронов. Кварки находятся внутри довольно плот-

ной, но гибкой оболочки, пробить которую и вырваться из которой они не могут. Двигаясь по своим законам в этой оболочке, они переливаются из одного места в другое, постоянно меняя при этом облик адрона. Это очень похоже на амёбу, которая выпячивает свои ложноножки и постоянной формы не имеет. Вернее, в разные моменты имеет разную форму. Только оболочка адрона, как мы уже говорили, для кварков, живущих по своим законам внутри, непроницаема.



Теперь вы имеете полное право любопытствовать: из чего же построена оболочка адрона в этой замечательной модели? Ответ: неизвестно. И пусть это не покажется особенно странным, — никого особенно и не волнует такое положение.

Ведь «кварковые мешки» — это не теория, а всего лишь модель. И требовать от нее законченной картины неразумно — модель отражает только некоторые штрихи природы. Наше дело — установить пределы применимости этой модели. И то же мы будем пытаться делать с другой моделью, объясняющей несколько иной круг явлений. И с третьей, и еще, и еще. Потом будем пытаться объединить эти модели в группы, а если удастся — то и в единую картину, которая могла бы объяснить все экспериментальные данные, которые нам известны. Тогда эта объединенная модель приобретает уже высший, почетный ранг теории.

Есть старая история, которая все эти рассуждения прекрасно иллюстрирует. Три слепца решили

узнать, что такое слон. Ощупав слона, они встретились — и заспорили, ибо их мнения катастрофически разошлись. Один полагал, что слон похож на тумбу (он ощупывал ногу), другой был уверен, что слон — что-то вроде веревки (это слепец изучал хобот), а третий находил, что слон больше всего похож на одеяло (ему досталось ухо).

Мы — эти слепцы, а наши приборы — ускорители, пузырьковые и искровые камеры, вычислительные машины — пальцы слепцов, которыми ощупывается природа. Однако более чем трехсотлетний опыт развития современной науки показывает, что в конце концов мы начинаем понимать, что слон — это слон. И даже запрягаем его для полезной работы.

Итак, мы строим модели.

Вот еще одна из них, вызвавшая довольно большой энтузиазм в последние годы и имеющая прямое отношение к построению кварковых тюрем. Название этого подхода ничего не скажет вам; вот, пожалуйста: *асимптотическая свобода*. Но не пугайтесь непонятных слов и научного жаргона, — физическую сущность даже самой сложной теории (или модели) всегда можно объяснить простыми словами.

Вот в чем состоит смысл понятия асимптотической свободы. Обычно на близком расстоянии частицы взаимодействуют сильно, а чем дальше они друг от друга, тем взаимодействие между ними слабее. И это справедливо для всех четырех фундаментальных видов взаимодействий, которые мы рассматривали. В общем случае так и бывает. Однако оказывается, что в квантовой теории поля можно построить такие ситуации, когда все обстоит совсем наоборот. А именно, на близких расстояниях кварки не замечают друг друга и движутся, как будто они совершенно свободны — никакого взаимодействия между ними нет. Но это им только кажется: стоит им уда-

литься друг от друга чуть подальше (на расстояния, бóльшие размеров адрона), и взаимодействие неудержимо потянет их друг к другу.

Вообще-то это не так удивительно, как может показаться. Такие же вещи встречаются и в мире, окружающем нас. Возьмем, к примеру, пружинку, на концах которой насажено по шарiku. (Шарики эти пусть изображают нам кварки.) Пока пружинка не растянута, шарики могут довольно свободно двигаться в разных направлениях независимо друг от друга; пружинка будет слегка изгибаться. Но совсем уйти друг от друга шарики не смогут: растянутая пружинка притянет их друг к другу.

Вы заметили, что модель асимптотической свободы — еще один вид тюрьмы для кварков? Да, это так. И все было бы совсем хорошо, если бы эта модель выводилась из квантовой теории поля вполне строго. Увы, чего нет, того нет. И в ранг теории мы пока возвести эту очень привлекательную концепцию не можем.

Но уже само обилие разных тюрем и цепей для кварков создает успокаивающее чувство полудоказанности. А вернее, просто привычки к этим понятиям, часто заменяющей их истинное знание. Асимптотическая свобода хороша еще и тем, что четко требует именно свободного поведения кварков внутри адрона. Подобный результат очень и очень приятен для теоретиков: уже больше десяти лет в теоретических расчетах оказывается наиболее выгодным считать кварки свободными. И это было весьма удивительным фактом: ведь с другой стороны, мы считаем кварки в адроне сильносвязанными! Чтобы, не дай бог, адрон не развалился!



Как же можно считать объект и сильносвязанным, и свободным? А вот, оказывается, можно, как нам показывает вариант с асимптотической свободой. Все зависит от расстояний между кварками, расстояний, для которых мы задаем себе этот вопрос.

В годы, предшествовавшие серии экспериментальных открытий начала 70-х годов, в теории кварков многое оставалось совершенно неясным: и степень достоверности самих моделей, и вопрос о существовании свободных кварков, и способ их взаимодействия между собой, и еще очень многое.

Но пути назад уже не было: за эти годы понятие кварков как фундаментальных кирпичиков микромира, понятие структурности элементарных частиц стали фактом физики микромира. Появилась наука о том, чего, возможно, нет, — наука о кварках. Масса расчетов, проведенных с помощью этой модели, дала прекрасное согласие с экспериментом. Многие эффекты были предсказаны — и затем открыты. Кварки, свободные кварки, могут не существовать как объект реального мира. Но кварки как мощный аппарат, описывающий частицы и доказывающий их сложность, их структурность, — это уже навсегда. Наконец, можно и не верить в кварки — реальные частицы, а все же энергично использовать их.

По этому поводу вспоминается известная история, рассказанная Вайскопфом о Нильсе Боре.

Однажды коллега-физик зашел в кабинет к Бору и, к своему удивлению, увидел подкову, прибитую к двери.

— Профессор, — неужели вы верите в это?

— Нет, конечно, — спокойно отвечал Бор, — но, говорят, подкова помогает и тем, кто в нее не верит...

И мы закончим эту главу стоп-кадром: элемен-

тарная частица — динамичный, переливающийся, сложный объект, внутри которого движутся, взаимодействуют, упираются в оболочку и прогибают ее кварки, странные и необходимые. Но история наша еще очень далека от завершения. И не кварками едиными утешается душа теоретика, строящего новый мир в покрытых тьмой незнания глубинах элементарных частиц.

Пора посмотреть и на другие постройки, возведенные в эти годы на новооткрытых территориях науки.

ГЛАВА

3

ПАРТОНЫ (АДРОННЫЙ ИНЖИР)

8. АРСЕНАЛ

Рубить голову черту надо его же мечом,

Август Бебель

Физики проникли внутрь элементарных частиц. Мы уже спокойно обсуждаем детали структуры частиц, строим гипотезы и разбиваемся на группы согласно любимым моделям.

А теперь задумаемся: каким же образом достигли мы этого знания? Откуда получаем сведения о невероятно тонких деталях строения природы?

Основная информация о микромире поступает к нам с научных заводов-гигантов — ускорителей. Эти крупнейшие инженерные сооружения, разбросанные от Калифорнии до Подмоскovie, составляют могучий экспериментальный арсенал физики элементарных частиц. В ускорителях сконцентрированы самые поразительные технические достижения: глубочайший вакуум в больших объемах, глубокое охлаждение, применение (не в лабораторных масштабах!) эффектов сверхпроводимости, огромные магниты, сложнейшая электроника.





Размеры этих сооружений начинают превышать пределы, диктуемые житейским здравым смыслом. Дубненский знаменитый ускоритель еще помещался под крышей одного, пусть и очень большого здания. Ускоритель в Серпухове — это уже огромный круговой туннель, проложенный под землей и присыпанный ею, как древний оборонительный вал крепости.

Проекты новых ускорителей предусматривают длину подземного кольца 20—25 км, так что становится актуальной уже и задача согласования этой научной постройки с окружающими владельцами земель, у которых надо отбирать немалые земельные участки... И не кажется уже таким невероятным шутовское предложение о постройке ускорителя следующего поколения под насыпью Московской кольцевой автомобильной дороги (окружность более 100 км). При этом рационально мыслящие физики озабочены тем, чтобы все экспериментальные залы такого ускорителя находились с внутренней стороны кольца, так как это гарантирует московскую прописку...

Это, конечно, шутки, но шутки весьма симптоматичные. Грандиозность уже действующих и, в особенности, планируемых ускорителей удивляет даже тех, кто давно работает в физике высоких энергий. И дело не только в размерах. Для нормальной работы бесчисленных установок и уникальных приборов, образующих в комплексе современный ускоритель, требуется, например, такое же количество электроэнергии, как и для не очень маленького города.

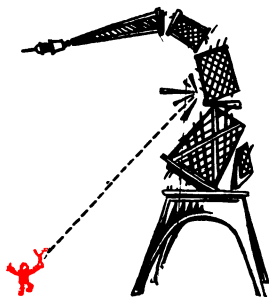
А если говорить на языке бухгалтеров, то поддержание крупного ускорителя в рабочем состоянии требует многих десятков миллионов рублей (или, соответственно, долларов) в год. А ускорители не временные сооружения, они работают долгие годы... И вот на этих циклопических машинах изучаются мельчайшие частицы материи!

Происходит буквально то, что в пословице стало символом нерационального и бессмысленного действия: из пушки стреляют по воробьям. В который раз мы убеждаемся в том, что понятия, выработанные в повседневной жизни, в микромире могут ввести в большое заблуждение. Ибо именно только из мощнейшей пушки можно попасть в такого необычного воробья микромира, как протон или пион... В этом нам следует разобраться детальнее.

Можно ли представить себе такой мир, в котором атом (или атомное ядро) разрушались бы так же легко, как разрушается камень или стекло? Ударив по камню молотком с обычной, отнюдь не сверхъестественной силой, мы камень расколем. А если бы при этом ударе разрушались и атомы? Тогда в окружающем нас мире не было бы ничего устойчивого. Незначительные увеличения сил, сплошь и рядом

случающиеся в природе, приводили бы к апокалиптическим последствиям: разрушалась бы кристаллическая структура скал от порывов ветра, а падение камня с горы разрушало бы молекулярные связи и вело к неконтролируемым химическим реакциям... И весь мир колебался и рушился бы от ничтожных причин.

Этого не происходит на самом деле, и сам тот факт, что мы, вы-



сокоорганизованные (живые!) протеиновые комплексы, существуем, мыслим, изучаем теорию элементарных частиц и не превращаемся в набор перемешанных химикалий, споткнувшись и упав на землю,— доказывает это.

Природа выстроила единственно возможную иерархию связей в природе. Мы легко можем ножом состругать щепку с куска дерева — этим затрагивается только структура, не касающаяся атомов, а тем более их частей. Чтобы затронуть электронные оболочки атомов, нам надо постараться больше: запустить химическую реакцию, превращающую наш кусок дерева (твердое тело) в облако раскаленной плазмы (пламя). Пока цивилизация не создала один из своих микрошедевров — спичку, для этого требовались многие часы утомительного занятия трением дерева о дерево... А вот атомное ядро такими средствами уже не разрушишь. Оно устроено гораздо прочнее и надежнее. И лишь несколько десятилетий назад, фактически на наших глазах, люди научились проделывать эту операцию. Конечно, приходится вкладывать сюда гораздо больше энергии...

В мире ядра и особенно элементарных частиц на очень малых расстояниях начинают играть первостепенную роль сильные взаимодействия, о которых мы уже говорили в гл. 1. Эти силы связывают частицы в ядро и цементируют сами элементарные частицы настолько сильно, что для разрыва их требуется уже колоссальная энергия. Вот откуда возникает необходимость в постройке грандиозных ускорителей — концентраторов технической мысли нашего времени.

В этом разделе мы употребили слово арсенал. Журналисты приучили читателей к тому, что иносказание встречается чаще, чем прямое название. «Корабль пустыни среди моря белого золота» —

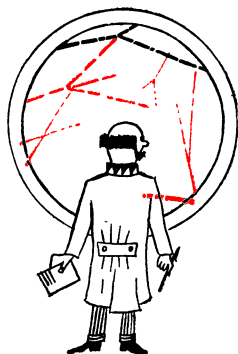
кому не ясно, что речь идет не о корабле, море и золоте, а о верблюде, поле и хлопке. Конечно, на этом пути мы еще далеки от труднодостижимого идеала исландских саг, в которых считалось неприличным назвать вещь своим именем, а выражения вроде «белого золота» хотя и допускались, но считались бы примитивными и малопоэтичными. Вот выражение типа «липа пламени земли оленя заливов» было приятным на слух и совершенно понятным, ибо каждому исландцу было ясно, что «олень заливов» — это корабль, «земля корабля» — море, «пламя моря» — золото, а стало быть, все выражение в целом («липа золота») — не что иное, как женщина...

Так не стоит ли и наше слово арсенал в этом же поэтическом ряду, не содержа в себе никакой глубокой мысли? Ничего подобного.

Ускорители — это действительно гигантские пушки, снарядами в которых служат сами же элементарные частицы. Чрезвычайно малая масса этих частиц компенсируется огромной энергией, которую они приобретают, вращаясь миллионы раз в кольце ускорителя и достигая околосветовой скорости. Когда эти снаряды приобретают рассчитанную ранее для них энергию, их выпускают из кольца ускорителя и пучок частиц летит по касательной к окружности кольца ускорителя — на свободу. Но в конце этого пути стоит заграждение — мишень. Снаряд-частица ударяет в мишень, и в результате этого столкновения происходит мощный взрыв в микромире — рождаются новые частицы, единицы или десятки. «Осколки» столкновения разлетаются в разных направлениях, многие из них гибнут (распадаются) по дороге...

Фотография, изображающая следы такого процесса, который мог произойти в фотоэмульсии, пузырьковой или искровой камере или в камере Виль-

сона, оказывается исчерпанной толстыми и тонкими, прямыми и закругленными, сплошными и прерывистыми линиями. Таков основной источник нашего знания об элементарных частицах. Очень и очень не просто получить детальную информацию из этих запутанных следов катастрофического столкновения в микромире. Кроме того, на фотографиях явно дают о себе знать только электрически заряженные частицы, а нейтральные остаются невидимыми. Поэтому очень поучительной



кажется история, которая произошла однажды в Копенгагене на теоретическом семинаре у Бора. Известный теоретик Ганс Бете продемонстрировал совершенно черный фотоснимок — без единого туманного следа от частицы и сказал: «Ясно, что здесь летела нейтральная частица, распавшаяся затем на две другие нейтральные частицы... Экспериментаторам здесь, конечно, нечего сказать, но мы, теоретики, должны подумать над этим замечательным снимком...» Шутка была меткой...

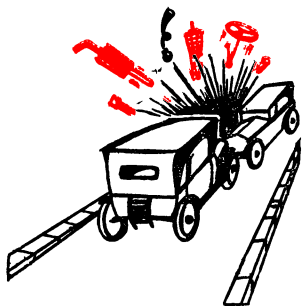
Итак, мы изучаем элементарные частицы, обстреливая их элементарными же частицами. Хороший ли это способ?

9. ЛЕПТОННЫЙ СКАЛЬПЕЛЬ

Ты не думай с презрением:
— Какие мелкие семена! —
Это ведь красный перец.

Маццо Басё, XVII век

Мельче элементарной частицы мы ничего в природе пока не знаем. Точнее говоря, мы предполага-



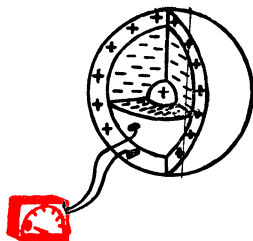
ем существование более мелких объектов и получаем косвенные доказательства их существования, порой весьма убедительные, но экспериментаторов этим не утешить. В кольцах их ускорителей должно летать что-то реальное, что можно получить, накопить, ускорить и чем можно в конце концов выстрелить по мишени.

Стало быть, мы вынуждены производить не столько зондирование частиц каким-то другим, намного более тонким инструментом, сколько сталкивать их и рассматривать затем, что вышло. Что, по-вашему, удобнее: изучать внутреннее устройство автомобиля с помощью гаечного ключа или, разогнав его хорошенько, стукнуть о другой автомобиль и, наблюдая, что выйдет, составлять техническое описание двигателя и шасси? Ясно, что первый вариант был бы предпочтительнее не только с точки зрения инспектора ГАИ.

