

АНАТОЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ЛОГУНОВ — физик-теоретик, действительный член АН СССР. Родился в 1926 г., окончил Московский университет в 1951 г.

С 1963 по 1974 г. — директор института физики высоких энергий в Протвино, с 1974 г. — вице-президент АН СССР. В 1977 г. назначен ректором Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. А. А. Логунов сформулировал новый («инклюзивный») подход к теории процессов рождения частиц при высоких энергиях, теоретически предсказал ряд интересных закономерностей в этой области.

А. А. Логунов является лауреатом Ленинской и Государственных премий.

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ПЕТРОВ — физик-теоретик, доктор физико-математических наук. Родился в 1947 г., окончил Московский университет в 1971 г.

С 1986 г. — начальник лаборатории теории многочастичных процессов института физики высоких энергий в Протвино. Основные труды относятся к теории взаимодействия частиц при высоких энергиях.

Лауреат премии комсомола Подмосковья.

**А. А. Логунов
В. А. Петров**

Библиотечка
Детской
энциклопедии



Как устроен электрон?

Редакционная
коллегия:
И. В. Петрянов
(главный редактор)
И. Л. Кнунянц
А. Л. Нарочницкий



Москва
♦Педагогика♦, 1988

ББК 22.382
Л69

Р е ц е н з е н т

член-корреспондент АН СССР

С. С. Герштейн

Логунов А. А., Петров В. А.

Л69 Как устроен электрон? — М.: Педагогика, 1988. — с.: ил. — (Б-чка Детской энциклопедии «Ученые — школьнику»).
35 коп.

Книга известного советского ученого, академика АН СССР А. А. Логунова и доктора физико-математических наук В. А. Петрова посвящена одной из актуальных проблем современной физики — проникновению в тайны строения элементарных частиц, взаимодействия различных сил природы — гравитационных, электромагнитных. Содержание книги существенно расширит представления читателей о макро- и микромире.

Для старшеклассников.

Л 4306000000-013 92-88
005(01)-88

4802000000
ББК 22.382

© Издательство «Педагогика», 1988

Когда появились первые микроскопы, люди с удивлением обнаружили, что в обыкновенной капле воды существует целый мир, живущий своей, скрытой от человека, бурной жизнью. Масштабы этого «микромира» казались тогда поразительно малыми, какие-то ничтожные доли дюйма, но какая богатая, какая сложная структура!

Надо сказать, что уже в Древнем Египте, Древней Греции, на Древнем Востоке мысль о том, что за видимым многообразием окружающего мира скрывается некая единая основа, будоражила умы лучших ученых прошлого. Что будет, если взять острый нож и начать резать, скажем, яблоко на более мелкие части? Можно ли получить бесконечно малый кусочек яблока? Делимость вещества до бесконечности претила многим, кто размышлял над этим. В результате появилась идея «атома» («неделимый» в переводе с греческого) — наименьшей частицы вещества.

Эта идея, то затухая, то разгораясь, принимая разные обличья и оттенки, вот уже в течение 2500 лет освещает трудный путь в познании устройства природы.

К началу XVII в. чисто умозрительные, хотя порой и очень прозорливые, заключения стали считаться недостаточными для истинных, достоверных суждений о явлениях. Его величество Опыт занял наконец в натуральной философии (так называли тогда естествознание) подобающее ему место и стал главным оружием в битве за знания. Ученые, затаив дыхание пристально всматривались через окуляр микроскопа в разворачивающиеся перед ними туманные дали микромира, не менее интересного, чем горизон-

ты звездного неба, и, кажется, столь же безграничного. Но как раздвинуть горизонты микромира? Выход один: увеличить разрешающую силу линз, изменить конструкцию трубки, усилить освещение!

Труды не пропали даром — за 300 лет, прошедшие с тех пор, доступные исследованию величины расстояния удалось уменьшить от десятой доли сантиметра до... Представьте себе, как мысленно вы разделяете сантиметр сначала на тысячу частей, потом каждую получившуюся часть еще на тысячу, потом... нет, это слишком медленно, делить снова на тысячу,

теперь лучше уж сразу на миллиард частей! Это, пожалуй, даст вам некоторое представление о том, до каких глубин микромира добралась современная физика!

— Да что же там может быть на таких чудовищно ничтожных «отрезках»? Наверное, ничего, пустота?

И правда, что может быть меньше, чем любой атом любого вещества? И что же это за микроскоп, с помощью которого можно разглядеть столь фантастически малые участки... даже трудно сказать — чего?

— Да, микроскопы для этих целей действительно выглядят как-то необычно, во всем мире их считанные единицы. Если микроскоп XVII в. занимал не очень много места на обыкновенном деревянном столе, то современный «супермикроскоп», позволивший заглянуть внутрь атомного ядра, занимает площадь в десятки квадратных километров. Странно, правда? Чем меньших размеров рассматриваемый объект, тем больших размеров нужен прибор. И вот что интересно: для разглядывания все больших расстояний обратного явления не происходит — телескопы не делают меньших размеров, когда хотят расширить границы видимой Вселенной. Совсем наоборот. Впрочем, свойства Вселенной «в большом», оказывается, очень зависят от того, что некогда было в очень «малом».

Если 200—300 лет назад все энергозатраты при работе с микроскопом сводились к нескольким свечкам, которыми снабжались нехитрые оптические устройства, то нынешний «супермикроскоп» требует энергии, которую вырабатывает целая электростанция, да еще сложнейшего электронного оборудования.

Если раньше ученый, поглядывая в окуляр, сам перерисовывал свои наблюдения на бумагу, то те-

перь для обработки наблюдений, произведенных с помощью «супермикроскопа», не обойтись без мощного вычислительного центра, оснащенного ЭВМ последних моделей.

Если во времена Левенгука для исследований в области микромира хватало денежных средств и экспериментального мастерства самого исследователя, то теперь счет идет на сотни миллионов рублей, долларов, франков, а в самих исследованиях заняты тысячи специалистов высокой квалификации. Да и «микроскопы» эти теперь называют совсем по-другому.

му — ускорители, тэватроны, коллайдеры... И при всех этих разительных переменах сам принцип изучения свойств малых объектов совершенно не изменился.

— Как же так? Ведь, работая с микроскопом, люди просто рассматривают, скажем, каплю воды, ничего с ней не делая. А в ускорителях разгоняют в электрическом поле заряженные частицы до огромных энергий, потом направляют их на исследуемый объект — «мишень», «бьют» пучком частиц по мишени и смотрят, что из этого выйдет.

— Правильно. Но что значит «просто посмотреть»? В темноте, например, ничего не увидишь, сколько ни смотри. Чтобы увидеть, нужно осветить. А что значит «осветить»? Это значит направить пучок света на предмет. Свет же, как известно, представляет собой множество особых, не имеющих массы частиц — фотонов. Фотоны ударяются об интересующий нас предмет (например, каплю воды), о те части, из которых он состоит, и отскакивают, как мячи, в разные стороны. Часть отскочивших фотонов попадает через микроскоп на сетчатку глаза и вызывает в мозгу наблюдателя процесс, формирующий зрительный образ. Наблюдатель видит.