Но неужели положение так уж безрадостно? В общем — да, но есть и некоторые проблески в ситуации. Оказалось, что по своей внутренней структуре частицы довольно резко делятся на две категории. У лептонов структуры нет — с нашей сегодняшней точки зрения. Электрон или мюон может рассматриваться как точечная частица без всякой структуры. А вот об адронах этого сказать ни в коем случае нельзя. Еще ранние (конца 50-х — начала 60-х годов) эксперименты по изучению электромагнитной структуры нуклонов показали, что протон и нейтрон — совсем не однородные биллиардные шарики, а гораздо более хитроумные объекты. Особенно лю-

бопытно это проявляется у нейтрона.

Эта частица, как известно, электрически нейтральна. Что следует даже из названия, присвоенного ей, конечно, не напрасно. И если бы нейтрон был действительно элементарен, то вопрос о его электрическом заряде был бы полностью закрыт. Нет заряда — и конец. Эксперимент, однако, дает совсем другую картину: нейтрон состоит из нескольких оболочек с разными электрическими свойствами. Центральная область нейтрона совершенно не отличается от центральной области протона: она заряжена положительно и в ней сосредоточена примерно половина элементарного заряда, т. е. заряда, по величине равного электронному. Зато средняя область нейтрона заряжена отрицательно, и этот заряд с избытком компенсирует положительный заряд сердцевины. Внешняя же область нейтрона несет в себе столько положительного заряда, чтобы в результате суммарный заряд нейтрона равнялся нулю. Эта внутренняя структура нейтрона не проходит даром для его электромагнитных свойств: оказывается у нейтрона существует магнитный момент — величина, присущая объекту всегда, когда электрические заряды как-то присутствуют в нем. Магнитные моменты были зафиксированы и у других электрически нейтральных адронов; значит, нейтрон не является исключением.



Все это и привело физиков к мысли — использовать лептоны в качестве снарядов для изучения внутренней структуры адронов. Лептоны оказываются не такими сложными объектами, и с их помощью естественно попытаться «вскрыть» сложные и



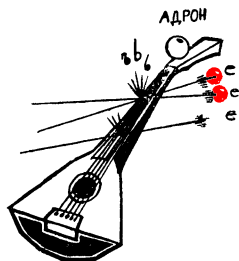
непонятные сильновзаимодействующие частицы.

Электронные ускорители, долго находившиеся в тени могучих протонных синхротронов, стали завоевывать себе более почетное место в физике высоких энергий.

...Недалеко от Сан-Франциско, у небольшой пыльной станции Пало-Альто расположен университетский городок с коттеджами преподавателей, невысокими зданиями лабораторных и учебных корпусов и зелеными лужайками. Это Станфордский университет, один из самых знаменитых и солидных частных университетов США. Вертикальная доминанта университетского городка — башня так называемого «гуверовского института войны, революции и мира», а в горизонтальном направлении прежде всего обращает на себя внимание двухсотметровая линия Станфордского линейного ускорителя (SLAC).

Когда строился подземный туннель для Станфордского ускорителя, рабочие натолкнулись на скелет динозавра, гулявшего по болотам Калифорнии много миллионов лет назад. И первая научная публикация нового центра была посвящена описанию этой находки. Хотя археологическая деятельность SLAC'а не получила дальнейшего развития, но «станфордский монстр» оказался очень многозначительным эпиграфом к работе ученых из Пало-Альто. Этот древний ящер был только первым и самым простым, пожалуй, из тех странных созданий природы, которые физикам было суждено открыть в Станфорде.

Лептонные (электронные), пучки, которые в туннеле разгоняются до рекордных в мире энергий, стали прекрасным инструментом для изучения структуры адронов. Электроны большой энергии, пролетая мимо адрона, вытягивают на себя частички, составляющие его, или обмениваются с адроном частицей — переносчиком взаимодействия (фотонем, например). Одним словом, электрон, пролетающий вблизи адрона, заставляет его звучать одной из своих струн. Мы можем, трогая струну за струной, перебрать всю гамму адрона и, стало быть, изучить его.



Конечно, это намного лучший способ изучения рояля (сравним сейчас адрон с ним), чем выбрасывание его из окна десятого этажа на мостовую и фиксация получившегося не весьма музыкального набора звуков. Последний метод (аналогичный во многом адрон-адронным столкновениям), правда, гораздо веселее. Так считает тринадцатилетний мальчик, с которым я обсуждал разные вопросы на тему этой книги. Подумав, он добавил, что этот метод хорош только в том случае, если рояль — не наш собственный... А он — очень даже наш, потому что ускорители, да и вообще изучение элементарных частиц — это серьезное профессиональное дело, требующее огромных затрат интеллектуальной энергии, денег и знаний. И поэтому нам лучше избежать грохота рояля, рушащегося на землю, если есть хотя бы чуть более эффективный метод, позволяющий нам сэкономить время и деньги.

Этим и хорош лептонный прожектор, вырывающий из темноты одну за другой детали строения сильновзаимодействующих частиц подобно тому,

как прожектор пограничный, обегая морской горизонт, показывает нам то рыбацкий баркас, то перископ подводной лодки, а иногда и пустой, покрытый рябью волн участок моря — как повезет.

После всех похвальных слов по адресу лептон-адронных столкновений как метода изучения структуры элементарных частиц вы можете подумать, что из процессов, где адроны сталкиваются с адронами, ничего мало-мальски полезного не извлечешь. И глубоко ошибетесь. Многие и многие детали можно изучать в принципе только в процессах этого рода, методом *«рояль-мостовая»*.

Просто сейчас мы переживаем такой этап развития эксперимента (и теории), когда лептонные методы изучения частиц дают один за другим интересные, а порой и сенсационные результаты. И раз уж мы набрали на золотую жилу, то надо ее выработать потщательнее.

А теперь вернемся снова к ситуации в призрачном мире кварковых моделей. Мы помним примечательное хладнокровие, с которым были встречены неудачи прямых поисков кварков. Все же об этом стоит поговорить еще.

Когда был предсказан теорией эфир, а эксперимент не доказал его присутствия, в науке царили страшная растерянность и разброд. Рушились устои, и выступления многих ученых той поры окрашены в тона греческой трагедии. А с кварками все как-то по-другому.

Почему же? Как мы знаем из Гегеля, раз что-то должно быть, то оно и есть, «все разумное действительно» и реализуется, стало быть. А кварки, как будто бы, вполне разумны?

10. О ДОМОВЫХ И ДРАКОНАХ

Когда сплетни стареют, они становятся мифами.

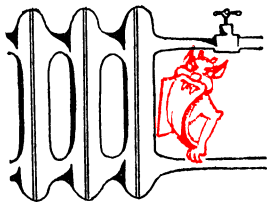
Ст. Ежи Лец

Дело в том, что теорий (или, точнее говоря, гипотез) довольно много. И не так уж трудно сделать подгонку под экспериментальные данные. Может быть, и кварки — только удачно сделанная подгонка? Единственная инстанция, могущая дать нам осмысленный ответ, — природа. Есть, конечно, случаи, когда эксперименты проводятся, данные накапливаются, а на теорию это никак не влияет и к совершенствованию ее отнюдь не ведет. Происходит это обычно в двух крайних случаях (от великого до смешного, как известно, очень недалеко):

1) если теория чрезвычайно скверная, никаких предсказаний не дает и вообще не проверяется разумным способом. Приведем пример. В подъезде за батареей живет домовый. Попробуем на прочность эту теорию. Вопрос: почему именно там? Ответ: а он так хочет. Вопрос: не жарко ли там ему? Ответ: нет; ему нравится. Вопрос: а вы его видели? Ответ: нет, он, услышав шаги, прячется... И т. д., и т. д.;

2) иммунитет почти ко всякому эксперименту есть также у очень хороших и очень общих теорий. Например, для закона сохранения энергии каждый новый эксперимент, в общем-то, безразличен. Все равно, наверное, мы получим еще одно подтверждение этого закона, потому что среди миллионов экспериментов в разных областях науки не было ни одного, противоречащего утверждению о сохранении энергии.

Более или менее очевидно, что



кварковая теория к этой последней категории не относится. Не дотягивает. Может быть, кварки принадлежат к классу типа «домовой в подъезде»? Нет. Ибо выдвинутая нами концепция о домовом — это не теория, не модель даже, а миф.

Теперь я должен просить извинения у читателей за длинную, но, как мне представляется, очень уместную цитату:

«Модель односторонняя, неполная и носит подсобный характер: ее создают для временного (иногда весьма длительного) использования, а затем заменяют новой. Миф же с самого начала предстает в полном и завершенном виде и в этом отношении близок к религии...» (П. Оже).

В самом деле, в домового верят (кто хочет верить) уже не первое столетие, а вот, например, модель атома Бора честно прослужила науке 15 лет и уступила место более совершенным подходам.

Но послушаем вновь П. Оже:

«У науки есть одно очевидное средство защиты против мифов, заключенное в самом научном методе, который любую теорию считает правильной лишь до тех пор, пока она дает наиболее удовлетворительное объяснение наблюдаемым явлениям, и лучше всего, если она позволяет объяснить максимальное число фактов на основе минимального числа произвольных правил и параметров. В мифологии же обычно для каждого факта или события существует свой отдельный миф...»

Известно, например, что у древних римлян в пантеоне божеств существовало просто невероятное их количество — буквально для каждого шага. Бог первого вдоха ребенка, бог первого крика, первого шага и так далее. Это делало, между прочим, религию римлян не только антинаучной (это относится

к любой религии), но и порой просто антиэстетичной.

«Самая прекрасная теория вынуждена бывает отступить, если предъявить противоречащий ей факт, установленный экспериментально.

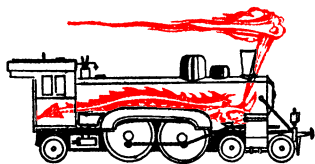
А миф не отступает: он возражает, пытается увильнуть, нередко с помощью чисто словесных уловок. Так обстоит дело с мифом об излучениях, испускаемых мыслящим разумом и лежащих в основе телепатии, с флюидами или волнами, помогающими лозоходцам находить подземные источники воды, с ясновидением, с шестым чувством и тому подобным.

Экспериментальным опровержениям мифы не придают ни малейшего значения, и в этом состоит одна из главных их отличительных черт» (П. Оже).

Очень легко понять, что перечисленные выше признаки мифа к кварковой гипотезе не относятся. Итак, кварки — это не теория и это не миф. Что же они представляют собой в структуре современной физики элементарных частиц?

Кварки — это модель. Модели в истории науки вводились часто — в тех случаях, когда было уже достаточно материала для серьезных научных размышлений, но теории, объясняющей большой круг явлений, не было.

Дальнейшее развитие науки показывало, насколько оправданным было введение таких (модельных) объектов. А судьбы моделей бывали очень и очень различны. Одни модели становились со временем экспериментально установленным научным фактом; так случилось, например, с атомом и позитроном в физике и с геном в биологии. Другие модели потеряли свой первоначальный непосредственный смысл, как силовая линия в теории электромагнитного по-



ля. Некоторые модели, не выдержав экспериментального испытания, были в конце концов устранены из научного обихода. Это произошло с флогистонем, с эфиром, с «нервной жидкостью».

Но стоит, наверное, подчеркнуть, что и в этом последнем прискорбном случае историческая роль моделей, как правило, бывает в целом положительной: благодаря своей систематизирующей силе модели служат орудиями получения новых знаний, трамплином к более адекватным теоретическим построениям.

К какой же категории моделей можно отнести наши кварки? Ответить на этот вопрос сегодня не так уж и просто. В самом деле, давайте повторим еще раз, что нам известно о кварках. Можно считать, что кварков три, а можно считать, что девять. Масса и заряд их неопределенны. Вообще масса их возможно бесконечна.

Кроме того, так как свободные кварки не обнаружены (а мы помним, что занимаемся не конструированием мифов и должны считаться с экспериментом!), то надо позаботиться о том, чтобы и в теоретической схеме они также на свободе не находились. Стало быть, мы их сажаем в яму, а еще лучше — в тюрьму или в мешок. Мешки-пузыри пульсируют, сливаются и разъединяются, но кварков наружу отнюдь не выпускают.

Ну, а раз наружу ничего не выходит, то можно, казалось бы, дать простор фантазии и напридумывать бог знает что. Типичная ситуация с «черным ящиком»: что на входе — известно, что на выходе — тоже, а об остальном думай, что хочешь.

Вот едет паровоз. Почему едет? Можно сказать:

«в нем дракон огнедышащий сидит и лапами колеса крутит». Это — модель, и вроде бы довольно приличная. Поют паровоз, кормят чем-то черным, дым идет и искры летят. Однако если паровоз сломается, эта модель не поможет нам его починить.

Таким образом, в технике подобный подход не сработал бы. Но элементарная частица — не паровоз: не мы ее строили, не нам ее и чинить. В природе и без нас все крутится. Вот только не очень хорошо мы понимаем, что происходит в природе частиц. А знать это хотим.

Значит, будем разбирать паровоз. Разберем, а если дракона-то там и нет? Как быть? Новую модель придумывать? Дракон-де только в закрытом объеме существует, а разберем — исчезает...

Приходится в любом случае пытаться проникнуть внутрь адрона, решить наконец, есть ли там кварки, какие они и как ведут себя... Для этого и хорошо, кажется, лептонный скальпель. Вскроем адрон!

Мы имели полное право ожидать, что в структуре адронов многое прояснится при тонком и остром лептонном анализе.

Однако происходит неожиданное. Ответы мы получаем совсем не на те вопросы, которые мы в гордыне своей ставим природе. Вот, думали мы, все же большие мы умники: знаем, о чем природу спрашивать — «как там с кварками»?

А в ответ появляется еще один персонаж нашей истории — *партон*. Что это, узнаем в следующем разделе.

...Поистине, «шел в комнату, попал в другую».

11. СТАНФОРДСКИЕ НОВОСТИ

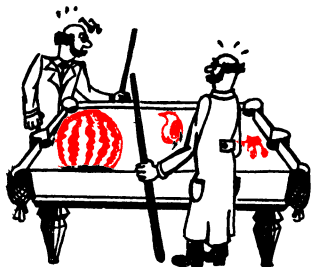
Кто знает, что бы открыл Колумб, если бы у него на пути не встала Америка.

Ст. Ежи Лец

Летит частица и сталкивается с другой. Многое надо измерить и рассчитать, чтобы этот процесс описать полностью. Но есть одна главная величина, которая всегда измеряется в первую очередь, — полное сечение процесса. Понять, что это такое, можно из аналогии с обычной, классической физикой. Вот сталкиваются два бильiardных шара. Чем больше диаметр каждого из них, тем, разумеется, легче им зацепить друг друга. А если они совсем маленькие, то, пролетая по столу один мимо другого даже поблизости, они не коснутся друг друга, и никакого удара (взаимодействия) не произойдет. Следовательно, можно измерять величину взаимодействия поперечным сечением шариков: чем оно больше, тем вероятнее, что взаимодействие произойдет.

Частицы не бильiardные шарики. Но измерение сечений можно производить и для частиц, хотя смысл понятия *сечение* для них намного сложнее.

Посудите сами, может ли быть такое: размер бильiardного шара меняется в зависимости от того, с какой силой по нему ударяет другой шар. Если очень постараться, то шар-мишень на столе станет огромным, как арбуз. А при другой энергии шарик может съежиться до размеров вишни. Конечно, трудно представить себе та-



кое в нашем обычном мире (если не запускать в него вольных экспериментаторов вроде старика Хоттабыча). Но в микромире частиц подобные чудеса — дело обычное. Их сечения взаимодействия могут расти и падать с изменением энергии частицы-снаряда по самым разнообразным законам.

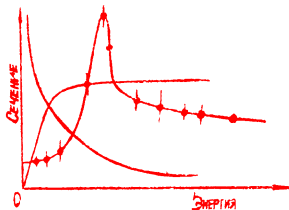
Однако что же такое все-таки сечение взаимодействия для элементарных частиц?

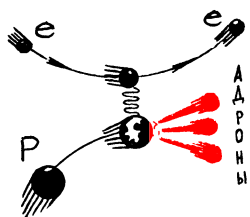
Когда одна частица летит в сторону другой, при их сближении начинают действовать весьма сложные и разнообразные силы. И если в результате взаимодействия этих сил пролетающая частица «зацепляется» каким-то образом за частицу-мишень, то это и соответствует столкновению, происходившему с нашими бильiardными шарами. Захватывается частица с большого расстояния — большое сечение взаимодействия у этого процесса, с малого — малое.

К тому же у каждого процесса закономерность изменения сечения с энергией может быть своя. Изучение сечений — одна из самых важных задач экспериментальной физики высоких энергий.

Особой популярностью пользуется в последнее время изучение *глубоко неупругих лептон-адронных взаимодействий*. (В этих словах ничего заумного и недоступного нет, поверьте. Сейчас мы все поймем!)

Лептон-адронные взаимодействия — это нам уже хорошо понятно. Чаще всего речь идет о взаимодействии электрона (самого обычного и легко получаемого лептона) с адроном, например с протоном, которых тоже под рукой у экспериментатора великое





обилие. Итак, для определенности считаем, что мы изучаем взаимодействие электрона и протона. Следующее слово, требующее пояснения, — *неупругое*. Это совсем просто. Если в результате взаимодействия разлетелись те же частицы, что и сталкивались, то взаимодействие — упругое. Взаимодействие шаров, к примеру, всегда упругое, а столкновение пули стрелка с глиняной тарелочкой на стрельбище всегда неупругое: тарелочка обращается в набор новых объектов — осколков.

В мире элементарных частиц рождение новых объектов не обязательно происходит подобным образом — с уничтожением старого. Недаром совершенно официальным является термин *рождение частиц*. Протон может в результате столкновения и связанного с этим возбуждения произвести на свет, родить множество новых частиц. И сам останется жить. Так что неупругий процесс в микромире — это чаще всего радостное событие — рождение, а не горестная кончина.

И, наконец, слово глубоко — в понятии *глубоко неупругое*. Смысл его вот каков. Если бы электрон «стукнулся» прямо о протон и в результате что-то родилось, это считалось бы просто неупругим процессом. Но это сейчас для нас довольно грубый эксперимент; лептонный скальпель, как мы уже знаем, позволяет и более тонко изучать адроны, а именно: электрон, пролетая вблизи от протона, входит в сферу, где взаимодействия уже не избежать. Между нашими двумя частицами возникает обмен квантами взаимодействия. Например, пролетающий электрон и протон-мишень обмениваются фотоном, и фотоном довольно энергичным. Электрон, летящий с

большой скоростью, — выпущен из ускорителя! — промчится дальше, выйдет из зоны контакта и где-то на границе области эксперимента благополучно закончит свою жизнь в измерительном приборе. Пощелкают соответственно счетчики, и мы получим информацию: электрон-снаряд прибыл. А в протоне, потрясенном происшедшим событием — обменом фотоном — начнутся сложные и во многом таинственные для нас перестройки структуры. И в конце концов вместо одного протона возникнет целый набор адронов... Вот этот-то процесс, по необходимости многословно описанный здесь, и называется *глубоко неупругим рассеянием*.

Для того чтобы протон был достаточно сильно потрясен и взаимодействие в самом деле стало неупругим, необходимо электрон разогнать очень и очень сильно. Быстрым электроном и фотоном будет испущен энергичный, и процесс пойдет интереснее. Для изучения структуры адронов потому-то и хорош электронный ускоритель в Станфорде: он производит самые энергичные в мире электроны.

И, наконец, после несколько затянувшегося, но необходимого объяснения терминов и процессов мы в состоянии посмотреть: что же нового дали нам эти эксперименты?

Обычное, упругое рассеяние электрона на протоне — эксперимент довольно старый. Из него следует, в частности, что протон обладает сложной электромагнитной структурой. Об этом, как и о такой же ситуации для нейтрона, мы уже говорили выше.

Теперь давайте закроем ответ рукой, и попробуем угадать: а при еще более энергичном, неупругом, взаимодействии как проявится структура адрона? Наверное, сложность еще больше возрастает и протон покажет еще большую свою структурность. Как клетка при большем увеличении под микроскопом

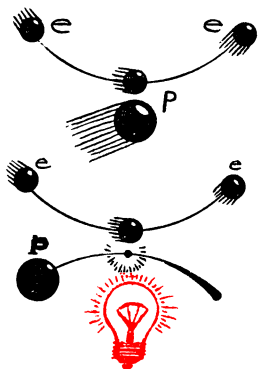
раскрывает нам все новые и новые детали своего строения. Признаюсь заранее, к новой структуре мы в конце концов придем, но не простым путем. Впрочем, будем последовательны и станем придерживаться фактов.

Сложная структура протона, проявляющаяся уже в упругих столкновениях, вела к безупречному математическому предсказанию: значения определенных физических величин, описывающих сечение процесса, должны убывать с ростом энергии. Так и происходило в эксперименте до поры до времени.

И вдруг неожиданно при станфордских энергиях эти величины застabilизировались. Они перестали уменьшаться, а в переводе с чисто математического языка на наглядный физический это означало: протон (или вообще любой адрон, потому что эксперименты проводились и с другими сильновзаимодействующими частицами) вдруг утратил свою сложную структуру и стал вести себя как абсолютно бесструктурная частица! Более того, расчеты показали, что он стал вести-то себя как точечная частица.

Если попытаться приписать ему хотя бы маленькие (символические) размеры, то, увы! возникнет противоречие с другими очень хорошими и надежными измерениями.

Что же получается? До некоторых энергий взаимодействия адрон ведет себя вполне нормально с точки зрения здравого смысла физика, привыкшего видеть, как отодвигается все дальше горизонт «элементарности» и как бывшие элементарные частицы оказываются сложными. Нормальный процесс, и ничего принципиально потрясающего в нем



нет. И вот вдруг это нормальное развитие обрывается и эксперимент требует от нас признать, что сложный, структурный, протяженный адрон вдруг съезживается до размеров точки, т. е. вообще размеров не имеет! Неужели надо с этим согласиться?

Такой печальной необходимости, к счастью, нет, и возникшую дилемму можно решить другим способом. Правда, немалой ценой — в обиход физики вводятся объекты со свойствами очень необычными. Физическая сущность их до конца неясна, и споры вокруг них не менее ожесточенны, чем вокруг кварков.

Одним словом, представляю новых, вполне законных, обитателей микромира: *партоны*.

12. МЕТАМОРФОЗЫ АДРОНОВ

Отпечатки пальца божьего не всегда идентичны.

Ст. Ежи Лец

Прежде всего нам надо устранить противоречие, которое кажется возникшим при сопоставлении экспериментов по упругому лептон-адронному рассеянию, с одной стороны, с данными о неупругих процессах при участии тех же героев — с другой.

Неупругое сечение рассеяния растёт. Таков факт. А происходит это рассеяние, как на точке, и тогда, по твердо установленным представлениям теории частиц, расти оно не может. Таков другой факт.

Смотрите, как мы сейчас «впряжем в одну телегу коня и трепетную лань».

Во-первых, почему это мы вдруг решили, что при высоких энергиях протон съезжится до размеров математической точки, вернее, до отсутствия размеров? Ведь результаты, описанные выше, были получены при глубоко неупругом рассеянии. Стало

быть, лобового столкновения частицы-снаряда и частицы-мишени не было и электрон мог взаимодействовать не с протоном целиком, а с какой-то его частью. Конечно, именно так и было! Точечным тогда оказывается не сам протон, а вот эта его часть. Открытые в эксперименте точечные части адронов были названы *партонами* (от слова part, что в переводе с английского и означает часть).

Итак, репутация протона (и вообще адрона) как сложной и структурной частицы спасена. Он — не точка. Точка — партон.

Теперь подумаем. Сколько партонов содержится в адроне? Один, два, десять? Но если партонов один, два или десять, то сечение рассеяния на адроне все равно расти не будет. И если партонов тысяча — тоже не будет. И если миллион — не будет. Теория сурово утверждает, что только в одном случае набор точечных частиц, содержащихся в элементарной частице, приведет к росту сечения: их должно быть *бесконечное* количество.

Вот теперь в общих чертах мы имеем партонную картину, возникшую в результате осмысления станфордских экспериментов (многократно повторенных потом и на других ускорителях). Адрон состоит из бесконечного числа точечных частиц; в глубоко неупругих процессах из адрона вырывается один из этих точечных объектов, а бесконечное их количество обеспечивает должным образом сложную структуру адрона, которая стала уже для нас родной и привычной, — так далеко мы уже ушли от древних, двадцатилетней давности, представлений об элементарных частицах.

Вот так мы и приходим к картине, обещанной в подзаголовке этой главы, — к «адронному инжиниру». Почему же раньше физики не заметили этого, ведь было проведено огромное число экспериментов

с адронами — и что же, никто не догадался? А раньше, при не столь высоких энергиях, никакого «инжира», никаких партонов и в помине не было. До каких-то энергий адрон вел себя, как совсем другой фрукт — яблоко или слива... И, зондируя его электронами, мы исследовали эту, яблочную, структуру.



Итак, появились партоны. Известно нам о них, стало быть, только следующее: они — точки и их бесконечно много. Информации маловато. Кроме того, как-то неуютно от того, что нам приходится устраиваться заново в мире микрочастиц, заводить совсем новую, партонную мебелировку...

Мы уже немного попривыкли к кварковым моделям и конструкциям, неужели все это надо выбросить и забыть, и перейти полностью на новый язык? Может быть, попробуем все-таки использовать уже имеющиеся строительные материалы? Вот возьмем и объявим, как говорится, не глядя: пусть партоны — это и есть кварки.

Ну, ерунда какая, скажете вы, кварков всего три, а партонов бесконечно много, затем... Затем... А, собственно, что еще мешает нам объявить партоны кварками?.. Ничего существенного, как будто бы. Вернемся к первому возражению: кварков в адроне — три. Так ли строго это утверждение?

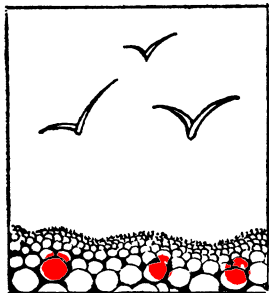
Оказывается, совсем нет. Более того, кварков в адроне должно быть на самом деле намного больше. Известно, что частицы существуют не в абсолютном вакууме, которого вообще не бывает, а в вакууме физическом, т. е. сложном физическом образовании, предсказываемом квантовой теорией поля и проявляющемся во многих тонких, но надежно открытых эффектах. А из вакуума рождаются

(сами по себе или при воздействии внешней частицы) пары частиц и античастиц, которые затем снова исчезают в вакуумном мире и тогда именуются *виртуальными* или, если хватает энергии, остаются жить в качестве уже нормальных частиц. И внутри адрона происходит то же самое. Кроме трех законных кварков возникают виртуальные пары кварков-антикварков. Сколько? Да, сколько угодно, они — виртуальные, им энергии не надо, они не проявляются в наблюдаемых процессах. Бесконечное количество — пожалуйста.

Стоп! Что же выходит: наше предположение, сделанное, в общем-то, в состоянии отчаяния, оказалось разумным? Кварки и есть партоны?

Во всяком случае, такая модель существует, и вполне серьезно. Кварк-партонная модель не только используется с успехом для объяснения разного рода эффектов, но и имеет еще одно любопытное подтверждение. Оказывается, в такой модели можно рассчитывать средний заряд партона и выражать его через величины, непосредственно измеряемые экспериментально. При этом получается дробное значение электрического заряда партона! А ведь, как мы запомнили, ни одна элементарная частица (ни открытая, ни предсказанная) дробного заряда не имеет. Ни одна, кроме кварка.

Так что же, можно твердо сказать, что партоны суть кварки? Нет, это было бы преждевременно. Здесь, в моделях структуры адронов, приходится делать столько предположений и неизбежных упрощений, что твердые заявления становятся не вполне уместными. Мы наощупь ищем



дорогу в этом новом для нас мире, и истина, доступная нам, пока что многовариантна. Кварк-партоновая модель неплоха и резко не противоречит никаким фактам, как будто бы. Но не противоречит основным фактам, к примеру, и модель, в которой роль партонов играют — не удивляйтесь! — пи-мезоны.

Однако вернемся все же к кварк-партоновой модели. Легко видеть, что в ней кварки довольно резко делятся на два вида. Во-первых, кварки, которые должны содержаться в адроне из соображений симметрии — три кварка в барионе и кварк с антикварком в мезоне. А во-вторых, все остальное неисчерпаемое море кварк-антикварковых пар. Никакого воздействия это море на вид нашего адрона не оказывает: для всех адронов оно, в общем, одинаково. И вся индивидуальность адрона содержится в первой тройке кварков (или первой паре кварк — антикварк), в *валентных* кварках.

Прозвучало знакомое слово, или, может быть, вы немного забыли школьный курс химии? Напомним: *валентными электронами* в атоме называются те электроны, которые находятся на внешней оболочке. Они-то и определяли химические свойства элемента. А сидящие в глубине другие (иногда очень многочисленные) электроны химическую природу элемента почти не затрагивали. Правда, похоже на нашу ситуацию с кварк-партонами?

И вот что еще. В атоме все электроны сами по себе абсолютно одинаковы, только играют разную роль (в зависимости от занимаемого положения). Точно так же и кварки (трех видов) в кварк-партоновой модели в принципе все одинаковы, но лишь некоторым из них суждено играть роль определяющих, валентных, кварков, выделяясь из моря пар.

Однако должен заметить, что и этим не ограни-

чивается стремительное увеличение числа деталей, из которых созданы адроны. Дело в том, что кваркам (или кварк-партонам) необходимо еще как-то между собой взаимодействовать. Мы знаем уже, что в микромире взаимодействие — это всегда обмен какими-то квантами, частицами: фотонами, мезонами... И кварки надо снабдить такими переносчиками, чтобы как-то их связать, склеить, что ли. Введем такие частицы, раз теория требует. По-английски клей будет «глю» (glue), вот и частицы-переносчики наименовали *глюоны*.

Глюоны свое дело знают и кругом себя оправдывают. Однако это такие умозрительно придуманные частицы, что им на белый свет появляться вовсе заказано. Кварков — и тех не видно, а уж привязанных к ним посредников-переносчиков грех и требовать.

Глюоны внутри адрона — дело сейчас очень привычное для теоретиков. Можно вести весьма осмысленные споры о том, каковы их свойства, их квантовые числа. Но адрон для них — такая же тюрьма, как и для кварков...

Пора, между тем, вернуться к нашим партонам. Сейчас я буду излагать нечто неожиданное, следите.

Партон — точка. Представим себе, что по адрону ударили с такой силой, что он начал разваливаться на свои партоны. Что говорит теория о таком процессе? А вот что. Прежде всего партон не сможет появиться наружу как реальная частица — ему это не положено (как и любому объекту типа кварка, глюона и т. п.). Значит, партон должен распасться на что-либо реальное. Как, точка, и вдруг должна распасться? На что же может распасться точка? Мы так старательно доказывали именно точечность партона, именно отсутствие у него протяженности. И были правы, между прочим. А точка-партон все

же распадается. Угадайте, на что? На адроны, которые опять состоят из партонов, и т. д., и т. д.

Вот так мы впервые сталкиваемся с новой ситуацией, принципиально новой. Вместо модели матрешек, вкладываемых одна в другую, возникает «самозашнуровка». К этому понятию мы еще вернемся.

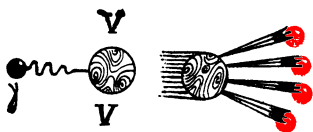
А сейчас ответу на вопрос, который, возможно, у вас появился.

Вопрос такой: да бывает ли это все в реальном мире, эти превращения точки в сложные системы, эти samozашнуровки? Ведь мы уже не очень-то четко представляем, о чем идет речь: партоны гипотетичны, ненаблюдаемы в принципе, а мы здесь рассуждаем о каких-то принципиально новых концепциях, основанных на их рассмотрении...

Может быть, дом наш строится на песке? Нет. Такие ситуации встречаются не только в призрачном мире партонов. На что уж, казалось бы, безобидная и давным-давно изученная частица — фотон. Простенькая очень к тому же: никакой структуры у него, у фотона, и в помине нет. И вот с этим простым, «комнатным» обитателем микромира, оказывается, происходит следующее: вдруг, неизвестно почему и не взаимодействуя, вроде бы, ни с чем, он превращается в векторный мезон и далее летит уже этот векторный мезон, неизмеримо более сложный, чем его родитель — фотон...

Вот что любопытно здесь больше всего: как из простого объекта образуется сложный. Да не какой попало сложный, а вполне определенный — мезон, со вполне определенными свойствами? Иначе говоря, как мезон догадывается, что ему надо произойти, родиться из фотона?

Невольно возникает мысль, что здесь работает принцип выключателя: в микромире простые объекты запускают (включают) в нужный момент про-



цессы, которые могут быть весьма непростыми и вести к рождению очень сложных объектов.