То же самое (если не отвлекаться на детали) происходит в ускорителе. Только там глаз человека заменен детектором, регистрирующим отскочившие от мишени частицы, а в качестве «света» в большинстве случаев удобнее использовать электроны или протоны — ядра атомов водорода. Так что микроскоп, по своей сути, остался микроскопом, хотя и называется теперь иначе.

— Что же есть на тех сверхмалых расстояниях, до которых добралась физика сегодня, уж не пустота ли?

— Совершенно верно, пожалуй, самый главный объект, видимый под «супермикроскопом», — это действительно пустота.

— Тогда зачем же это все? Не уподобились ли нынешние физики ученым с летающего острова Лапуты, высмеянным еще Джонатаном Свифтом?

— Конечно нет! Надо иметь в виду одно обстоятельство: пустота... отнюдь не пуста! В ней скрыта основа всего, что нас окружает. Но «пустота не пуста» — звучит не очень-то понятно. В науке же парадоксы — от неправильного понимания. Поэтому будем говорить так: «Вакуум. Вакуум не пуст». Это

уже звучит лучше. Но, увы, вакуум — это всего лишь перевод слова «пустота» на латинский язык. Фактически, конечно, дело не в терминологии. Просто оказалось, что пустоты как таковой в природе не существует в полном согласии со старинным правилом: «Природа не терпит пустоты» (хотя уже и в совершенно новом понимании). Поэтому мы будем пользоваться термином «вакуум», исторически укоренившимся в современной физике для обозначения «непустой пустоты», в которой ученые увидели ключ к пониманию Природы.

Вы, наверное, уже почувствовали по этим парадоксальным названиям, что физика микромира полна необычных, с точки зрения повседневного житейского опыта, явлений и понятий.

Бесконечный процесс познания, все более приближающий нас к абсолютной истине, — одна из характерных особенностей исторического развития человеческого общества, его неотъемлемое свойство, необходимое условие самого его существования. Стремление ко все более полному познанию природы выросло, как известно, из нужд повседневной практики. По мере развития общества углублялась специализация во всех областях целенаправленной деятельности. В науке это, в частности, выразилось в органической связи фундаментальных и прикладных исследований. Граница между этими двумя видами научного творчества весьма условна, они не могут существовать друг без друга, являясь как бы двумя сторонами одной медали. Задачи, которые ставит и решает фундаментальная наука, возникают на пути познания природы, а также определяются потребностями народного хозяйства. Именно фундаментальные исследования создают тот идейный простор и запас, без которых немыслим никакой научно-технический прогресс.

Физика микромира, или, что то же самое, физика высоких энергий, — это одно из главных направлений в фундаментальных исследованиях природы. Конечный продукт фундаментальной науки — новые знания о мире, в котором мы живем. Но не только это. Как волны от быстро идущего флагманского корабля, расходятся от физики микромира по всем направлениям мощные импульсы новых идей и методов в вычислительной математике, электронике, материаловедении, химии, медицине, биологии... «Отражаясь», многие из этих импульсов возвращаются к «кораб-

лю» в виде новых приборов, новых, более мощных вычислительных машин, заставляя его двигаться еще дальше, еще быстрее! Как добываются эти знания, мы увидим дальше, проследив за судьбой электрона.

С электроном тесно связана история величайших достижений физики — теории относительности и квантовой механики. Электрон — символ эпохи ЭВМ. Но вот уже 90 лет прошло с момента его открытия, за это время стало известно строение молекул и атомов, атомных ядер и нуклонов... а электрон?

Его строение все еще остается загадкой. Сквозь самые мощные «микроскопы» — ускорители — ученые «видят» электрон, грубо говоря, как материальную точку — без размеров, без каких-либо признаков внутренней структуры. Удастся ли увидеть внутренний мир электрона, когда исследователи получат на вооружение еще более мощные ускорители, остается только гадать. Но некоторые физики-теоретики уже сейчас, не дожидаясь опыта, развивают теории, в которых электрон — такая же составная, сложная система, как, например, атом. Только состоит он из новых субмикроскопических частиц — преонов. Из них же должны состоять и все остальные частицы, с которыми имеют дело физики. Допустим, что это действительно так. Но тогда сразу же возникает вопрос: а из чего состоят сами преоны?

Вопросам нет конца. Но в процессе ответов на них зачастую мы наталкиваемся на такие открытия, о которых и помыслить не могли ранее. И в истории с электроном это случалось не раз.

XVIII век... Человечество (на самом деле лишь та его часть, которую называют передовыми людьми), словно очнувшись окончательно от средневекового

оцепенения, начало с любопытством озирать свои владения. Свои потому, что вера тех самых передовых людей в могущество Разума была исключительно глубокой.

Величественное в своей простоте и всеобщности здание механики, завершённое трудами И. Ньютона, казалось, оканчивало все споры об устройстве природы. Всё можно рассчитать, и то, как фантастически далекие светила послушно следовали закону всемирного тяготения, убеждало даже скептиков.

Авторитет закона всемирного тяготения, согласно которому любые два тела притягиваются с силой, обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, был настолько велик, что и электрическое взаимодействие заряженных тел стали считать столь же всеобщим, как и тяготение.

Вот что французский физик Шарль Франсуа Дюфе писал в 1737 г.: «Электричество оказывается универсальным свойством, распространённым по всей известной нам материи, и оно, вероятно, играет значительно большую роль в мировом механизме, чем мы предполагаем».

Такие мысли, естественно, не могли не привести к предположению об универсальности и «закона обратных квадратов». Опыты с заряженными телами подтвердили эту точку зрения, увенчавшись знаменитым законом Кулона. Конечно, полной аналогии между электричеством и тяготением не было: электрические заряды не только притягивались, но и могли отталкиваться, однако важно то, что в XVIII в. было положено начало поискам универсальности, единства сил природы. Через 100 лет после работ Шарля Кулона и его современников Майкл Фарадей и Джеймс Клерк Максвелл сделали важный шаг вперед в этом направлении: из их опытов и теоретических рассуждений следовало, что считавшиеся ра-

нее разнородными свет, электричество и магнетизм — это лишь разные проявления одного и того же электромагнитного поля. При небольшом размышлении этот факт (тождественность света и электромагнитного поля) приводит нас к выводу, что всё вокруг имеет электромагнитную природу, ибо мы видим это «всё» посредством света.

М. Фарадей, пропуская ток через электролиты и измеряя количество выделяющихся на электродах веществ, вплотную подошел к мысли об атомарной природе электричества, а именно: в природе существует наименьший электрический заряд, равный заряду иона водорода. Любой заряд всегда выражается целым числом этих элементарных зарядов, «атомов электричества».

Английский физик Дж. Дж. Стони, много сделавший для разработки этой гипотезы, придумал специальное название для «атома электричества» — «электрон».

Примерно с середины XIX в. многие физики в разных странах экспериментировали с электрическими разрядами в особых стеклянных трубках с впаянными в стенки электродами (они изобретены У. Круксом), которые были составной частью замкнутой электрической цепи.

Интересно, что, даже после того как газ откачивался, ток в цепи не прекращался, если отрицательный электрод (катод) нагревали. Этот ток сопровождался характерным свечением, красивым и загадочным. Ясно было, что ток не может идти через пустоту. Таинственная субстанция, осуществлявшая передачу электричества от катода к аноду, была названа катодными лучами. Один из наиболее неутомимых исследователей катодных лучей — англичанин Дж. Дж. Томсон окончательно установил их природу.

Уже до того многие считали, что катодные лучи —

это поток мельчайших отрицательно заряженных частиц, но прямого экспериментального доказательства не было. Помещая трубку Крукса в магнитное поле, Дж. Дж. Томсон исследовал отклонение катодных лучей от прямой линии и обнаружил, что отношение заряда к массе у электронов (из которых и состояли катодные лучи) в тысячу раз больше, чем у этого же отношения для ионов водорода, изученных ранее в опытах по электролизу. Смело приняв гипотезу о том, что электроны и ионы водорода несут одинаковый по величине элементарный заряд, Дж. Дж. Томсон пришел к выводу, что электроны обладают ничтожно малой массой по сравнению с атомами и молекулами.

В конце XIX в. уже у многих сложилось твердое убеждение в том, что электроны входят в состав атомов. Тем самым признавалось, что атом неделим лишь в химических процессах. Особенно же веру в неделимость атома поколебало открытие Анри Беккерелем радиоактивности в 1896 г. Принципы классической физики: закон сохранения энергии, равенство действия противодействию и другие, казалось, вот-вот рухнут. Радиоактивное излучение не убывало со временем, словно создаваясь из ничего.

Наш герой — электрон и здесь оказался в центре событий. Э. Резерфорд в самом начале XX в. доказал, что из трех видов лучей — α , β и γ , испускаемых радием, β -лучи не что иное, как те же самые электроны, которые увидел Дж. Дж. Томсон, только движущиеся с громадными скоростями, близкими к скорости света. Вот эта-то близость к скорости света и позволила в конце концов ответить на вопрос: как устроены пространство и время?

— При чем тут пространство и время?

— Действительно, мы вроде бы путешествуем в глубь микромира. Вот электрон — как он устроен? Именно этот вопрос и задавали себе физики, а ответ получили совсем на другой вопрос.

Дело началось с экспериментов по изучению свойств электрона — только что открытой первой элементарной частицы в истории физики. Выяснилось, что когда электроны помещались в электрические и магнитные поля, то отношение отклоняющей силы к ускорению получалось разным, в зависимости от скорости электрона. Это означало очень странную вещь — масса электрона зависит от его скорости. Стало быть, если измерения правильны, то либо законы Ньютона неверны, либо электрон нельзя рассматривать как просто заряженную материальную точку.

Второй путь привел к первой теории электрона. Сначала идея казалась привлекательной. Дело в том, что раз электрон заряжен, то вокруг него есть его собственное поле. Из теории следовало, что поле имеет импульс, равный скорости электрона, умноженной на коэффициент с размерностью массы. Значит, поле электрона дает вклад в его инерцию, в массу. А что если вообще вся масса электрона имеет полевую природу? Тут уже вырисовывались величественные контуры «электромагнитной картины мира» — все из поля! Активными сторонниками такого рода теории электрона были М. Абрахам — первый, кто поставил вопрос о строении электрона, и Г. А. Лоренц, который к тому времени сильно продвинулся на пути к созданию общей теории вещества и поля — «электронной теории». Эта теория успешно описы-

вала и объясняла с единой позиции огромное количество явлений. Казалось, еще несколько усилий, и теория электрона завершит гигантскую многовековую работу мысли...

Вскоре, однако, обнаружился изъян: теоретики определили массу электрона другим способом, исходя не из импульса, а из энергии поля, и получили другое значение!

После некоторого замешательства великий французский физик и математик Анри Пуанкаре заметил, что чисто электромагнитная картина мира порочна в своей основе: электрон, состоящий из одинаково заряженных и, значит, отталкивающихся частиц, немедленно взорвался бы!

Стало быть, существуют иные, неэлектромагнитные силы, удерживающие электрон в виде компактного образования. «Они, — писал А. Пуанкаре, — очевидно, могут быть уподоблены давлению, господствующему внутри электрона; всё происходит так, как если бы каждый электрон был полым пространством, находящимся под постоянным внутренним давлением (независимо от объема), работа такого давления была бы, очевидно, пропорциональна изменению объема... однако... это давление отрицательно».

Таким образом, для спасения полевой модели электрона пришлось вводить неизвестные силы, природа которых оставалась невыясненной. Поэтому постепенно эта первая теория электрона отошла в тень, тем более что она никак не учитывала квантовых характеристик излучения света, открытых Максом Планком примерно в то же время. (На новой, квантовой, основе возрождение идеи А. Пуанкаре происходит в наши дни.) Осталась зависимость массы от скорости, т. е. вывод о том, что уравнения Ньютона несправедливы, что особенно заметно при скоростях движения, сравнимых со скоростью света.

— При чем тут свет? Мы же говорим об электронах!

— Оказывается, скорость света — выделенная скорость, это скорость распространения взаимодействия. Поэтому если электроны могли бы двигаться быстрее света, то мы вынуждены были бы отказаться от таких истин, как «причина предшествует следствию».

Сама же по себе скорость света издавна была объектом пристального внимания. Именно изучая скорость света, физики пытались определить скорость движения Земли относительно «мирового эфира», колебаниями которого и является свет, как тогда думали.

Все попытки кончились крахом. Уравнения электромагнитного поля, сформулированные Максвеллом, соответствовали этой обнаруживаемости равномерного движения. Это, однако, противоречило уравнениям Ньютона, с помощью которых описывали движение частиц вещества. В реальной, обычной жизни тем не менее не было ни одного явления, которое нельзя было бы описать уравнениями Ньютона. Паровозы и воздушные шары, звезды и брызги воды — всё двигалось по законам классической механики, отказываться от которых только из-за нескольких опытов было неразумно.

Вот тут-то и сыграл свою роль электрон.

В опытах, специально поставленных немецким физиком-экспериментатором В. Кауфманом, было подтверждено, что электрон не подчиняется уравнению Ньютона. Г. А. Лоренц, П. Ланжевэн и М. Абрахам придумали, каждый свою, теорию движения электрона, и все они оказались неверными.

Новые уравнения, заложившие основы новой, релятивистской, механики, были сформулированы А. Пуанкаре в 1905 г. на основе выдвинутого им

принципа относительности, «согласно которому законы физических явлений должны быть одинаковыми для неподвижного наблюдателя и для наблюдателя, совершающего равномерное поступательное движение, так что мы не имеем и не можем иметь никакого способа определять, находимся ли мы в подобном движении или нет».

Стало ясно, почему в обычной жизни достаточно пользоваться механикой Ньютона: массы обычных тел настолько велики, что при всех мыслимых энергиях разогнать их до скоростей, когда заметны отклонения от механики Ньютона, просто невозможно. Другое дело электрон — легкий, подвижный, он, едва родившись на свет, сразу же указал на принципиальную непригодность старой, классической, механики для объяснения явлений, связанных с большими скоростями. (Как исторический курьез можно рассматривать тот факт, что В. Кауфман подытожил свои эксперименты по изучению поведения электронов в электромагнитном поле как свидетельство в пользу теории Абрахама, в которой электрон считался абсолютно твердым шариком с равномерно распределенным по всему объему зарядом. Последующие, более точные эксперименты показали, что В. Кауфман ошибся — электроны двигались именно так, как это предписывалось законами теории относительности.)