Представьте себе, что вы пришли в тир, прицелились и стреляете из духового ружья. Маленькая пуля попадает в кружок — и вот крутятся крылья мельницы, или разламывается и тонет броненосец, или вызванивает мелодия. Неужели в пуле, попавшей в жестянку на стенде тира, заложена вся эта информация: и крылья мельницы, и броненосец, и жираф, и заяц, и музыка? Нет, конечно, не в пуле это все содержится, а в устройстве тира. А пуля наша просто включает пусковой механизм.

Вот и окружающий нас мир заключает в себе много механизмов в скрытом до поры до времени виде. Фотон, пролетающий в пространстве этого невероятно сложного, забитого полями мира включает вдруг процесс, который обусловлен его, мира, структурой, и тогда из глубоких слоев микромира появляется более сложный обитатель, скажем, векторный мезон.

Итак, пуля-частица, попав в цель, заставляет вызванивать сложную мелодию, но не любую, а только ту, которая записана на цилиндре шарманки. Кем? Никем, конечно. Просто таков наш экземпляр Вселенной. Единственный экземпляр, ибо других Вселенных нет, она одна.

А можно придумать другие, по-другому устроенные Вселенные? Разумеется, можно. Математики, например, строя свои конструкции, не задумываются о том, соответствуют ли их схемы реальному миру. Можно сказать, что математики конструируют миры, а физики объясняют существующий, единственный мир. Однако современная математика, при всей

ее изощренности, конструирует миры все же довольно простые, без инфраструктуры, без головокружительного спуска по ступенькам бесконечной лестницы. Физикам же приходится иметь дело с миром, данным нам извне, сложным и не зависящим от нас.

Вот такие неторопливые, философские рассуждения приходили в голову многим физикам всего несколько лет назад. Правда, чувствуется в них солидная убежденность в стабильной и надежной ситуации? Как будто стабильной. На время...

Потому что опыт развития науки, в XX веке особенно, убедил, что такие периоды затишья, хотя бы даже относительного, недолги.

Мир физики 1973 года покоился, в общем-то, на трех китах — трех кварках или, в крайнем случае, на трехцветном наборе по три кварка.

А так ли это? В самом ли деле тройка — особое число в нашем мире?

ГЛАВА

4

ЦВЕТ И ОЧАРОВАНИЕ («МАРТЫШКИ В ВОЗДУХЕ ЯВИЛИСЬ»)

13. ДЕФИЦИТ ПРИЗРАКОВ

Природа всегда порождает законы
гораздо более справедливые, чем те,
которые придумываем мы.

М. Монтень

Облачко, как обычно, набежало с неожиданной стороны.

Долго-долго теория сильных взаимодействий и теория взаимодействий слабых развивались параллельно и почти независимо друг от друга. В каждой области были свои крупные события и переломные моменты, свои критические эксперименты и неожиданные открытия.

И в последние годы история шла своим порядком в каждом из разделов теории элементарных частиц. В физике адронов рождались и развивались идеи структуры частиц, наполнялись подробностями кварковые и партонные модели.

А в теории слабых взаимодействий внимание было привлечено в основном к проблемам перенормировки.

Расскажем об этом подробнее. В квантовой теории поля, которая была и остается основой теоретического описания мира микрочастиц, еще в довоенные годы возникла проблема, поставившая под угрозу существование всей теории. Расчеты, сделанные в рамках квантовой теории, давали бесконечные значения для зарядов и массы электрона. О других ча-

стицах и разговора не велось: методов расчета масс и зарядов сильновзаимодействующих частиц, адронов, вообще не было. Основная надежда на теорию возлагалась поэтому в области электромагнитных взаимодействий, где, казалось бы, методы были хороши и следовало ожидать больших удач при сравнении с экспериментом.



И вдруг — такой конфуз с электроном! Провал квантовой электродинамики был бы жесточайшим ударом для квантовых концепций вообще. Тогда была предложена идея устранения бессмысленных бесконечностей из предсказаний теории. Строгая математическая схема этого устранения и представила собой *теорию перенормировок*. Последовательное использование такой схемы в квантовой электродинамике привело к поразительному согласию с экспериментом. Точность совпадения предсказаний квантовой электродинамики с измеряемыми величинами беспрецедентна!

Трудности с бесконечностями (расходимостями) двадцать лет считались указанием на принципиальную ущербность квантовой теории поля. Полагали, что необходимо совершить какую-то революцию в подходе к микромиру, изменить коренным образом сами основы физики. Обсуждались, например, теории введения прерывного пространства — пространства, разбитого на клеточки. Причем довольно большие, намного больше размеров элементарных частиц. Но это уже было крайностью.

Надо заметить, что физики не очень-то любят совершать революции в своей науке. Хотя и говорится часто, и пишется в научно-популярных журналах, что

«революция в физике продолжается», но подавляющая часть специалистов сопротивляется очередной «революции» до последней возможности. Только в том случае, когда исчерпаны все ресурсы обороны на рубежах прежней теории, когда природа приносит железное слово принципиального эксперимента, приходится соглашаться на скачок в новую, неизведанную область знания...

В критической ситуации с бесконечностями в квантовой электродинамике удалось избежать «кровавопролития» — теория перенормировок позволила устранить сложности, более глубоко отразив суть квантовой теории поля. Пришлось только отказаться от претензии вычислить массу и заряд электрона, зато уникальная точность других вычислений сделала квантовую электродинамику самым совершенным произведением человеческого разума.

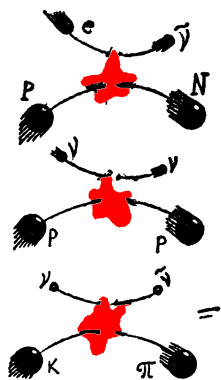
Итак, для электромагнитных взаимодействий удалось обойтись удачной реформой. А как в теории слабых взаимодействий? Проблема перенормировок, конечно, существует и там, и многие стремились построить такую теорию слабых взаимодействий, которая была бы тоже избавлена от бесконечных величин. По разным причинам весьма специального свойства эта задача решалась труднее и медленнее, чем в электродинамике, но постепенно перенормируемая теория слабого взаимодействия выстраивалась. В этой теории было одно важное предсказание: существование нейтральных токов. Обычно в экспериментах наблюдались слабые взаимодействия такого вида, при котором меняется заряд частицы, например столкновение нейтрино с нуклоном приводит к рождению электрона (или мюона, в зависимости от вида нейтрино) и другого нуклона. Было, стало быть, нейтрино, появился электрон: процесс идет через так называемый *заряженный*

ток. А если нейтрино взаимодействует с нуклоном и снова получаются нейтрино и нуклон, этот процесс идет через *нейтральный ток*.

Предсказанный теоретически нейтральный ток был открыт несколько лет назад с помощью пузырьковой камеры «Гаргамель» на Женевском ускорителе. Теоретики были довольны, и новооткрытые нейтральные токи какое-то время были одной из главных тем, обсуждаемых в физических лабораториях мира. Но капля горечи была и в этом приятном событии: кроме нейтрального тока, открытого на европейском ускорителе, теория предсказывала и другой вид его. Процессы, идущие с участием такого тока (нейтральный ток с изменением странности), должны, например, приводить к распадам K -мезона, на пион, нейтрино и антинейтрино. Действительно, странность изменяется в таких процессах: у K -мезона она есть, а у частиц, которые появляются при его распаде, странность отсутствует.

Процесс этот — не очень частый, однако теория позволяет вычислить, насколько часто он все же происходит, а экспериментально это можно проверить... Вычисление оказывается грубо ошибочным. Процессы, обусловленные нейтральным током с нарушением странности, происходят в сотни тысяч раз реже, чем предсказывает теория.

Что делать? Отвергнуть теорию? Нет, разумеется, это было бы преждевременно. Ее еще можно подправить. Можно сделать так, чтобы те члены в формулах, которые предсказывают лишние и неприятные процессы, исчезли.



Однако для этого трех кварков недостаточно. Как ни старайся, в моделях с тремя кварками остаются лишние процессы.

Вот — чисто формально сначала! — и попробовали ввести еще один кварк, четвертый. И все вышло прекрасно: трудности исчезли, предсказания теории пришли в замечательное соответствие с экспериментом...

К четвертому кварку стали относиться довольно серьезно. Правда, и первые-то три кварка так и не были открыты, а продолжали вести свое призрачное существование в моделях теоретиков, хороших, но моделях.

Получается, призраков тоже должно быть не сколько заблагорассудится, а столько, сколько нужно для косвенного согласия с экспериментом — судьей жестоким. История с нейтральным током впервые после 1963 года привела нас к осознанию дефицита призраков.

А дело, между прочим, обстоит серьезно. $SU(3)$ -симметрия, основанная, как мы помним, на трех-кварковой модели, уже получила множество подтверждений. Неужели теперь, из-за одного факта, да к тому же взятого из физики слабых взаимодействий, надо разрушить это прекрасное здание?

Да полно, так ли уж верим мы в теорию слабых взаимодействий?..

Здесь столкновения теоретических взглядов окажутся неразрешимыми, до тех пор, пока, мы не обратимся с вопросом к природе: есть ли четвертый кварк или нет его?

Как, однако, это узнать? Кварков ловить мы как не умели, так и не научились. А вот как: из четырех кварков можно настроить намного больше видов мезонов и барионов, чем из трех. Это понятно, и объяснять здесь нечего. Но где эти дополнительные

мезоны и барионы, кто их видел? Вот если откроем их экспериментально, то реальность четвертого кварка станет неоспоримой.

Сигнал из мира слабых взаимодействий прозвучал: не надо считать $SU(3)$ -симметрию и трехкварковую модель абсолютной истиной. Вполне возможно, что эта симметрия нуждается в замене, а семейство трех кварков — в пополнении новым коллегой.

Так что же скажет эксперимент?

14. НЕВЕРОЯТНЫЙ ГОД

То, что кажется странным, редко остается необъясненным.

А. Лихтенберг

Весной 1975 года экспериментаторы говорили теоретикам в кулуарах конференций: «Мы рассмотрели последние экспериментальные данные и, к счастью, не нашли ничего удивительного...»

Чтобы оценить фантастическое звучание таких заявлений, надо знать, с какой радостью экспериментаторы объявляют обычно об открытии даже не принципиально нового эффекта или явления, а всего лишь отклонения от более или менее общепризнанной теоретической модели. Это и понятно: именно эксперимент связывает зачастую предельно абстрактные конструкции теоретической физики с объективно существующим миром, корректирует и направляет ход развития теоретической мысли. Многим экспериментаторам, честно работающим в науке долгие годы, так и не приходится испытать высшую радость исследователя — открыть новую страничку



в книге природы. Или хотя бы прочесть новую строчку. Многие и многие экспериментаторы проводят измерения, накапливают данные, в общем, ничему не противоречащие, спокойные, предвиденные... И для того чтобы радоваться *отсутствию* новых, неожиданных результатов, надо очень пресытиться их обилием...

Так и было. За год — с осени 1974 по осень 1975 года — серия крупных открытий привела к тому, что экспериментальная ситуация в физике высоких энергий и соответствующее теоретическое описание кардинально изменились. Огромное число работ оказалось устаревшим в деталях. Возникла новая, существенно более богатая картина мира частиц и их взаимодействий. Правда, эта новая картина, в общем, все еще вписывается в общую схему теоретических соображений, выдвинутых годы назад: кварков, партонov, четвертого кварка и так далее. Удивительно другое: все эти экспериментальные сенсации (вызвавшие даже эмоциональную усталость у физиков!) проявились в узком интервале энергий и обрушились на физиков за такое короткое время.

...Все началось осенью 1974 года.

17 ноября во многих американских газетах было опубликовано сообщение агентства «Ассошиэтед Пресс», которое начиналось так:

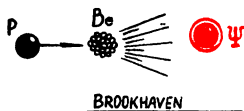
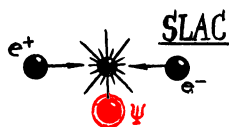
«Станфорд, Калифорния (АП). В Станфордском университете в субботу объявлено об открытии нового вида элементарных частиц — фундаментальной составляющей вещества — с новыми и непонятными еще свойствами. В объявлении сказано, что это открытие было сделано независимо на противоположных концах страны научными группами в Станфордском центре линейного ускорителя (SLAC) и в Брукхейвенской

национальной лаборатории в Нью-Йорке. Заявление было сделано одновременно обеими лабораториями. Но ученые говорят: «Открытие абстрактно. Мы не понимаем, что оно означает...»

Прошло лишь несколько лет после этого открытия, и мы уже не считаем его столь абстрактным. Да и участники эксперимента 1974 года, давая приведенное сообщение для печати, тоже лукавили... Что это открытие почти готовая Нобелевская премия, они понимали довольно четко. Когда Тинг, руководитель Брукхейвенской группы экспериментаторов, приехал в конце лета 1974 года в Станфорд и познакомился с новыми результатами коллег, реакция его была мгновенной. Сразу после беседы Тинг дал по телефону распоряжение своей группе в Брукхейвене: форсировать завершение экспериментов, которые велись в хорошем, но не бешеном темпе. А результаты калифорнийцев были таковы, что Тинг сообразил: открытие, которое в общих чертах уже было сделано в Брукхейвене, могли довести до уровня официального провозглашения здесь, в Калифорнии. Через день Тинг был уже на восточном побережье Соединенных Штатов Америки, и гонка двух прекрасных экспериментальных коллективов продолжалась до того самого осеннего дня, когда было сделано уже известное нам совместное заявление для печати; гонка завершилась вничью, и обе группы пришли к финишу одновременно. В октябре 1976 года Тинг и Рихтер (руководитель Станфордской группы) разделили Нобелевскую премию по физике...

Однако, что же именно и как





было открыто в Станфорде и Брукхейвене?

Калифорнийские физики исследовали реакцию столкновения электрона с позитроном во встречных пучках. Сталкиваясь и аннигилируя, электрон и позитрон рожают частицу, которая затем распадается на адронные или лептонные пары.

В Брукхейвенской национальной лаборатории изучался другой процесс: протонами обстреливалась бериллиевая мишень. При этом вместе с другими адронами рождалась новая частица, которая затем распадалась разными способами.

Когда были измерены масса, время жизни и квантовые числа этой новой частицы, стало ясно, что речь идет об одном и том же объекте. После краткого периода путаницы и разнобоя в названиях частица была окончательно названа *пси-мезоном*. Разнобой этот, конечно, никакой существенной роли не играет и устраняется просто сам по себе, стихийно. Новая частица, например, некоторое время называлась даже так: джей-пси (две группы, открывшие ее, дали ей соответственно эти наименования: джей и пси). Затем незаметно осталось одно название. С кварками же аналогичная ситуация затянулась. И поныне для них имеются два набора названий.

Первый, придуманный на западном побережье США, включает те же буквы, которыми обозначали частицы триплета в модели Сакаты: *p*, *n*, λ (протонный, нейтронный и лямбда-кварк). А на восточном побережье названия несколько красочнее: *u*-кварк (от слова *up* — вверх), *d*-кварк (*down* — вниз) и *s*-кварк (от слова *strange* — странный)...

Но вернемся к пси-мезону. Это довольно тяжелая частица — она более чем в 3 раза тяжелее протона и в 6200 раз тяжелее электрона. Однако гораздо интереснее то, что пси-частица оказалась весьма устойчивым образованием в микромире. Если сравним время жизни пси-мезона с временами жизни ее соседей по списку элементарных частиц, то увидим, что, например, пси-мезон живет в 2000 раз дольше, чем ро-мезон, весящий в 4 раза меньше пси-мезона, и в 6000 раз дольше, чем ро-штрих-мезон с массой вдвое меньшей, чем у пси-мезона. Вообще, как правило, чем тяжелее частица, тем меньше она живет. Не случайно в физике высоких энергий кроме термина «частица» употребляется еще и термин «резонанс», о котором мы уже упоминали. Собственно говоря (если не вдаваться в сверхтонкости), резонанс — это тоже частица, но очень короткоживущая. Часто такой резонанс представляется просто как мгновенное объединение других, более стабильных частиц. Это объединение-резонанс появляется только при некоторых особых условиях и тут же разваливается. Поэтому если тяжелая частица живет сравнительно долго, то уже одно это привлекает к ней внимание: значит, это объект с особыми свойствами. Не временный жилец.