Вообще, надо сказать, что, пожалуй, ни одна физическая теория не привлекала столь пристального внимания самых широких масс любознательной публики. В тяжелые годы первой мировой войны и первые послевоенные годы сама обстановка и неизбежные материальные лишения, казалось бы, должны были отбить всякий интерес к новейшим достижениям физики, который и в мирное время был весьма умеренным.

Нет, публика стремилась на лекции и диспуты о четвертом измерении и о новой теории со странным названием — «теория относительности». Почему?

Наверное, потому, что сама мысль о том, что время, это неумолимо текущее время, понятие, так хорошо знакомое каждому, стало вдруг объектом научного исследования и оказалось, что с ним можно что-то делать; сама эта мысль будоражила умы, волновала чувства.

Согласно новой теории движения — теории относительности, время и пространство теряли абсолютный смысл. Без тел не могло быть пространства, без движения — времени. Конкретно это выражалось, например, в том, что, измерь вы длину быстро пролетающего мимо вас стержня, получившаяся длина была бы меньше длины точно такого же стержня, который лежит у ваших ног.

Гипотеза об изменении длин вдоль направления движения была выдвинута Джорджем Фрэнсисом Фицджеральдом и независимо Г. А. Лоренцем еще в 90-х гг. XIX в. Частица — одна из тех, которые сотнями были открыты за последние 30 лет, — распадающаяся у вас в лаборатории за ничтожно малое время 10^{-8} с, в окне движущейся мимо вас лаборатории покажется вам вечно живущей (в крайнем случае живущей дольше вас) при условии достаточно больших скоростей. Эта относительность времени была впервые с особой силой подчеркнута А. Эйнштейном.

Новая теория движения представляется порой очень таинственной наукой. В работе А. Пуанкаре содержалось крайне важное утверждение о том, что переход от движения с одной скоростью к движению с другой совершенно аналогичен математически некоторому повороту в четырехмерном пространстве, причем роль дополнительного — четвертого — измере-

ния играло время. Эта мысль была в дальнейшем подробно развита Г. Минковским.

В одном из выступлений в 1908 г. он выразил эту идею так:

«Милостивые государи! Воззрения на пространство и время, которые я намерен перед вами развить, возникли на экспериментально-теоретической основе. В этом их сила. Их тенденция радикальна: отныне пространство само по себе и время само по себе должны обратиться в фикции; лишь некоторый вид соединения обоих должен сохранить самостоятельность».

С точки зрения четырехмерной пространственно-временной геометрии эффекты сокращения длин и замедления времени ничуть не более удивительны, чем видимое изменение размеров тел, рассматриваемых под разными углами.

Но что означают слова «четырёхмерная пространственно-временная геометрия»? В обыденном языке большинства людей геометрия — это один из предметов, который изучают в школе. Цель этого предмета — дать понятие о свойствах пространства. В математике изучаются самые разнообразные пространства, у каждого из которых — своя геометрия. В школе изучают в основном так называемую евклидову геометрию, характерным свойством которой является то, что квадрат расстояния r^2 между двумя точками пространства с координатами (x, y, z) и (x', y', z') выражается трехмерным обобщением теоремы Пифагора:

$$r^2 = (x^1 - x)^2 + (y^1 - y)^2 + (z^1 - z)^2 \quad (I)$$

Если мы добавляем еще одно — временное — измерение, то как выразить «расстояние» между точками (x, y, z, t) и (x', y', z', t') ? Может, надо попро-

сту добавить к r^2 величину $c^2 (t' - t)^2$ (c — скорость света, ct имеет размерность длины). Тогда мы имели бы для квадрата четырехмерного расстояния s^2 следующее выражение:

$$s^2 = r^2 + c^2 (t^1 - t)^2 \quad (\text{II})$$

Такой вид для расстояния между двумя точками соответствует тому, что мы просто перешли от трехмерного евклидова пространства к четырехмерному.

Однако, взглянув на формулу (II), мы видим, что пространственные и временные координаты по сути ничем не отличаются друг от друга. В то же время любой из нас прекрасно знает, что это не так. Заслужой А. Пуанкаре и было то, что он доказал: правильное «расстояние» между двумя точками (или, как еще принято говорить, «событиями») четырехмерного пространства-времени должно выражаться другой формулой:

$$s^2 = r^2 - c^2 (t^1 - t)^2 \quad (\text{III})$$

Это довольно странное «расстояние». Например, оно может быть равно нулю, даже если точки не совпадают. Но странным оно кажется только потому, что мы привыкли мыслить образами евклидовой геометрии. Геометрия же, соответствующая «расстоянию», выражаемому формулой (III), называется псевдоевклидовой. Расстояние (III) не изменяется, если его измерять в системах отсчета, равномерно и прямолинейно движущихся относительно друг друга. С этим тесно связана и неизменность (инвариантность) уравнений электромагнитного поля (уравнения Максвелла) относительно преобразований перехода между такими системами отсчета (преобразования Лоренца). Уравнения же механики Ньютона изменяются при преобразованиях Лоренца. Однако таких изменений на опыте нет, и это привело А. Пуанкаре

к формулировке новых уравнений движения материальных тел.

Уравнение Ньютона Уравнение Пуанкаре

$$m \frac{d\dot{v}}{dt} = \dot{F} \qquad \frac{d}{dt} \left(\frac{m\dot{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \dot{F}$$

m — масса тела, v — скорость тела, c — скорость света, F — сила.

Усилиями выдающихся ученых — Г. А. Лоренца, А. Пуанкаре, А. Эйнштейна и Г. Минковского — были созданы новые представления о пространстве и времени, ныне широкоизвестные под названием «специальная теория относительности».

Сущность же этой теории состоит в том, что трехмерное пространство и время образуют единое целое — четырехмерное пространство псевдоевклидовой геометрии.

Итак, многотрудные попытки создать непротиворечивую теорию электрона не принесли успеха, но открытая при этом новая теория пространства-времени превзошла все ожидания. Все парадоксы разрешались, таинственная субстанция — эфир за полной ненаблюдаемостью оказался не у дел, что и побудило А. Эйнштейна в самой первой своей работе по теории относительности вообще отказаться от этого понятия: «Введение «светоносного эфира» окажется при этом излишним, поскольку в предлагаемой теории не вводится «абсолютно покоящееся пространство», выделенное особыми свойствами, а также ни одной точке пустого пространства, в котором протекают электромагнитные процессы, не приписывается какой-либо вектор скорости».

А. Пуанкаре, однако, не был настроен так решительно. Несмотря на то что он уже давно пришел к мысли о ненаблюдаемости движения относительно

эфира, неоднократно высказывал сомнения в самом его существовании, тем не менее термин «эфир» не исчезал со страниц его статей. Почему? Может быть, сама идея пустого пространства претила ему? Да и А. Эйнштейн спустя некоторое время считал необходимым вернуться к эфиру, правда придавая этому понятию новый смысл физического, «живого» пространства-времени, активно участвующего в физических процессах, а не служащего лишь ареной для них. В 1920 г. он писал: «Специальная теория относительности запрещает считать эфир состоящим из частиц, поведение которых во времени можно наблюдать, но гипотеза о существовании эфира не противоречит специальной теории относительности... Отрицать эфир — это в конечном счете значит принимать, что пустое пространство не имеет никаких физических свойств. С таким воззрением не согласуются основные факты механики».