Были, конечно, открытия таких частиц и прежде. Вспомним еще раз знаменитое открытие омега-гиперона в 1964 году — открытие, * триумфально утвердившее в физике элементарных частиц $SU(3)$ -симметрию и связанный с ней классификационный порядок. Частицы, как известно, были тогда рассажены по клеткам, и на этих клетках были развешаны изящные таблички... И омега-частица немедленно была водворена в клетку, уже заранее заготовленную для нее... Ее предсказали, ее массу теоретически вычислили; а затем эту частицу открыли...

Классический — и очень приятный — вариант. Пси-частицу никто твердо не предсказывал.

...Знаменитый английский схоластик XIV века, один из ранних предшественников Реформации Уильям Оккам выдвинул положение, которое намного пережило и автора и все его произведения. Сам Оккам формулировал это положение так:

«Без необходимости не следует утверждать многое», или, немного иначе:

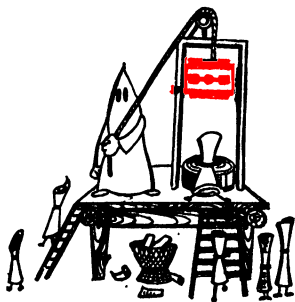
«То, что можно объяснить посредством меньшего, не следует выражать посредством большего».

Исследователи более поздних времен придали этим идеям Оккама чеканную форму:

«Сущностей не следует умножать без необходимости». Этот тезис известен в истории науки под названием *бритва Оккама*. Бритва — ибо она отсекает лишние, избыточные предположения, очищая теорию от мифологических грехов. Эта бритва, надежно взятая на вооружение учеными нового времени (в том числе и не подозревавшими о существовании старого номиналиста Оккама), послужила гильотиной для теплорода, эфира, не говоря уже и о не столь знаменитых заблуждениях...

Руководствуясь этим славным научным положением, физики попытались сразу же втиснуть пси-частицу в рамки $SU(3)$ -симметрии.

Одна из таких попыток — модель пси-мезона как связанного состояния омега- и анти-омега-частиц. Идея эта возникла оттого, что в системах нуклон-антинуклон уже наблюдались связанные состояния.



А для того чтобы наша частица (пси-мезон) была относительно стабильной, надо, чтобы и составляющие ее объекты были достаточно стабильными. Масса же их, естественно, не может быть меньше половины массы пси-мезона. Эти условия и указывают на омега-мезон как на весьма вероятную составляющую пси-мезона. Однако все же омега-мезон стабилен не вполне, он распадается. И пси-мезон тоже должен распадаться на пары кси — антикси и т. д., а этого эксперимент, увы, не дает с точностью, которую предсказывает модель.

Нет, модель пси-мезона как связанного омега-анти-омега-состояния не так уж безобидна. Она требует, если следовать логике, признания существования и других связанных состояний нуклонов и антинуклонов, которые должны были бы проявиться в эксперименте. Однако их нет. И модель омега-анти-омега не то чтобы была кем-либо корректно и окончательно опровергнута, а просто постепенно перестала привлекать интерес к себе и тихо угасла.

А между тем поиски других частиц, кроме пси-мезона, в этой же области энергий идут очень интенсивно. Уже через несколько месяцев после обнаружения пси-мезона, в 1975 году, была открыта еще одна частица, получившая название пси-штрих-мезон (с массой 3650 Мэв). А затем — еще несколько, с массами 4100 , 4400 Мэв и так далее. Только за 20 месяцев, прошедших после открытия первой частицы пси-семейства, было обнаружено не менее дюжины совершенно новых адронных состояний с массой от 1800 до 4500 Мэв .

Это уже не одна случайная капля дождя, а целый ливень событий.

Надо искать объяснения — и серьезно.

15. «ВСЕШ МИР СТАЛ ПОЛОСАТЫЙ ШУТ»

Наше незнание достигает все более далеких миров.

Ст. Ежи Лец

Пси-частицы не объясняются $SU(3)$ -симметрией. Их никак нельзя втиснуть в имеющиеся семейства в этой области энергии: все семейства надежно и довольно давно заполнены. Где же выход? К сожалению консервативно настроенных физиков, исповедующих бритву Оккама как основной принцип, существующей физикой обойтись не удастся. Это означает, что из трех кварков пси-частицы не построить. Из трех кварков — нет, а из девяти? Помните, мы уже обсуждали возможность того, что кварки бывают трех видов — могут быть «цветными»?

Да, эта модель представлялась довольно приемлемой: пси-частицы начали строить из разнообразных комбинаций цветных кварков. Возникла довольно обширная спектроскопия частиц, построенных из цветных кварков. И, конечно, было предсказано множество частиц сверх уже обнаруженных экспериментально. Это еще не так страшно: оставалась возможность открыть их в будущем, а их отсутствие в настоящем ничему пока не противоречило. Однако цветную модель пси-частиц подстерегала другая опасность, оказавшаяся в конечном счете для нее роковой.

Модель, основанная на цвете, предсказывает не только массы и уровни для частиц, но и способы, которыми они распадаются. Все эти предсказания относительно распадов пси-частиц, сделанные в цветной модели, можно было проверить быстро, не дожидаясь других экспериментов. В частности, цветная модель предсказывала, что большинство распа-

дов пси-штрих-частицы в пси-частицу происходит с испусканием фотонов. А природа, увы, с этим несогласна. И такие (радиационные) распады идут гораздо реже, чем это предсказывается моделью пси-частиц на основе цвета.

Что же, цвет, таким образом, исключается из рассмотрения? Нет, нет — он просто недостаточен для объяснения всей ситуации с пси-частицами — для разъяснения «пси-хологии», как позволяют себе шутить некоторые физики.

Однако если не с помощью цвета, то как же все-таки мы сможем ввести новоприобретенные частицы в «приличное» общество? Используя четвертый кварк. Тот самый четвертый кварк, необходимость которого следует из истории с нейтральными токами. Это рука помощи, протянутая физикой слабых взаимодействий физике сильных взаимодействий, оказывается спасительной.

Неслучайно поэтому новое квантовое число, приписанное четвертому кварку, носит такое милое имя. Однако мы не назвали его до сих пор! Теперь пора.

Четвертый кварк, возникший в теории слабых взаимодействий, обладает *очарованием*. Именно так названо было это дополнительное квантовое число. Итак, четвертый, *очарованный*, кварк оказывается спасительным для проблемы пси-частиц! А именно, первая из открытых пси-частиц представляет собой, по-видимому, мезон, составленный из очарованного кварка и очарованного антикварка.

Такую частицу (символически обозначим ее кварковое содержание как $c\bar{c}$, т. е. очарованный кварк плюс очарованный антикварк) называют на жаргоне

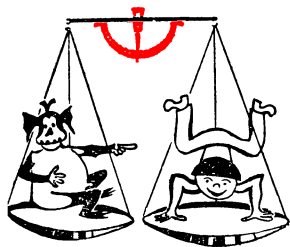


физиков-теоретиков *частицей со скрытым очарованием*. Скрытым потому, что очарование кварка компенсируется тут же антиочарованием соответствующего антикварка и в целом для пси-частицы никакого очарования не остается. Другими словами, у нее нулевое очарование. А другие частицы, открытые в течение «невероятного года»? Они имеют то же кварковое содержание $c\bar{c}$. Только кварки там более возбуждены, могут вращаться вокруг друг друга (или относительно общего центра масс) с разной скоростью; спины их могут быть сориентированы по-разному и так далее и тому подобное. Все эти возможности и позволяют объяснить появление множества частиц семейства пси. Качественно, конечно. Чтобы объяснить детали их взаиморасположения на энергетической лестнице, способы распадов и вычислить все наблюдаемые эффекты, именно вычислить, дать *число*, а не просто оценить, понадобится применить тяжелую артиллерию науки — математику.

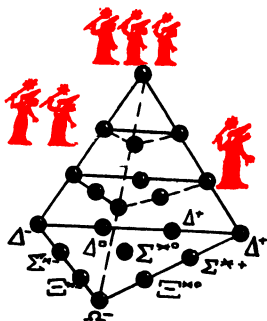
Со времени введения $SU(3)$ -группы (около 1964—1965 года) до пси-эпопеи $SU(3)$ -симметрия прошла, как принято говорить, славный путь от идеи до рабочей гипотезы, от рабочей гипотезы до модели, от модели до общепризнанной теории — и, наконец, в университетских учебниках солидно заняла свое место рядом с законами Ньютона и Максвелла.

Однако эта стремительная карьера не оградила $SU(3)$ -теорию от серьезных потрясений, вызванных все тем же четвертым кварком. Оказалось, что рамки применимости $SU(3)$ -теории (даже, как мы знаем, нарушенной) довольно узки.

В самом деле, вспомним, из ка-



ких соображений вводился в теорию слабых взаимодействий четвертый кварк. Чтобы скомпенсировать и выбросить из формул ненужный член. Выбросить этот член надо было не частично, а полностью, и, значит, компенсирующий, четвертый, кварк не мог отличаться по массе от имеющихся трех очень уж сильно. Приходится считать, что все четыре кварка близки по массе, и математика неумолимо выводит отсю-



да наличие $SU(4)$ -симметрии — симметрии *четвертной*, сильно, но не полностью нарушенной.

Наверное, нелишне будет напомнить еще раз, что *нарушение* симметрии не означает ее несправедливости, а напротив придает ей жизненность, разводя наблюдаемые частицы по массе и позволяя реально вычислять множество эффектов и делать удачные предсказания.

Итак, $SU(4)$ -симметрия. Что же, теперь все, кажется, хорошо. Старые частицы объяснились $SU(3)$ -симметрией, т. е. той частью $SU(4)$ -симметрии, в которой очарованный кварк не задействован, новые — пси-частицы — объясняются полной $SU(4)$ -теорией как частицы со скрытым очарованием.

Хорошо. Скрытое очарование — это весьма изящный термин, но как насчет очарования обычного? Ведь мы просто предположили существование очарованного кварка. Слепив же его в теории с чарованным антикварком, получили семейство пси-частиц без всякого очарования. А ведь можно представить себе и наблюдаемые частицы с очарованием, вот, например $c\bar{p}$, $v\bar{n}$, $s\bar{\Lambda}$ и тому подобные. Очарова-

ние кварка выходит здесь наружу, в наблюдаемый мир, ибо не компенсируется другим кварком. Если семейства в $SU(3)$ -симметрии можно размещать в фигурах на плоскости: в треугольниках и шестиугольниках, — то семейства $SU(4)$ -группы образуют уже фигуры в пространстве. Вместо треугольника, изображающего декуплет барионов, получим теперь тетраэдр, объединяющий 64 частицы. Старая наша десятка из $SU(3)$ -теории теперь образует основание этой пирамиды, а частицы с очарованием находятся на верхних ее этажах...

Будут в природе существовать такие частицы или нет? $SU(4)$ -теория предсказывает их безапелляционно. Их отсутствие было бы для этой симметрии, да и для всей идеи с очарованным кварком, сильнейшим, возможно даже неоправданным, ударом. Экспериментаторы задали природе этот вопрос. В предсказанной теории области начался поиск частиц, которые должны были обладать дополнительным квантовым числом — очарованием.

Как это обнаружить? На частице этикетки нет и фея не нарисована... А вот как: квантовое число — вещь достаточно серьезная. Если уж мы вводим такое понятие, то это означает, что оно должно сохраняться по крайней мере в каком-то классе процессов. И очарование, подобно странности, сохраняется при сильных взаимодействиях. Значит, очарованная частица может распадаться только из-за слабых взаимодействий, которые на сохранение очарования внимания не обращают.

Действительно, если есть очарованная частица минимальной массы, то куда же ей распадаться сильным образом? Ниже ее очарованных частиц нет, а нарушать закон сохранения квантового числа (очарования) ей отнюдь не дозволено.

Остается один выход: слабый, а значит, довольно

медленный распад. Из всего этого следует, что надо искать частицу, которая $SU(3)$ -теорией вообще не предсказывается, а $SU(4)$ -теорией предсказывается, причем указывается примерная область ее нахождения (по массе); распадается эта частица не очень быстро, а в точности так, как предсказано сохранением очарования при сильных и нарушении его при слабых взаимодействиях. Далее дело умения экспериментаторов. Теоретикам оставалось ожидать приговора. Новую, очарованную, частицу следовало ожидать в области $1,85-1,95 \text{ Гэв}$.

... Летом 1976 года на встречных электрон-позитронных пучках Стэнфордского ускорителя был обнаружен мезон с массой $1,865 \pm 0,015 \text{ Гэв}$ и со свойствами очарованной частицы. Это — очень важный результат. Назвали очарованную частицу D -нуль-мезоном (она электрически нейтральна). Есть сведения об открытии также ее заряженных партнеров: D -плюс- и D -минус-частиц... И другие, более возбужденные и более тяжелые частицы из этого семейства явились на свет.

Мы сейчас говорили о мезонах, а ведь появление четвертого кварка должно проявиться и в существовании дополнительных барионов (частиц с верхних этажей пирамиды), не так ли? Так, конечно. И уже есть первые экспериментальные данные о том, что существуют очарованные барионы... Очарование стало фактом физики высоких энергий. Четвертый кварк легализовался.



А как же с цветом? Несмотря на неудачу с объяснением пси-частиц, цвет все также нужен теории. Ведь трудности со статистикой (помните?) можно устранить только введением трех наборов кварков... Кроме того, очень привлекательная модель асимптотической свободы тоже невозможна без введения цвета.

Значит, можно сказать так:

цвет нужен для решения трудностей в сильных взаимодействиях;

очарование необходимо для решения проблем слабых взаимодействий.

Эксперимент благосклонно подтверждает существование новых, неожиданных и многочисленных частиц. И кварков теперь великое множество: три набора (разных цветов) по четыре кварка...

Как говаривал Г. Р. Державин:

«Весь мир стал полосатый шут,
Мартышки в воздухе явились...».

16. МЕДВЕДЬ НА ДЕРЕВЕ

Ибо указать одну единственную причину недостаточно: нужно указать многие, из которых одна и окажется подлинной.

Лукреций Кар

Кто захочет побить собаку, тот
найдет палку.

Бейли

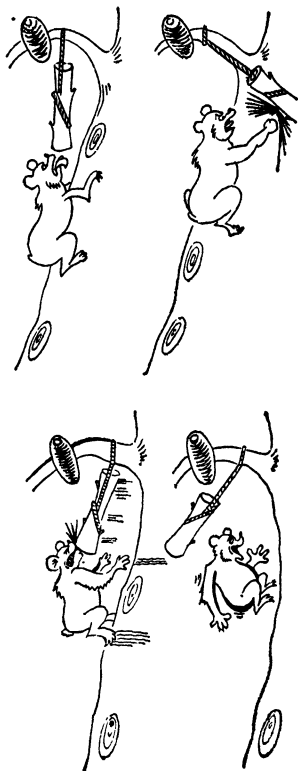
В детских хрестоматиях прошлого века неизменно присутствовал поучительный рассказ о жадном медведе. Перескажем и мы его.

Медведь увидел на дереве рой пчел и захотел отведать меду. Полез на дерево, а там бревно на веревке висит. Обхватить дерево лапами медведь не может — лап не хватает. Отвел он бревно лапой в

сторону и затеял лезть дальше, а бревно, качнувшись на веревке, стукнуло его. Осерчал медведь и посильнее надоедливое бревно толкнул, оно посильнее его и стукнуло. И сражался глупый медведь с бревном, пока его совсем с дерева наземь не сшибло...

К чему мы эту притчу вспомнили? Чтобы лучше понять историю, происшедшую с величиной R . Прежде всего, разумеется, объясним, что же это такое величина R .

Мы знаем, что интенсивность взаимодействия в микропроцессах измеряется сечением. Чем больше сечение, тем интенсивнее взаимодействие. Теперь представим себе, что происходит столкновение электронов с позитроном и в результате получают отрицательный и положительный мюоны. Оба набора частиц (насколько это известно сегодня) можно считать точечными. Естественно поэтому ожидать, что такое взаимодействие будет существенно меньше, чем аннигиляция тех же электронов с позитроном в частицы с более сложной структурой — в адроны. Так и происходит на практике. А отношение этих двух сечений аннигиляция (в мюоны и в адроны) и есть величина R (буква R здесь от английского слова ratio — отношение).



Ясно, что R в какой-то мере должна характеризовать сложность адронов. Партоновая модель предлагает приближенную формулу для R . Приближенную, потому что дополнительные эффекты (*эффекты второго порядка*) вносят некоторые поправки, впрочем, не очень существенные.

Формула, о которой мы говорим, проста, и поэтому ее можно пересказать словами, что вообще-то для формул противопоказано. Величина R равна сумме квадратов электрических зарядов тех частиц, которые могут содержаться в адронах. Ну, какие частицы-составляющие имеются здесь в виду? Разумеется, кварки или, в партоновой модели, валентные кварки. А заряды кварков и их количество в адронах нам теоретически известны; значит, можно попробовать подсчитать R по нашей формуле. Начнем с самого простого случая.

Электрон аннигилирует с позитроном. Модель — обычная кварковая; кварки — с дробными зарядами. У одного кварка заряд равен двум третям, у второго и третьего — минус одной трети. Берем квадраты этих значений и складываем. Получается, как все могут убедиться, шесть девятых, или две трети.

Написав этот несложный результат, теоретики отправились к экспериментаторам, изображая на лице незаинтересованность в результатах сравнения и любовь к объективной истине, но с тайной надеждой на очередной успех. Успеха, однако, не было. Эксперимент показывает: R равно примерно двум. Причем эта двойка остается неизменной при разных энергиях — от очень небольших до 2—3 Гэв. Ни о каких двух третях, увы, нет и речи.

Вот здесь-то и пригодится нам — в очередной раз — понятие цвета. Если у нас имеется три набора кварков, то предыдущий результат ($2/3$) надо

просто взять три раза — ведь теперь в адроне (в принципе!) может быть девять различных видов кварков. И получается та самая двойка, которую и показывает эксперимент.

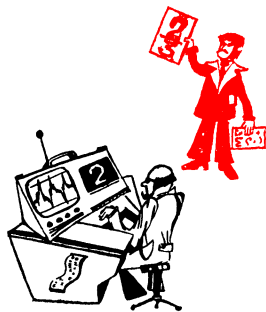
Итак, в пользу цвета уже есть минимум два независимых и непредвзятых свидетельства: цвет помогает справиться с трудностями классификации в рамках теории симметрии и он же, цвет, объясняет значение величины R , измеряемое экспериментально. Даже в строгом и неподкупном римском праве двух свидетелей было достаточно для благоприятного рассмотрения дела в суде...

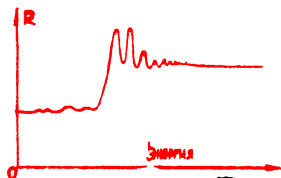
Итак, можно вынести приговор по «делу о цвете кварков». — Да, он существует.

Имеется три набора кварков. Однако, позвольте, сколько же кварков содержится в каждом из наборов: три или четыре? Чтобы объяснить величину R , как мы сами только что посчитали, необходимо иметь именно три кварка в каждом из наборов. А как же насчет очарования и очарованного, четвертого, кварка?

Здесь обнаруживается любопытная вещь. Приведем график изменения R с ростом энергии, при котором измеряются сечения, входящие в определение величины R .

Смотрите, на уровне двойки тянется ровная линия, а потом в районе примерно 4 Гэв происходит что-то неожиданное и важное в микромире: всплески на графике подобны сейсмограмме не чувствительного для нас, но очень сильного землетрясения, затем все постепенно успокаивается, и снова тянется ровная прямая линия, но уже на другом, гораздо более





высоком уровне. Теперь R равна примерно пяти.

Расшифровать этот график не так уж и сложно. Скачок вверх произошел именно в области пси-частиц. И именно в пси-частицах появляется (пусть неявно) очарованный, четвертый, кварк.

Неизбежно логика приводит нас к мысли: за рост R ответственно именно это появление нового героя разыгрываемой в мире адронов пьесы. Заряд его — снова минус две трети, и формула дает нам увеличение R более чем до трех. Поправки второго порядка помогают нам дотянуть R до четырех.

Что же это, неудача? Нет, теоретики считают, что такой результат очень благоприятен... Было бы самонадеянно считать, что мы открыли все составные части адронов, даже с учетом кварков, очарованных и цветных.

И в самом деле, в некоторых процессах, идущих с мю-мезонами и электронами, появились загадочные аномалии. А расшифровались эти аномалии только с пониманием того, что в них проявился новый объект, так называемый *тяжелый лептон*.

Эта история с тяжелым лептоном заслуживает гораздо большего внимания, но нельзя объять необъятного.

Нам сейчас достаточно знать, что заряд этой новой частицы — единица, и учет ее возможного присутствия в структуре адрона дает нам недостающую до экспериментальной пятерки величину.

Итак, теоретическая задача с объяснением скачка R решена взаимодействием всех родов частиц:

цветных кварков, очарованного кварка и, наконец, тяжелого лептона.

Вообще, дело здесь не просто еще в одном частном теоретическом предсказании (или объяснении частного экспериментального результата). Ступенька, прочерченная на графике R , указывает на принципиально новый и очень важный эффект. Этот результат означает, что вплоть до некоторой энергии существует одно количество основных кирпичиков материи — три набора по три кварка. Эти три кварка образуют основу прекрасной $SU(3)$ -симметрии, объясняющей почти все классификационные и еще множество других проблем в этой области энергий. Кварков три, и именно три, в каждом наборе при этих энергиях.

Однако стоит нам задать этот же вопрос о количестве кварков в адронах с большей энергией, как мы получаем совсем другой ответ: не три, а четыре! И симметрия уже не $SU(3)$, а $SU(4)$. И появляется новое квантовое число — очарование... Да, еще тяжелый лептон...

А теперь вспомните медведя, о котором мы говорили в начале этого раздела. Разве не делал он с бревном то, что мы проделываем с адронами?

Чем сильнее толкнули, тем больше степеней свободы разбудили мы в нашем адроне. Именно «разбудили» — это уже почти официальный термин в современной физике высоких энергий. Говорят о «спящих степенях свободы», «спящих квантовых числах», которые «просыпаются», когда энергия взаимодействия оказывается способной разбудить их. И тогда $SU(3)$ -группа скачком меняется на $SU(4)$ -группу. А если энергия еще более увеличится? Никто сейчас не рискнет сказать, что при увеличении энергии $SU(4)$ -группа не изменится на $SU(5)$, на $SU(6)$...

Степени свободы могут просыпаться снова и снова, и симметрия мира будет становиться все сложнее и сложнее.

Симметрия мира не постоянна, а зависит от энергии. Вот, наверное, самый важный вывод, который можно сделать из всей истории с пси-частицами и появлением на арене очарованных кварков. И лестница, первую ступеньку которой мы видим на графике R , возможно, упирается в самое небо.

17. КАЖДЫЙ ИГРАЕТ В СВОИ КУБИКИ

Построим домик из карт, но — из фальшивых.

Может быть, простоит подольше.

Ст. Ежи Лец

В июле 1976 года в Тбилиси проходила XVIII Международная конференция по физике высоких энергий. Такие конференции — главные для физиков, занимающихся теорией и экспериментом, связанными с элементарными частицами, — часто называют также Рочестерскими. Традиция эта восходит к началу 50-х годов, когда в небольшом американском университетском городе Рочестере (штат Нью-Йорк) несколько лет подряд собирались конференции по элементарным частицам. Тогда в них участвовало сорок — пятьдесят физиков в основном из Соединенных Штатов.

Эти недавние, но уже патриархальные времена вспоминаются сейчас с усмешкой; Рочестерские конференции превратились в грандиозные мероприятия, на которые съезжаются теперь до тысячи ученых из десятков стран мира. Ежегодно проводить их стало невозможно: это мероприятие слишком громоздко и хлопоты по организации не гогова брать на себя

постоянно ни одна страна. Рочестерские конференции проводятся теперь по принципу треугольника: поочередно в Советском Союзе, США и Западной Европе. Мы принимали физиков уже четыре раза: дважды в Киеве, в Дубне, а последний раз — в Тбилиси.

Жаркие дни благородного южного города, мраморные лестницы университета, цветной кирпич дорожек университетского сада... Рочестер-76 проводился под знаком очарования — к лету 1976 года было уже вполне очевидно, что пси-частицы есть и их можно объяснить только с помощью введения четвертого, очарованного, кварка.

На одном из заключительных заседаний Тбилисской конференции испанский физик Альваро де Рухула, делавший обзорный доклад по новым частицам, продемонстрировал впервые забавные картинки, уже известные нам, изображающие великолепную четверку: кварки «вверх» и «вниз», странный кварк в сатириконском стиле и прекрасную фею 1974 года рождения — очарованный кварк. И каждый из кварков может быть одного из трех цветов. Двенадцать кварков — двенадцать кубиков, из которых, как из детского конструктора, мы рассчитываем построить весь мир.

Но двенадцать — это число уже наводит на размышления: много, слишком много для истинно фундаментальных частиц. Помните, когда элементарные частицы в 50-х годах размножились до неуютного количества в несколько десятков, возникла идея о существовании частиц, из которых составлены «элементарные»...

А не происходит ли сейчас то же самое с расплодившимися кварками? Наученным опытом физикам хочется попробовать и для кварков найти частички, которые попроще и пофундаментальнее. Это — од-



на линия рассуждений и предложений. А другие идеи, возникающие при размышлении над немаленькой таблицей кварков, связаны, видимо, с одним из свойств человеческой психологии...

В Коране есть, как известно, один основополагающий принцип: «Нет бога, кроме Аллаха». В Исламе бог один, и именно поэтому за многие века его существования Аллах остался для мусульман богом единственным. Совсем не то происходит в религиях политеистических. Если, например, в пантеоне есть десять богов, то совершенно не кажется кощунством ввести в него еще одного-двух божеств, присвоив им соответствующие функции. Для этого незачем даже использовать богов чужеземных. Так, появились в Риме храмы египетского Сераписа и сирийской Астарты...

Пока кварков было строго три, ни у кого не поднималась рука на это священное число. А если природа позволяет существовать четвертому кварку, то все психологические барьеры рушатся и можно позволить себе навыдумывать сколько угодно новых частиц... И в самом деле, появились и теории с числом кварков более четырех (не считая цвета) и теории, в которых кварки сами состоят из других частичек...

Поговорим о некоторых из этих моделей. В самом начале пси-эпопеи, когда были известны только две частицы пси и пси-штрих, — можно было позволить себе фантазировать намного свободнее, чем позже. Объяснить существование двух частиц и их относительное расположение можно ведь не одним, а многими способами.

Еще в начале 1975 года некоторые авторы предлагали в качестве вполне приличной модели $SU(5)$ -группу и соответственно вводили кроме четвертого кварка с квантовым числом очарование еще и пятый кварк с квантовым числом fapsy — фантазия... Эта модель в общем-то не вызвала энтузиазма и рухнула под напором новых экспериментальных данных довольно быстро.

Подольше продержалась шестикварковая модель с двумя тройками кварков: три обычных и три тяжелых. Такая модель была поизящнее, но приводила к предсказанию некоторых эффектов, ненаблюдаемых экспериментально. Чтобы как-то разобраться с этим, приходилось, между прочим, вводить произвольным образом деление кварков на активные и «временно пассивные». В обиходе сторонников этих моделей появились смутные и малосодержательные слова об «отсрочке некоторых степеней свободы» до более высоких энергий и тому подобные непохвальные для хорошей модели свойства... То есть сама по себе, в философском плане, эта идея о динамической, переменной симметрии вполне хороша, но вот произвольное жонглирование в конкретной модели с количеством и качеством («пассивные») кварков — весьма нежелательно. Поэтому все модели с числом кварков более четырех (в каждом цвете) утратили постепенно большинство своих приверженцев.

Но кто знает? Открытая (как будто) в 1977 году очень тяжелая частица (масса более 10 Гэв) опять возрождает моду на модели с тяжелыми кварками: из легких такую



махину не выстроишь — материала не хватит. Появляются кварк *b* (*beauty* — красота) и кварк *t* (*truth* — истина). Ограничимся пока моделью с тремя цветами и четырьмя видами, или, как принято говорить, *ароматами* (*flavours*) кварков. А теперь можно подумать: являются ли кварки сами составными частицами?

Давайте посмотрим, какие свойства у нас соединены с кварками. Каждый кварк имеет цвет: цветов три, и аромат: ароматов четыре. А что если предположить существование совсем уже фундаментальных, исходных частиц, каждая из которых обладает или только цветом или только ароматом? А соединяясь попарно вместе, они и образуют кварк с обоими качествами. Абдус Салам, человек артистичный и изобретательный, предложил такую схему и назвал эти сверхпростые частицы *преонами*.

Более того, в эту схему для совсем полного душевного утешения авторы пожелали включить и лептоны. Вы ведь замечаете, что даже четвертый кварк, подаренный адронам теорией слабых взаимодействий, очень быстро забыл о своем происхождении. Это теперь просто еще один кварк, из которого строятся адроны. А между тем с появлением очарованного кварка возникает любопытная симметрия между основными частицами сильных и слабых взаимодействий. В адронном мире — четыре кварка (трех цветов). В лептонном мире — четыре основные частицы: электрон с электронным нейтрино и мюон с мюонным нейтрино.

Остается сделать последний шаг. Лептоны являются равноправной с кварками четверкой фундаментальных объектов и им просто приписывается свой, четвертый, же цвет. У Салама — фиолетовый или сиреневый... Итак, имеем набор из четырех объектов четырех цветов. Это уже достаточно изящно.

Очевидно, что все множество как лептонов, так и адронов можно построить теперь из четырех преонов, обладающих ароматом, и четырех же преонов, несущих цвет (сиреневый клеймит слабостью взаимодействия...). Всего восемь частиц, из которых построен весь мир. Неплохо, верно ведь?

Жаль только, что вся эта эстетически привлекательная картина ничем не подтверждена и экспериментально пока не доказана, даже и предложений по ее проверке нет. Кстати, тяжелый лептон красоту этой схемы очень заметно подпортит... Поэтому вся преонная концепция пока просто приятная для глаза игрушка. Это ей не в укор говорится — в дальнейшем ее статус вполне может измениться в сторону серьезности. Так что же мы видим спустя два-три года после открытия пси-частиц, взорвавших уже обжитой мир $SU(3)$ -симметрии?

... Вы наблюдали, наверное, такую картину в детском саду, когда малыши собираются группками по углам и играют в свои кубики — каждая группка в свои. У одних домики получаются получше, у других похуже... И споры, и даже драки возникают из-за этого, и горькие обиды. А потом приходит воспитательница и объясняет малышам, что кубики лучше объединить и построить один, но хороший замок... И замок воздвигается.

Физики играют в свои кубики, пока каждый в свои, но и к ним явится своя «воспитательница», которая в конечном счете заставит их объединиться. Всегда так бывало раньше; конечно, будет так же и теперь. Эта строгая воспитательница — природа.



ГЛАВА
5
СТАТИСТИКА
(ИЕРАРХИЯ ИЛИ ДЕМОКРАТИЯ?)

18. ВАКУУМНЫЙ ОКЕАН

Мир возник, наверное, из страха
перед пустотой.

Ст. Ежи Лец

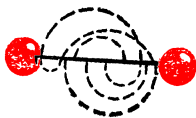
Мы уже поняли, что жизнь в мире элементарных частиц далеко не проста и не элементарна.

Истинно фундаментальных частиц, точнее говоря, претендентов на это звание, слишком много для того, чтобы хотелось верить в их фундаментальность. Кроме того, согласно теории, вокруг каждой из частиц создается поле, которое можно рассматривать как особый вид материи, а можно считать и набором частиц — переносчиков взаимодействия. Резкой границы между полем и частицами нет. Нет смысла говорить и о существующей самостоятельно единственной элементарной частице. Конечно, теоретически такое рассмотрение вполне допустимо и даже весьма полезно как первый шаг. Но реальные частицы не могут быть изолированными и самостоятельными.

Принято говорить, что частица не бывает «голой»: она одета облаком других частиц, которые, хотя никогда и не появляются в реальном мире (виртуальные частицы), все же оказывают очень важное и вполне реальное воздействие на нашу частицу.

На диаграмме квантовой теории поля показано движение электрона. Прямая электронная линия об-

растает дополнительными петлями, каждая такая усложненная диаграмма может (и должна) быть усложнена еще и еще... И если мы хотим посчитать какую-нибудь величину: или массу, или сечение, или магнитный момент частицы, — то надо принимать во внимание весь такой бесконечный ряд диаграмм, «суммировать их». Значит, нет «голых» частиц. В теоретических расчетах мы складываем эффекты от наборов диаграмм, а в эксперименте можем стукнуть одну частицу другой так, что все нарисованные пунктиром на диаграмме виртуальные частицы родятся по настоящему.