Несмотря на это мнение одного из создателей теории относительности, широко распространилось и на долгие годы глубоко укоренилось ошибочное, примитивное представление об эфире! Термин «эфир» был настолько скомпрометирован, что впоследствии, когда стало ясно, что пустого пространства не бывает, предпочли другой термин — «вакуум», по смыслу, может быть, менее удачный. Теория нового эфира, или вакуума, тогда, в начале XX в., не была еще в центре внимания. Время для этого еще не настало. Внимание ведущих физиков всего мира было приковано к таинственной структуре атома, и здесь электрон сыграл не последнюю роль.

Уже в XIX в. многие ученые понимали, что атом — это не атом в собственном смысле этого слова.

Представление об атоме как неделимой материальной точке, будучи вполне достаточным для объяснения многих закономерностей, наблюдающихся в поведении газов, и менее определенно, жидкостей и твердых тел, было бессильно перед такими явлениями как, например, катодные лучи при излучении нагретых тел. Так же трудно было понять природу периодичности элементов в таблице Менделеева.

Как только было выяснено, что электроны — составная часть атомов, то сразу же стала ясной и необходимость существования «положительных электронов». Ведь если бы их не было, то трудно было бы понять, почему вещества в целом не обладают электрическим зарядом. Но, как мы уже видели, масса электрона составляет ничтожно малую часть общей массы атома. Стало быть, положительные электроны должны быть тяжелыми? А может быть, все электроны — легкие, только в атоме их очень много?

Сейчас-то мы знаем, как обстоит дело в действительности, об этом написано даже в школьном учебнике физики. А тогда, в начале нашего века? Трудно поверить, но в то далекое время не все физики были убеждены в реальном существовании молекул. Атом был категорией более привычной для химиков, чем для физиков. Многим разговоры о структуре атома казались попросту никчемными, умозрительными спекуляциями. Теория электромагнитных полей Фарадея — Максвелла была новинкой, далеко не всем известной.

Все размышления об устройстве атомов действительно были бы праздным делом, если бы не потре-

сающие открытия Дж. Дж. Томсона, К. Рентгена, А. Беккереля.

Именно открытие электрона, рентгеновских лучей и радиоактивности убедительно продемонстрировало, что атом — сложное устройство. Сложное, но какое именно? Как его увидеть?

Одним из первых, кому пришла в голову простая, но исключительно плодотворная мысль использовать в качестве «света» электроны для того, чтобы узнать как устроен атом, был Ф. Ленард, профессор Кильского университета. С тех пор прошло более 80 лет, но пучки быстрых электронов все еще остаются одним из главных орудий исследований микромира. Узнать удалось много интересного.

Вернемся к опытам Ф. Ленарда. Он сделал простую вещь: направил пучок катодных лучей — электронов — на металлическую фольгу. Оказалось, что электроны почти не замечают этого препятствия. Отсюда Ленард пришел к совершенно правильному (как стало ясно потом) выводу о том, что атомы в основном пустые, а электроны занимают лишь ничтожно малую часть атома, размеры которого составляют несколько ангстрем, т. е. 0,00000001 см.

Все модели атома, существовавшие в то время, были чисто теоретическими, вплоть до решающих экспериментов в лабораториях Резерфорда в Англии, Франка и Герца — в Германии.

Эти модели делились на два типа.

В моделях первого типа положительный заряд был непрерывно распределен по всему объему атома, в котором «плавали» точечные электроны.

Апологетом этой модели, выдвинутой в 1902 г. лордом Кельвином, был открыватель электрона Дж. Дж. Томсон. Он математически доказал, что в таком атоме могут быть устойчивые конфигурации электро-

нов. Более того, из этой модели вытекали свойства периодичности химических элементов, очень похожие на те, которые тогда были известны, и это делало модель очень привлекательной.

Модели второго типа — «ядерный атом» — выдвигались в разное время разными авторами. Один из самых первых — японский физик Х. Нагаока представлял себе атом в виде тяжелого положительного заряда, окруженного электронами, расположенными на манер колец вокруг Сатурна. Хотя Х. Нагаока и смог объяснить ряд закономерностей в спектрах излучения, тем не менее, по законам электродинамики, его модель не могла быть устойчивой, электроны должны были притянуться к центральному заряду. Сомневаться же в электродинамике не было никаких оснований, поскольку она объясняла гораздо больше явлений, чем модель Х. Нагаока.

Все же решающее слово, как всегда, было за экспериментом. Резерфорд — новозеландец, покинувший родной зеленый остров, чтобы открыть Европе и всему миру тайну атома, к 1911 г. стал уже членом Королевского общества, лауреатом Нобелевской премии за исследование радиоактивности. Это не повлияло на его фантастическую работоспособность, атака на атом в знаменитой Манчестерской лаборатории началась. Впрочем, Резерфорд еще в 1906 г. заметил, что α -частицы (которые, как он открыл, являются атомами гелия, из которых удалены два электрона) испытывают заметное отклонение при прохождении через тонкие пленки различных веществ.

«Такой результат, — писал он, — ясно показывает, что атомы вещества должны быть теми областями, где действуют очень интенсивные электрические силы...»

И вот, после нескольких лет упорной работы

вместе со своими сотрудниками Гейгером и Марсденом, в 1911 г. Резерфорд написал блестящую работу под названием «Рассеяние α - и β -частиц веществом и строение атома». В ней он подытожил имевшийся к тому времени экспериментальный материал по бомбардировке атомов α -частицами и электронами и пришел, проведя необычно тщательные для экспериментатора теоретические расчеты, к выводу, что «при рассмотрении данных в целом, по-видимому, наиболее простым является предположение, что атом имеет центральный заряд, распределенный по очень малому объему».

Этот вывод свидетельствует в пользу теории атома, похожей на ту, которую выдвинул Х. Нагаока. Однако оставалось еще много неясного. Например, ничего нельзя было сказать о знаке центрального заряда, хотя многое свидетельствовало в пользу того, что он положителен.

Резерфорд же хотел прямого экспериментального подтверждения. При всех остающихся проблемах одно было совершенно ясно — томсоновская модель атома с размазанным по всему объему атома положительным зарядом противоречила опытам по рассеянию α -частиц. Почему? Потому, что для томсоновского распределения заряда в атоме число α -частиц, отклонившихся на большой угол (например, 90°) от первоначального направления движения из-за взаимодействия с полем, было бы во много раз меньше, чем то число, которое было зарегистрировано в опытах Резерфорда и его сотрудников. α -частицы отскакивали в сторону так, как это предсказывалось теорией взаимодействия двух точечных зарядов.

Даже после того как было установлено, что в центре атома сосредоточен именно положительный заряд, оставалось совершенно непонятным, как же располагаются в атоме электроны.

Кое-что, впрочем, уже было известно. Солнце или просто раскаленный металл излучают свет. Откуда он берется?

Всё состоит из атомов. В атоме движутся электроны.