Откуда все же рождается этот фейерверк при высокоэнергетических столкновениях? Наверное, надо считать, что есть какой-то неисчерпаемый резервуар, из которого и добываются в неограниченном количестве частицы любых видов.

Действительно, не из абсолютной же пустоты они появятся. Конечно, можно и такую схему попытаться построить, но она непривлекательна. Главное, весь ход современной экспериментальной физики микромира заставляет нас считать, что «пустота» окружающего нас мира очень сложна.

Всегда физикам хотелось заполнить чем-то жуткую абсолютную пустоту. Уже Декарт пытался, как известно, заполнить Вселенную вихрями. Но это было на заре опытной науки и, пожалуй, относится еще к варварской, доисторической эпохе ее развития.

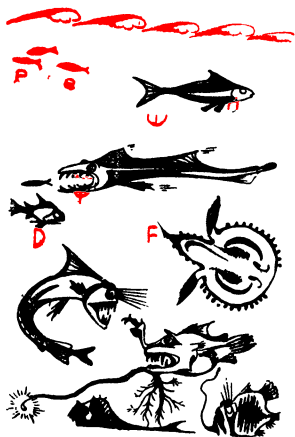
В XIX веке аналогичная концепция мирового эфира рассматривалась и рассчитывалась уже всерьез. Недаром потребовалось совершить научную революцию — создать теорию относительности, чтобы свергнуть с престола концепцию эфира. ...Однако место эфира как всепроникающей материальной

сущности пустотой занято не было. В те же десятилетия, когда создавалась и утверждалась теория относительности, родилась и квантовая механика. И вот в квантовой механике уже появилось понятие физического вакуума — неустранимой части материи, которая остается, даже если все частицы убрать из рассмотрения. А в квантовой теории поля вакуум вообще играет очень важную роль: потенциально в нем содержится все богатство мира элементарных частиц.

Вакуумный океан, из которого черпаются новые и новые частицы, стоит только возбудить его с достаточной энергией, — это океан возможностей. Кроме того, что мы уже открыли, в физическом вакууме несомненно содержится еще огромное множество новых, еще неизвестных нам объектов... В самом деле, в физическом вакууме содержались в виде возможности, например, пси-частицы, причем еще тогда, когда теоретики (и экспериментаторы) и не подозревали о их существовании. Следовательно, физиче-

ский вакуум мы можем рассматривать как хранилище не только всех уже открытых частиц, но и всех неоткрытых до настоящего времени. Вы ведь не считаете, что мы уже все открыли и на нас заканчивается история науки? Вот и физики так не думают, хотя и ценят свои достижения должным образом.

Из только что сказанного следует, что все детали строения микромира нам ни в какой момент времени до конца известны не будут. Позавчера



кварков было три, вчера — девять, а сегодня менее, чем двенадцатью не обойдешься. А потом на графике величины R возникнет новая ступенька и введут еще кварки. Кроме того, наученные опытом, мы не рискуем сказать, что и сами-то кварки — простые объекты. Преоны Салама пока что математическая игрушка, но занимаются ею всерьез и серьезные люди. И на преонах все ли кончится?

Вместе с тем, не ждать же нам, пока побольше откроют, и уже тогда браться за описание микромира... Как же быть?

Прежде чем описывать подход, заметно отличающийся по идеологии от того, что мы обсуждали в предыдущих главах, обратимся еще раз к истории физики.

К началу XX века молекулярно-атомистическая картина мира стала привычной, хотя арьергардные бои противников атомизма еще могли быть причиной гибели физиков-корпускулярщиков (как это произошло с великим австрийским ученым Людвигом Больцманом, не вынесшим травли консерваторов от науки). Однако само признание справедливости атомистических идей приводило к ситуации очень непростой. В самом деле, если все окружающее нас состоит из атомов и молекул, то кажется логичным описывать движение и взаимодействие этих частиц, а уж зная все о движении каждого из атомов, мы, конечно, сможем описать и движение любого тела, состоящего из них.

В классической (доквантовой) теории атом можно было рассматривать как твердый неделимый шарик, а движение его прекрасно описывалось законами механики, выведенными еще Ньютоном. Возьмем все атомы, содержащиеся в камне, или в табуретке, или в звезде, зафиксируем их начальные положения и скорости, напомним уравнения Ньюто-

на для каждого из атомов, учтем их взаимодействия между собой. Затем все эти уравнения решим и узнаем тем самым, что случится с нашей звездой в любой момент будущего: через секунду или через десять миллиардов лет.

Реальна ли такая задача, как вы полагаете? Для двух частиц — вполне: все уравнения можно решить, и все предсказания можно получить. Для трех частиц это уже очень и очень сложно; проблема трех тел решается только приближенно.

А если частиц миллионы миллиардов?

19. ПРОБЛЕМЫ МИКРОДЕМОКРАТИИ

Кол в заборе: Тихо, Жерди! Забор — это я.

К. Чапек

Конечно, ситуация безнадежно трудная. Во-первых, неоткуда нам взять данные о начальных условиях всех частиц. А если бы нам их даже кто-нибудь сообщил, то все равно на решение уравнений, описывающих их будущее, нам не хватило бы человеческой жизни. Однако наука все же справляется как-то с описанием газов, жидкостей и других объектов, в которых содержатся легионы частиц.

Выручает *статистический подход*. Мы не занимаемся историей каждой частицы в отдельности, этого мы не можем себе позволить. Нас интересует, куда будет направлено преимущественно движение, какая доля частиц будет вести себя одним образом, а какая — другим.

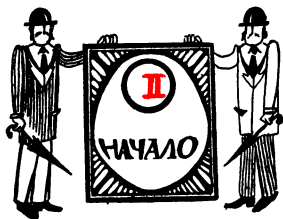
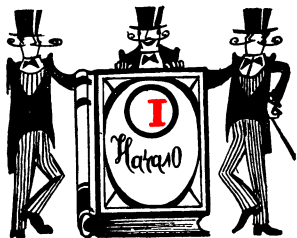
Наполеона не волновал вопрос о том, будет ли солдат Дюбуа штурмовать первый редут, а солдат Дюшан — второй. Он вообще мог не знать о существовании обоих этих солдат, если, впрочем, они не

относились к числу старых гвардейцев. А знать, *сколько* солдат пойдет на штурм первого редута, Наполеону надо было. Как известно из истории, такой подход себя оправдал, во всяком случае в полководческом искусстве.

Оправдывает себя статистический подход и в физике. Наблюдения за поведением целых ансамблей частиц привели к построению науки о многочастичных объектах. И наука эта была оформлена еще задолго до установления самого атомистического подхода. Мы говорим о термодинамике — науке со своими строгими и изящными законами (началами термодинамики), с мощным математическим аппаратом и огромным числом точных и практически важных предсказаний. Мы не можем, конечно, излагать здесь даже самые важные положения термодинамики или статистической физики (лежащей в ее основе, как стало ясно позже). Это можно сделать в толстой книге (и даже, наверное, не одной!), а не в микрокнижечке, подобной нашей, где и так надо следить за тем, чтобы не делать попыток «объять необъятное». Лучше вместо этого я расскажу эпизод из истории термодинамики.

У первого начала термодинамики (он же закон сохранения энергии) было три автора: Майер, Джоуль и Гельмгольц. Второе начало (закон возрастания энтропии) имеет двух авторов — Карно и Клаузиуса. Когда же была сформулирована очень общая теорема о недостижимости абсолютного нуля температуры (третье начало термодинамики), то ее единственный автор, Нернст заметил, что соавторов





у него и не могло быть: ведь закономерность ясна — число авторов уменьшается от закона к закону на единицу.

Теперь возникает вопрос: а сколько авторов должно быть у четвертого начала термодинамики? По замеченной закономерности — на одного автора меньше, чем у третьего закона, то есть ни одного. А так как законы природы не снисходят к нам от духа святого и авторы у них все же должны быть, то приходится полагать, что четвертого начала термодинамики не существует вообще.

Это, конечно, шуточное рассуждение. А как обстоит дело в действительности с четвертым началом термодинамики (и о чем оно трактует вообще), мы узнаем позже...

А сейчас вернемся к нашим элементарным частицам. Не правда ли, кажется заманчивым воспользоваться успехом статистического подхода в молекулярной физике и применить этот же подход к элементарным частицам? Или, постойте, к кваркам. Нет, наверное, к преонам... Что-то сбились мы...

В молекулярной физике было ясно, какие частицы приняты за основу: атомы. Все они были равноправны, и заниматься надо было именно их статистикой.

А как быть в мире фундаментальных частиц? Какие из частиц считать основными, какие состоящими из них? Если нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино, то надо ли его считать не таким простым, как эти продукты его распада? Если при столкновении двух точечных, бесструктурных частиц — электрона и позитрона — рождаются адроны, которые, в свою очередь, состоят из кварков, а те, возможно, из преонов, то что надо считать самым простым: электроны, адроны, кварки или гипотетические преоны?



В древности полагали, что главное — это предусмотреть неизменность элементов:

«Если бы гибли они беспрерывно, их ныне не стало,

Что и откуда тогда бы Вселенную снова воздвигло? Где ж и погибнуть бы им, если места от них нет пустого.

Так, все те же они; проникая, однако, друг друга, В образах разных являются, теми же оставаясь», Это Эмпедокл так думал, а Ньютон сказал:

«Оставаясь неделимыми, частицы могут составлять Тела, во все Времена имеющие одну и ту же Природу и Структуру; если бы они разрушались или распадались на части, Природа Вещей, зависящая от них, изменилась бы. Вода и Земля, составленные из старых, изношенных частиц и их осколков, не имели бы той же Природы и Структуры, что Вода и Земля, составленные, как это было вначале, из целых частиц».

Но природа оказалась сложнее: элементарность постепенно стала сама по себе сложным понятием, и включает она теперь, по меньшей мере, аспекты исходности, существенности, неделимости и фундаментальности.

Надо, следовательно, прежде всего понять, кто в мире микрочастиц равноправен, а кто лишен прав основных, фундаментальных, частиц. Это — очень непростая задача, и решение ее будет неожиданным.

Н. М. Языков писал 150 лет назад:

«Ночного неба президент,
Луна сияет золотая».

Луна явно выделялась среди звезд, и иерархия была очевидной.

А есть ли такой же президент в мире микрочастиц? Или хотя бы кабинет министров?..

20. ГНОСТИЧЕСКАЯ ЗМЕЯ

Год за годом все то же:
Обезьяна толпу потешает
В маске обезьяны.

Маццо Басё, XVII век

Отвлечемся на мгновение от специфических проблем физики элементарных частиц и попробуем ответить на более отвлеченный вопрос: каковы вообще возможные типы структуры материальных объектов?

Первый, простейший, тип основан на предположении о бесконечной делимости материи. Назовем его принципом матрешек. Очевидно, что матрешки, заключенные одна в другую, могут быть разного цвета и даже сделаны из различного материала, символизируя тем самым неисчерпаемость свойств мате-

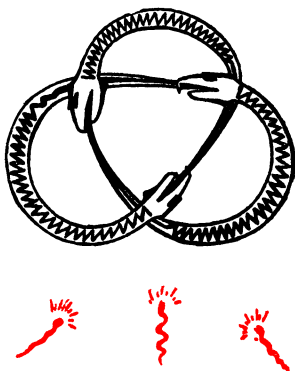
рии. И все-таки эта картина ярких цветных и разнообразных матрешек имеет неприятный оттенок «дурной бесконечности». Мир, построенный по такой схеме, был бы скучен: неужели у природы так мало фантазии? «Спасаться посредством делимости до бесконечности значит уподобиться человеку, который, чтобы избежать удара шпаги, бросается очертя голову в бездонную пропасть» (П. Бейль).



Представим себе поэтому другую возможную картину. На каком-то этапе последовательность структурных элементов обрывается и мы достигаем таких объектов, элементарнее которых в некотором смысле уже ничего нет. Это, однако, не означает, что такие фундаментальные объекты неизменяемы, абсолютно неуничтожимы, бесструктурны и независимы от внешних связей.

Дело обстоит несколько иначе.

В качестве модели используем довольно неожиданный на первый взгляд объект — дождевого червя. Если мы разрежем его на две части, то каждая из частей вырастет через определенное время в целого червя. Представим себе это вырастание мгновенным и получим второй, альтернативный, принцип структуры материальных объектов, обрывающий бесконечную иерархию уровней динамически. Иными словами, при таком подходе исчезает понятие структурных



частей и весь мир микрочастиц оказывается замкнутым сам на себя. Существование одной частицы сразу требует существования всех остальных. Индивидуальность частиц почти полностью исчезает... При таком подходе подлинной элементарностью обладает лишь мир в целом.

... У древних мыслителей Александрии, стремившихся силой мысли постичь тайны мироздания, у гностиков, была интересная эмблема: змея, кусающая себя за хвост. По-видимому, это символизировало человека, возникшего из хаотической природы и начавшего познавать и эту природу, и самого себя... Эмблема эта очень уместна для описания и нынешнего положения вещей в физике элементарных частиц. Может быть, наш дождевой червяк, существо тривиальное, и окажется той самой грозной гностической змеей?

А если говорить без аллегорий, то вопрос состоит в том, на каком именно этапе происходит этот обрыв структурности, если он вообще имеет место.

В начале 60-х годов Джеффри Чу объявил для всеобщего сведения и обсуждения концепцию *ядерной демократии*. Все адроны по этой схеме считались абсолютно равноправными, ни один из них не мог считаться сложнее или, напротив, элементарнее других. Если все адроны в равной мере элементарны, то возникает вопрос, как они связаны между собой? Может быть, адроны теперь надлежит рассматривать как набор невзаимодействующих и независимых объектов? Тогда наша схема была бы не очень привлекательной.

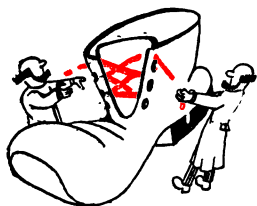
Нет, демократия, в том числе демократия ядерная, совсем не предполагает независимости и безразличия своих сочленов. Напротив, хорошая демократия именно и основана на непрерывном корректирующем взаимодействии граждан, на наличии

обратной связи и взаимного контроля. Тогда и расцветает свобода в обществе, столь отличная от дикарской свободы Робинзона Крузо.

Разумеется, и адроны в системе ядерной демократии должны активно взаимодействовать. Посмотрим, как это происходит, на примере уже известной нам модели Ферми — Янга. Напомним, что в этой модели пи-мезоны состоят из нуклона и антинуклона (с массами, гораздо большими, чем у самого пи-мезона, «съемаемыми» силами притяжения между этим нуклоном и антинуклоном). Казалось бы, нуклоны в такой картине более элементарны, чем мезоны. Спрашивается, однако: а за счет чего нуклоны притягиваются друг к другу, создавая тем самым пи-мезоны? Ответ на этот вопрос дает теория ядерных сил Юкавы: за счет того, что они обмениваются пи-мезоном. Что же получается? Мезон существует потому, что нуклон и антинуклон притягиваются друг к другу. А притягиваются они друг к другу потому, что существует... пи-мезон. И, стало быть, пи-мезон существует потому, что он существует. Частица сама себя «зашнуровывает»!

Мы изложили сейчас на этом примере основные черты так называемой бутстрап-схемы элементарных частиц. Английское слово *bootstrap* как раз и переводится как зашнуровка. В такой теории, как мы видим, нет частиц более или менее элементарных.

Привлекательная модель, конечно. Но мы-то уже знаем, что модель Ферми — Янга в общем неверна: адроны состоят по крайней мере из еще одного слоя более фундаментальных частичек. Значит, бутстрап-схема может иметь место с учетом нашего нового понимания структуры адронов... Надо каким-то образом включить в схему все обилие кваркового, партонного и тому подобного содержания адронов.



Тогда бутстрап-теория может возникнуть на более глубоком уровне.

Она и возродилась. Статистический подход к теории элементарных частиц позволил сформулировать самозашнуровывающуюся схему в новом виде.

Теперь, в теории статистического бутстрапа Хагедорна — Фраучи, для адрона имеется составная модель с некоторыми предположениями, однако, о свойствах частиц, из которых он строится. Считается, что каждая составляющая адрон частица является не элементарной, а опять-таки составной, причем устроена она точно так же, как и сам адрон, т. е. состоит из произвольного числа других составляющих с различными массами. Таким образом, мы считаем, что сам адрон и составляющие его частицы суть объекты одной и той же природы:

Адрон

состоит из неопределенного числа всех других адронов различных видов, каждый из которых, в свою очередь,

состоит из неопределенного числа всех других адронов различных видов, каждый из которых в свою очередь и т. д.