Из теории Максвелла — Лоренца следует, что ускоренно движущийся заряд излучает. Движения, или, скорее, колебания электронов, происходят с разными частотами. Отсюда следует, что и излученный свет должен иметь самые разные частоты. Вроде бы неплохо. Какое-то время такого «механизма» излучения было вполне достаточно. Многие закономерности излучения, в том числе довольно тонкие, такие, как появление новых частот излучаемого света в магнитном поле (эффект Зеемана), нашли свое качественное и частично даже количественное объяснение.

Однако непонятного становилось все больше.

Почему частоты излучения и поглощения атомов не произвольны, а подчиняются какой-то магической закономерности, определяемой непонятным набором целых чисел? Из известных законов движения электронов ничего похожего не получалось.

Но самое-то главное: почему вообще атомы существуют в том виде, в каком их открыл Резерфорд? Электроны, как бы хитро они ни двигались, притянулись бы в конце концов к положительно заряженному ядру, «высветив» по пути всю свою энергию.

Известно, что раскаленный металл излучает свет разных частот, но в зависимости от температуры частоты, с которыми свет излучается больше всего, изменяются. Сначала вы видите кусок железа красного цвета — это малые частоты, а потом, при дальнейшем нагревании, начинается «белое каление» — это уже свет больших частот. Разумеется,

физики должны всё описывать количественно, поэтому уже со второй половины XIX в. стали появляться формулы, по которым можно было рассчитать, сколько света излучает тело на данной частоте при заданной температуре. Оказалось, что это дело не простое: если для каких-то частот теория совпадала с опытными данными, то для других — противоречила им.

Экспериментальные кривые, описывающие зависимость количества света от частоты света и температуры излучающего тела, были удивительно неподатливы. Тем не менее некоторым исследователям удалось, наконец, придумать формулы, неплохо описывающие эти упрямые кривые, хотя никакой вразумительной физической идеи за этими формулами не было.

Сейчас тоже так делают, и формулы, описывающие таким образом экспериментальные данные, называются подгонками, т. е. формулы специально подгоняют к экспериментальным данным, меняя параметры так, чтобы полученная кривая прошла как можно ближе к точкам, поставленным экспериментаторами.

Макс Планк, физик-теоретик из Берлина, в 1900 г. тоже предложил свою подгонку для спектра излучения (научное название закона распределения количества света по частотам) нагретых тел. Сначала она не казалась самой лучшей — были и такие формулы, которые, как считалось, гораздо точнее описывали имевшиеся опытные данные.

М. Планка, однако, волновал вопрос: как вывести свою формулу из «первых принципов» физики так, чтобы она перестала быть просто подгонкой? После упорных размышлений и неудачных попыток сформулировать строгий вывод, он решил временно отступить от правил и добавить к известным законам физики

рабочую гипотезу, заключающуюся в том, что атомы излучают свет данной частоты не непрерывно, а порциями (или квантами) со строго определенной энергией. Энергия, излученная на данной частоте, всегда состоит из целого числа квантов энергии. Эта гипотеза сразу же позволила М. Планку вывести свою формулу уже на физической основе. Теперь для М. Планка проблема была в другом: как избавиться от рабочей гипотезы и обойтись только известными законами?

Теория Планка сначала как-то не особенно взволновала научную общественность. Впервые всеобщее внимание к квантам было привлечено работами Альберта Эйнштейна (1905) и Иоганна Штарка (1909). Первый смог успешно объяснить фотоэффект, второй — рентгеновское излучение, придав квантовой гипотезе Планка по существу новый, более глубокий смысл.

М. Планк связывал дискретность энергии излучения только со свойствами излучателя — атома, молекулы. А. Эйнштейн же перенес дискретность энергии на само излучение и, применяя закон сохранения энергии, объяснил явление фотоэффекта. И. Штарк пошел дальше: он ввел представление о частице света, обладающей определенным импульсом $p = h\nu/c$, и, применяя закон сохранения импульса, объяснил явление рентгеновского излучения при торможении электронов. Так в физику вошло понятие частицы света, которую позднее назвали фотоном. Из релятивистского соотношения между массой m , энергией и импульсом частицы

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

следует, что это частицы с нулевой массой, всегда движущиеся с одинаковой скоростью c . М. Планк недоумевал, ведь это противоречило волновой природе света. «Учитывая полное подтверждение, — гово-

рил М. Планк в 1911 г. в Брюсселе на 1-м Сольвеевском конгрессе по физике, — которое максвелловская электродинамика получила именно для явлений в чистом вакууме при произвольно быстрых колебаниях тончайшими оптическими интерференционными измерениями, а также огромное упрощение теории электрических и магнитных явлений, которое было достигнуто благодаря ее введению, становится весьма сомнительным потрясение ее основ. Поэтому в дальнейшем изложении мы исключим гипотезу световых квантов, мы можем тем более это сделать, что до сих пор она не вышла из стадии примитивного развития».

Да, прямо как у Н. В. Гоголя: «Я тебя породил, я тебя и убью!» Но было поздно, квантовый джин вылетел из кувшина. Все больше некогда непонятных явлений получали естественное объяснение на основе световых квантов.

Последняя надежда М. Планка — вывести свой закон без введения дискретности — рухнула, когда А. Пуанкаре в том же 1911 году строго доказал, что сделать это невозможно.

Отметим, кстати, что мы здесь не очень отклоняемся от нашего лейтмотива: как устроен электрон?

И Эйнштейн, и Штарк имели дело с явлениями, в которых электроны принимали живейшее участие. Именно электроны, поглощая кванты света, образуют фототок, отвечающий фотоэффекту, и именно электроны, тормозясь, испускают кванты рентгеновского излучения. Но это все свободные электроны, а как же они все-таки ведут себя в атоме? С одной стороны, если, по Резерфорду, представлять их как систему зарядов, вращающихся вокруг ядра, то свет будет излучаться непрерывно, а не только на определенных частотах, как это следует из опыта. С другой стороны, если всерьез принимать гипотезу Планка, свет излучается только квантами.

Пуанкаре сумел очень прозорливо совместить эти две, казалось бы, несовместимые вещи, высказав в 1912 г. следующую идею: «Физическая система обладает конечным числом различных состояний; она перескакивает из одного состояния в другое, не проходя через непрерывный ряд промежуточных состояний».

Когда Пуанкаре писал это, он не знал о теории Резерфордовского атома. Но давайте откроем его научно-популярную статью, датированную 1908 г. (она появилась за три года до статьи Резерфорда). Вот что он писал об атоме: «Мы можем для примера представить себе нечто вроде солнечной системы, состоящей из большого положительного электрона, вокруг которого вращается множество маленьких планет — отрицательных электронов, притягиваемых противоположным электричеством, которым заряжен центральный электрон».

— Так, значит, первым-то был Пуанкаре? Так вот оно как было.

— Нет, нет, ни в коем случае! Резерфорд, и только он, должен считаться первооткрывателем строения атома: ведь это он высветил его α -лучами в глубинах микромира.