Вот это определение адрона, сформулированное и математически оформленное в теории статистического бутстрапа, и соответствует зловредной змее, что видно даже из замкнутой на себя формулировки.

Математический аппарат, построенный вокруг этой идеи, оказывается, однако, очень мощным. Правда, в исходной форме Хагедорна — Фраучи теория страдает излишним произволом и нуждается

в существенных поправках. А сделав эти поправки, мы, в частности, сталкиваемся с фундаментальным предсказанием существования предельной для всего мироздания абсолютной температуры. Это очень любопытное предсказание возникает из многих подходов, связанных со статистическим бутстрапом. Мы привыкли к тому, что существует нижний предел для температуры — абсолютный нуль, минус двести семьдесят три градуса по Цельсию. Понятно, чему должен соответствовать такой абсолютный нуль температуры — неподвижности частиц, составляющих вещество. Точнее, максимальной неподвижности, допускаемой законами квантовой теории. Но почему должна существовать верхняя граница? Казалось бы, нагревая, например, газ все больше и больше, мы заставим частицы газа двигаться все быстрее и быстрее. Теоретический предел здесь — скорость света, которой эти частицы достичь никогда не смогут, но могут сколь угодно близко приблизиться к ней. Этот теоретический предел скорости соответствует как раз бесконечно большой температуре (по формулам релятивистской термодинамики), и газ можно нагревать вроде бы до температур, сколь угодно близких к бесконечной.

Оказывается, однако, что дело обстоит не так просто, и теория статистического бутстрапа предсказывает для адронных систем некую критическую температуру, выше которой адронное вещество нагреть невозможно.

Такую ситуацию можно было бы сравнить, например, с кипением жидкости: мы не можем нагреть жидкость выше температуры кипения, так как подводимая энергия при температуре кипения идет не на увеличение скорости, т. е. кинетической энергии, молекул жидкости (температуры), а на ее кипение. Точно так же для адронов подводимая энергия ухо-

дила бы на рождение новых частиц, а не на увеличение температуры уже имеющихся.

Есть, однако, глубокое отличие между кипением жидкости и «кипением» адронного вещества. Обычная жидкость, если к ней продолжают подводить энергию, переходит в новую фазу — газ, а температуру газа затем можно и увеличивать. В физике адронов же «кипение» приводит к пополнению того же адронного вещества, а не к переходу в новую фазу...

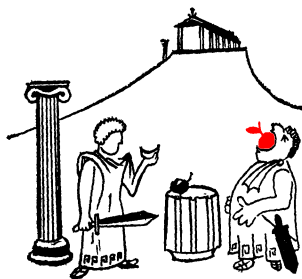
Закон этот, если бы он был надежно установлен, вполне заслуживал бы названия четвертого начала термодинамики. Принципиальная важность его не была бы подорвана даже тем фактом, что предсказанная теорией предельная температура адронов невообразимо велика — в миллиарды миллиардов раз выше температуры Солнца...

Однако эмпирический закон Нернста о числе авторов начал термодинамики, увы, работает. Более тщательное рассмотрение показало, что говорить об абсолютной предельной температуре в общем, строгом случае, нельзя. Можно представить себе такие ситуации, когда рост температуры адронов, по-видимому, неограничен.

Процесс «кипения» адронов, о котором мы только что рассказали, все же очень характерен для микро-

мира. Частица, получившая извне энергию, не просто ускоряется, а стремится сбросить излишек энергии в виде новорожденных частиц.

Мы довольно подробно остановились на истории с четвертым началом, чтобы показать, насколько всеобщие и глубокие вопросы возникают, когда мы используем самоза-



шнуровывающуюся теорию — гностическую змею...

А любопытно, догадывались ли древние о возможности того, чтобы малое состояло из большого, приходила ли им в голову эта основная идея бутстрапа? В индийском эпосе есть гимн о нитке жемчуга Индры, где в каждой жемчужине отражаются все остальные. Это красиво и поэтично, но, конечно, это не наука.

Грубоватый мудрец доперикловой эпохи Гесиод в своей основной книге «Труды и дни» обронил:

«Дурни не знают, что может быть больше, чем всё, половина...»

И это остроумное замечание, увы, к физике или даже вообще к естествознанию отнести не удастся. Это понятно, в частности, из комментария Платона к этому отрывку:

«Например, когда захватить целое опасно, а половины вполне достаточно, то... достаточное больше чрезмерного, так как оно лучше его...»

Будем принимать поэтому бутстрап за то, чем он является — за открытие нашего времени.

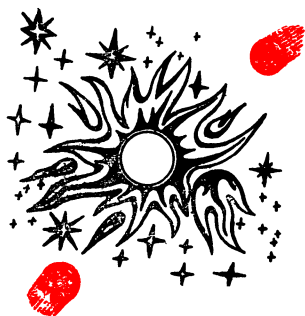
21. ОГНЕННЫЕ ШАРЫ

Ищи простоту и не верь ей.

А. Уайтхед

Но что же происходит на самом деле при очень высоких энергиях, когда сталкиваются адроны? И как именно можно применить к описанию таких процессов статистический подход, в могущество которого мы, пожалуй, уже готовы поверить?

Рассмотрим этот вопрос последовательно. Адрон в одном из современных левиафанов ускорительного искусства разгоняется до огромных скоростей и огромных энергий. В нем по мере совершения все



новых оборотов по кольцу накапливается вместе с этой энергией потенциальная возможность создать сильные потрясения в микромире.

Если такая (энергичная) частица будет лететь в вакууме, вокруг нее будет создаваться мощное облако виртуальных частиц, окружающее ее многослойными «шубами». А если этот мощный снаряд-частица ударит в другой адрон? Из обла-

ласти этого соударения возникает новый, непривычный в обычном мире объект: горячий, кипящий, выбрасывающий из себя каскады частиц *огненный шар*.

Именно такое название (огненный шар — fireball по-английски) давно используется для обозначения объектов, наблюдавшихся еще лет двадцать назад в космическом излучении.

Напомню, что из космоса к нам летят частицы с такой энергией, которая недостижима в современных ускорителях (и долго еще будет недостижима). Эти частицы космического излучения рождаются в далеких звездных, галактических и протозвездных системах, в процессах, непонятных нам сейчас. Космическое излучение равномерно пронизывает все пространство, окружающее нашу Землю, и во многих случаях приборы физиков регистрируют огненные шары. А в последние годы оказалось, что область, где возникновение фajerболов возможно, до-стигается уже и на ускорителях.

Как же ведет себя этот новый жилец микромира, появляющийся только в огне процессов высоких энергий?

Прежде всего, фэйрбол весьма неустойчив и неравновесен. Он несет на себе печать своего возникновения и хорошо помнит историю своего создания. Например, в момент столкновения имелось явно выделенное, преимущественное направление в картине нашего процесса. А именно то направление, вдоль которого летел первичный адрон до своего столкновения со вторым адроном и которое должно остаться особым направлением после образования фэйрбола при столкновении. Фэйрбол и движется в этом направлении. Но долго лететь так он не может: слишком рыхл и горяч. Двигаясь по все тому же направлению, заданному первичным полетом частицы, фэйрбол сбрасывает особо быстрые частицы со своей поверхности, «испаряется». И постепенно успокаивается, становится не таким бурлящим и замедляет свое движение...

И, наконец, в шаре, все еще огненном, наступает равновесие. Шар продолжает «гореть», но теперь ровным пламенем. Частицы, образующие его, энергичны, и фэйрбол, равномерно испуская их во все стороны, постепенно догорает до конца и распадается на адроны...

Какова же температура фэйрбола в этой последней, равновесной стадии его жизни, когда можно применять статистическую физику равновесных, установившихся процессов?

Вот здесь-то, оказывается, и возникает та самая предельная температура, которая была предсказана в теоретических рассуждениях статистического бутстрапного подхода. Предельная температура, таким образом, действительно существует в природе, но смысл ее далеко не настолько универсален, чтобы претендовать на статус закона природы — начала термодинамики.

Предельная температура означает всего-навсего



то, что не может быть равновесного огненного шара с температурой большей, чем эта. Но мы видим, что к этому равновесному состоянию путь идет от еще более горячего, сложного, неравновесного и неустойчивого объекта... Назовем его условно *сверхфайерболом*. И сбрасывать со счетов существование этой сверхгорячей и неустойчивой фазы процесса никак нельзя, иначе мы не сможем понять очень важных деталей и характеристик процесса множественного рождения. Да, мы рассматриваем сейчас не что иное, как процесс множественного рождения при высокоэнергетических столкновениях.

Вы видите, как непросто оказывается этот процесс. Не то, чтобы частица стукнулась о другую и выбросила веер новых частиц. Нет, оказывается, сначала родится чудовище — сверхфайербол, который, постепенно приручаясь, перейдет в обычный файербол, который уже почти по-домашнему, как мирная свечка, догорит до конца.

И только на стадии этого обычного файербола можно спокойно и эффективно применять статистический подход. Мы можем разобраться в общих чертах, что входит в состав файербола, и предсказать его дальнейшую судьбу...

В начале же процесса все очень и очень неустойчиво и неопределенно. Температура сверхфайербола, согласно современным теоретическим представлениям, может быть сколь угодно большой... Так что же, значит, мы все поняли и знаем единственную

столбовую дорогу, по которой идет процесс множественного рождения?

Если бы так. Еще очень многое остается зыбким и неопределенным. Во-первых, файерболов может рождаться несколько. А если они разлетаются при этом в разные стороны (так, собственно, и должно быть), то это приводит к новому явлению, недавно обнаруженному экспериментально. Речь идет о так называемых струях, выбрасываемых из зоны взаимодействия частиц при высоких энергиях...

Процессы, идущие в этом мире, очень богаты, сложны и, между прочим, неуловимо напоминают чем-то события, происходящие в космических масштабах... Те же рождения в катастрофах, горящие факелы, струи и разбрасываемые в разные стороны брызги и осколки таинственных процессов, идущих в сердце столкновения.

Природа едина и вечна. Это мы разбиваем наше знание на отдельные науки и «поверяем алгеброй гармонию». Мы достигли больших успехов на этом пути. И все же не будем забывать об окружающем нас бесконечно сложном мире. Замкнутая на себя вечность в пространстве и во времени поистине заслуживает того гимна, который посвятил ей Микеле Марулло в прекрасные времена Возрождения:

«...Мудрая, в царства свои ты старости путь
преграждаешь,
Бег прекращаешь веков, их связав адамантовой цепью,
Круговращенье времен и былое с грядущим совместно
Ты воедино собрав, в неизменном блюдеи настоящем,
Множество дней, как один, объемля взглядом единым.
Ты — и целое, ты же — и часть; без конца, без начала,
Вся ты — начало, и вся ты — конец; меж твоими частями
Нет различья: из них тебе соразмерна любая...»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ну, и пробил головой стену.
А что ты будешь делать в соседней
камере?

Ст. Ежи Лец

В этой очень небольшой книге мы старались придерживаться принципа натурального хозяйства: все, что можно было объяснить тут же, мы объясняли, не полагаясь на то, что читатель может знать об этом из других источников.

И, разумеется, все недостатки натурального хозяйства в нашей книге присутствуют: и дефицит многих важных вещей, и избыток других. Но, возможно, основные идеи о современном состоянии физики высоких энергий нам удалось донести до читателя.

Очень трудно физику, особенно физику-теоретика, обходиться без формул. Конечно, принцип отсутствия формул, проведенный нами весьма последовательно и с душевной болью, привел к тому, что слишком многие понятия и модели выглядят в нашем изложении весьма грубо и упрощенно.

Главное, что хотелось бы подчеркнуть в этих последних строках, — это стремительность и безостановочность движения науки. Ни в какой момент мы не сможем удовлетворенно подвести черту и откинуться в кресле, сказав: «эта теория полностью завершена и стала абсолютной истиной». И теория, и

экспериментальные знания в физике высоких энергий развиваются для этого слишком стремительно. Поэтому нужны постоянные ревизии того, что же нам известно и как следует понимать процессы в микромире сегодня.

Все-таки, пробивая одну стену за другой, мы движемся в сторону свободы: ибо большее знание и дает большую свободу.

В заключение приведу несколько цитат, так как, по словам Аркадия Бухова,

«человек, пытающийся что-либо доказать без цитаты, похож на ветряную мельницу без крыльев: кто ей поверит, что она размалывает муку, если ей нечем махать...»

Итак, вот что говорил о науке Лейбниц:

«*Quo magis speculativa, magis practica*» («Чем более созерцательна, тем более практична»).

И мы глубоко солидарны с ним. Истинное научное знание не только дает новые конкретные знания, но и позволяет освободиться от уз мифологии и религии. Как сказал в XII веке Газали:

«Мало существует людей, занимающихся математикой и не становящихся при этом вероотступниками и не складывающих с голов своих уз благочестия...»

Освобожденный же разум границ не признает и стремится к истине шаг за шагом неотвратно. Николай Кузанский — предтеча новой науки — писал в XV веке в трактате «Об ученом незнании»:

«Разум так же близок к истине,

Как многоугольник к кругу ...

... Итак, ясно одно, что все, что мы знаем об истине, — это то, что истину невозможно постигнуть таковой, какова она есть доподлинно... Сущность вещей, которая есть истина бытия, недостижима в своей

чистоте. Все философы искали эту истину, но никто ее не нашел, какой она есть, и, чем глубже будет наша ученость в этом незнании, тем ближе мы подойдем к самой истине...»

Этот путь бесконечен.

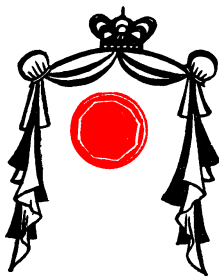
* * *

Многое осталось за чертой нашего рассказа.

Физика высоких энергий развивается в мощном и уверенном темпе и, вне всякого сомнения, вскоре мы снова станем свидетелями новых выдающихся открытий, заслуживающих подробного репортажа.

А ведь нам еще стоило бы поговорить о точных результатах квантовой теории поля и о детальных свойствах физического вакуума, о бесконечности актуальной и бесконечности потенциальной, о делимом пространстве — времени и об иерархии фундаментальных констат...

Может быть, через несколько лет мы продолжим беседу об этом?..



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВСТУПЛЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. СТАРЫЕ ЗЕМЛИ НАУКИ	5
1. «Бесстыдные утверждения Демокрита»	5
2. На подступах к тигровой пещере	9
3. Зоопарк 50-х годов	16
4. Слишком много!	25
ГЛАВА 2. КВАРКИ (НАУКА О ТОМ, ЧЕГО, ВОЗМОЖНО, НЕТ)	34
5. От Ферми к Джойсу	34
6. Сражения проиграны, кампания выигрывается	44
7. «Тюрьма» для кварков	53
ГЛАВА 3. ПАРТОНЫ (АДРОННЫЙ ИНЖИР)	60
8. Арсенал	60
9. Лепгонный скальпель	65
10. О домовых и драконах	71
11. Станфордские новости	76
12. Метаморфозы адронов	81
ГЛАВА 4. ЦВЕТ И ОЧАРОВАНИЕ («МАРТЫШКИ В ВОЗДУХЕ ЯВИЛИСЬ»)	90
13. Дефицит призраков	90
14. Невероятный год	95

15. «Весь мир стал полосатый шут»	102
16. Медведь на дереве	108
17. Каждый играет в свои кубики	114
ГЛАВА 5. СТАТИСТИКА (ИЕРАРХИЯ ИЛИ ДЕМОКРАТИЯ?)	120
18. Вакуумный океан	120
19. Проблемы микродемократии	124
20. Гностическая змея	128
21. Огненные шары	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140

ИБ № 488

Виталий Петрович Шелест

НОВЫЙ КРУГ

Редактор **А. И. Мельникова**
Художественный редактор **А. Т. Кирьянов**
Обложка художника **Е. И. Шворака**
Технические редакторы **И. Н. Подшебякин, Н. А. Власова**
Корректоры **Е. Б. Дубина, Н. М. Загудаева**

Сдано в набор 13.IV.1978 г. Подписано к печати 6.IX.1978 г. Т-15863.
Формат 70×100/32. Бумага тип. № 3. Усл. печ. л. 5,8. Уч.-изд. л. 5,92.
Тираж 50 000 экз. Зак. изд. 76123. Зак. тип. 310. Цена 20 коп.

Атомиздат, 103031, Москва, К-31, ул. Жданова, 5.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государствен-
ном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной
торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

20 коп.

АТОМИЗДАТ