Мы же вспомнили здесь о Пуанкаре во многом для того, чтобы дать понять читателям, что гении и великие открытия — это не «лучи света в темном царстве». У всякого открытия, теории есть свои предшественники, есть свои «спутники», создающие тот идейно благоприятный климат, в котором распускается росток единственно правильного знания. Это в полной мере относится и к планетарной модели атома. Помимо уже упоминавшихся Э. Резерфорда, А. Пуанкаре, Х. Нагаоки надо отметить и Ж. Б. Перрена, которому мысль об этом пришла уже в 1901 г., и нашего великого соотечественника Петра Николаевича Лебедева

(открывателя давления света), который еще в конце XIX в. пришел к идее планетарного атома, но идея эта, увы, осталась лишь в виде дневниковой записи. Представлять себе историю физики как пустыню непонимания, среди которой изредка попадаются гигантские столпы мысли — гении, значило бы непростительно обеднять, искажать истинную картину событий. Если бы это было так, то мы никогда не узнали бы о великих ученых просто потому, что никто не понял бы, что же такое они сделали. И не было бы места тому, что Эйнштейн так удачно назвал «драмой идей».

На том же самом 1-м Сольвеевском конгрессе по физике, состоявшемся в Брюсселе в 1911 г., где Планк отстаивал незыблемость классической электродинамики, многие активные физики, такие, как, например, А. Э. Хааз, выступившие там с докладами, придерживались противоположного мнения. Вообще, чисто логически это было совершенно естественно: если электрон, двигаясь в атоме, не излучает так, как это предписывает ему классическая электродинамика, то, значит, последняя не верна в атомных масштабах.

С этой мысли и начал свою статью, датированную августом 1913 г., мало еще кому известный датский теоретик Н. Бор. Получалось так, что электрон двигался по устойчивым орбитам вокруг ядра без излучения, и в этом было главное противоречие с законами классической электродинамики, а излучение происходит при внешнем воздействии, в момент перескока электрона с одной орбиты на другую. Многие закономерности такого излучения уже были установлены ранее, например то, что частота излучения может быть всегда получена как разность некоторых частот, связанных известным образом с целыми числами. Бор решил, что все дело в том, что в игру надо ввести постоянную Планка h , связывающую энергию E и частоту

ту ν кванта по формуле $E=h\nu$, явно учтя тем самым квантовый характер излучения. Эта мысль была не нова. Еще раньше Бора Хааз пытался учесть квантовую гипотезу, принимая за основу томсоновскую модель атома. Ему удалось получить количественную связь размеров атома с постоянной Планка. К резерфордской модели квантовую гипотезу впервые попытался применить Дж. Никольсон, чтобы объяснить некоторые особенности излучения звезд. Но только Бору суждено было более других преуспеть в этом. Фактически он «просто» констатировал факт устойчивости электронных орбит, объявив его законом природы. Для этого, однако, нужна была солидная поддержка, например объяснение законов излучения. И Бор получил ее, разработав простые правила вычисления частот излучения.

Простыми они, правда, были только для самых простых случаев, например для атома водорода, в котором один-единственный электрон. Для атомов с большим числом электронов положение оставалось довольно запутанным.

Правилами Бора пользоваться могли очень немногие, и прежде всего он сам, потому что он лучше других знал, руководствуясь интуицией, какие классические законы можно применять в данном случае, а какие — нет. Новый подход к теории атома получил еще один аргумент в свою пользу, когда Дж. Франк и Г. Герц в 1914 г. измерили на опыте энергии устойчивых состояний электронов в атоме (они, правда, думали, что измеряют энергии, необходимые для ионизации атомов ртути).

Тут началась война, и теория атома слегка застопорила свое развитие, а после войны все больше и больше людей, интересующихся проблемой атома, стало понимать, что в квантовой теории что-то не так. Да и, собственно, тот набор рецептов для вычислений,

который тогда, в начале 20-х гг., был в распоряжении физиков, вряд ли с полным правом мог именоваться теорией.

Как это часто бывает, решение пришло в неожиданном виде. Сначала Луи де Бройль написал совершенно из ряда вон выходящую статью, в которой он утверждал, что электрон, да и вообще любое тело, может рассматриваться как... волна!

Сколько уж написано про этот самый «корпускулярно-волновой дуализм» — удивительное свойство природы, не пожелавшей втиснуть свои элементы в какое-то одно из понятий — частицу или волну!

— Почему удивительное?

— Песчинка — это частица, звук — волна, электрон — частица, свет... стоп! А Планк, а Эйнштейн, а Штарк?! Они-то всех нас привели к тому, что свет — это частицы, фотоны! Но ведь еще в начале века О. Ж. Френель убедительно опроверг доводы сторонников корпускулярной теории света, продемонстрировав явление дифракции, никоим образом не объяснимое, если считать, что свет — поток частиц. Понять это трудно. Легче для начала принять, что свет (или вообще электромагнитное излучение) — это ни волны, ни частицы, а нечто невыразимое в рамках понятий обыденной жизни, но иногда (и даже во множестве случаев) проявляющее себя так, как мы привыкли думать о волне, а иногда так, как мы привыкли думать о частицах.

Но если так, то идея Л. де Бройля может показаться просто необходимой. Если световая волна ведет себя порой как частица, то почему бы и электрону не вести себя порой как волна? И если А. Эйнштейн в 1905 г. ввел дискретность энергии излучения, а Штарк в 1909 г. представил излучение в виде частиц, обладающих импульсом, то Л. де Бройль, как бы идя в обратном направлении, снабдил вещество частотой

и волновым числом, считавшимися до 1923 г. атрибутами исключительно волновых процессов.

«Волны материи» — это звучало гораздо более экстравагантно, чем «частицы света»: последние как-никак уже обсуждались сотни лет назад.

Как всякой великой идее, идее «волн материи» не хватало решающего, триумфального эксперимента. Эксперимент был проделан, и весьма успешно: фотографии, полученные К. Дж. Дэвиссоном и Л. Х. Джермером, а также Дж. П. Томсоном (сыном первооткрывателя электрона), убедительно доказали, что электроны могут делать все, что требуется от добропорядочных волн: интерферировать и дифрагировать.

— Отчего же раньше никто и ни в одном эксперименте не заметил этих волновых свойств электронов?

— Причина в том, что волновые свойства света становятся заметными, только если размеры освещаемого объекта достаточно близки к длине волны падающего света. У электронов же длины волн, как правило, настолько малы, что выявить их волновые свойства можно только при взаимодействии с объектом атомных масштабов.

Именно такая ситуация и имела место, когда К. Дж. Дэвиссон и Л. Х. Джермер направили пучок электронов на кристалл и увидели распределение интенсивности рассеянных электронов, поразительно похожее на то, что получается при рассеянии рентгеновских лучей.

Но еще раньше, чем были опубликованы их результаты, произошли события, на фоне которых даже доказательство волновых свойств электрона уже теряло во многом свою значимость.

Речь идет об одной из величайших революций в физическом мировоззрении — создании квантовой теории. С двумя именами связываем мы эту револю-

цию: Вернера Гейзенберга и Эрвина Шрёдингера.

В. Гейзенберг в свои двадцать с небольшим лет не был скован методами классической физики, которую он, впрочем, великолепно знал. И может быть, именно поэтому он так решительно отрекся от полуклассического подхода Н. Бора и пришел к выводу, что о новых явлениях нужно говорить новым языком. В. Гейзенберг начал с того, что орбиты обращения электронов в атоме и частоты этих обращений — существенный элемент в теории Бора — сами по себе ненаблюдаемы. Об электронах в атоме экспериментатор судит только по энергиям (или, что то же самое, частотам) излученных или поглощенных квантов. Излучение или поглощение кванта отвечает переходу атома в то или иное квантовое состояние, которое следует характеризовать не классическими орбитами, а только энергией. В соответствии с этим в теории В. Гейзенберга основной величиной является «амплитуда перехода», описывающая переход системы из одного квантового состояния в другое.

Для атома (как и для других квантовых систем с дискретным спектром, энергии состояний задаются целыми числами) амплитуды определяются двумя целыми числами, отмечающими начальное и конечное состояния.

В своей первой работе В. Гейзенберг испробовал свой метод квантовых амплитуд перехода на относительно простой задаче осциллятора. (Осциллятор — физическая система, характеризующаяся колебаниями определенной частоты. Пример — груз на пружинке.) В новой теории вовсе не фигурировали такие величины, как траектории, столь привычные в любой механической задаче. Тем не менее В. Гейзенберг успешно решил задачу по определению энергии уровней осциллятора. Правильный ответ В. Гейзенберга не мог быть получен из старой, квантовой, теории.

Наиболее дальновидные физики быстро и по достоинству оценили работу В. Гейзенберга. После мучительных поисков среди нарастающего количества необъясненных фактов появилась маленькая надежда.

Не прошло и полугода, как двое геттингенских физиков — Макс Борн и Паскуаль Йордан, распознали в амплитудах перехода В. Гейзенберга уже давно известные в математике объекты — матрицы, теория которых была разработана математиками еще в XIX в., присоединились к В. Гейзенбергу, и все трое написали совместную работу, в которой сформулировали основные принципы квантовой механики.

Особенностью новой теории было то, что физические величины (импульс, координата) не выражались теперь просто числами. Вместо чисел фигурировали матрицы — таблицы чисел. Матрицы, как и обычные числа, можно складывать и умножать друг на друга. Только вот умножение для матриц несколько необычное. Например, бывает так, что $(a \cdot b)$ не равно $(b \cdot a)$, т. е. результат произведения двух матриц, вообще говоря, зависит от порядка сомножителей.

Какой же смысл в этих матрицах, или, как часто их называют, операторах, введенных В. Гейзенбергом? По В. Гейзенбергу надо иметь дело только с тем, что можно наблюдать, и, стало быть, операторы представляют наблюдаемые величины: импульс, координату...

Но ведь только что было сказано, что В. Гейзенберг считал ненаблюдаемыми орбиты электрона в атоме. Нет ли противоречия?

— Нет, противоречия нет. Дело в том, что, согласно классической механике, движение любого тела описывается его положением и скоростью, или же, что то же самое, его положением и импульсом (произве-

дением массы на скорость). Это и есть то, что мы называем классической орбитой: где находится сейчас и как быстро движется? Так вот, по В. Гейзенбергу, произведение оператора импульса на оператор координаты не равно произведению оператора координаты на оператор импульса.

В квантовой механике оператор физической величины означает операцию измерения этой величины. Произведение операторов — последовательное измерение физических величин в том порядке, в котором перемножены соответствующие операторы.

Отсюда, в частности, следует, что результат измерения координаты и импульса зависит от того, что измеряется сначала. Это типично квантовая ситуация. Если бы постоянная Планка была бы равна нулю, то результат не зависел бы от порядка измерения.

— Операторы... Вроде бы все понятно, а как-то не ясно: что же происходит, скажем, с электроном при измерении?

— Наверное, что-то в этом роде приходило на ум и В. Гейзенбергу, и спустя почти два года после своей первой статьи по квантовой механике он написал работу «О наглядном содержании квантотеоретической кинематики и механики».

Почему нельзя определить орбиту, по которой движется электрон в атоме? Да потому, что импульс фотона, необходимого для «освещения» электрона, настолько велик, что фотон просто-напросто выбьет его из атома, так что ни о какой орбите и говорить после этого будет нечего!

— А зачем же брать такой мощный фотон? Что если «потрогать» электрон осторожно, потихоньку, не сбивая его с «пути истинного»?

— Увы, у такого «мягкого» фотона длина волны так велика, что он уже не различает деталей внутреннего строения атома, а «видит» его целиком. Иными

словами, использование фотонов малых импульсов вносит очень большую неопределенность в координату измеряемого объекта, в данном случае электрона.

Этот мысленный опыт измерения орбиты электрона в атоме, приведенный В. Гейзенбергом в упомянутой выше работе, лишь частный случай общего правила квантовой механики. Если мы пытаемся описать микрообъекты, используя классические понятия импульса и координаты (другие нам просто недоступны, мы — «классические» существа), то всегда имеется принципиальная неопределенность в значении каждой из этих величин. В крайнем случае, когда значение одной из этих величин известно точно (полная определенность), другая становится абсолютно неопределенной.

Примерно в то же самое время, когда В. Гейзенберг и его коллеги закладывали основы квантовой механики, в Цюрихе Эрвин Шрёдингер размышлял над идеей Л. де Бройля о волнах вещества. Ему не очень нравились «квантовые скачки», связанные с матрицами В. Гейзенберга, и вот теперь появилась идея, которая позволит, как думал Э. Шрёдингер, избавиться раз и навсегда от чуждой классическому волновому идеалу «изначальной» дискретности.

Надо сказать, что еще в XIX в. шотландец В. Р. Гамильтон обнаружил интересную аналогию между движением материальной точки в силовом поле и геометрической оптикой в неоднородной среде. Это и послужило Э. Шрёдингеру отправной точкой: он распространил аналогию В. Р. Гамильтона на волны Л. де Бройля. Но в волновой теории обязательно должно быть уравнение, решение которого дает распределение волнового поля в пространстве и времени — Э. Шрёдингер нашел такое уравнение. Теперь он понимал дискретность уровней в атоме с близких

ему волновых позиций. Представьте натянутую струну. Если дернуть за нее, образуется стоячая волна. Как известно, в струне можно вызвать лишь такие колебания, когда на длине струны укладывается целое число длин волн. Нечто подобное происходит и с атомом в теории Э. Шрёдингера: дискретность — это проявление волновых процессов в ограниченном пространстве атома. В 1926 г. появились шесть статей Э. Шрёдингера, в которых он сформулировал математически свой подход к квантовой проблеме, а также доказал, что его «волновая механика» по своим наблюдаемым следствиям полностью эквивалентна «матричной механике» В. Гейзенберга.

Многих современников этих бурных событий в физике очень беспокоил вопрос о случайности и закономерности. В квантовой теории нельзя однозначно предсказать состояние системы, как это имеет место в классической механике; можно лишь узнать вероятность пребывания системы в том или ином состоянии. Тут вроде бы даже причинность нарушается, вроде бы даже у электрона «свобода воли» имеется — в таких ересь обвиняли квантовую теорию!

На самом деле никакого нарушения причинности, если понимать ее диалектически, в квантовой механике нет. Согласно Э. Шрёдингеру, состояние электрона описывается волновой функцией, значение которой в любой момент времени строго определяется ее начальными значениями. Но волновая функция, вернее квадрат ее абсолютного значения (как впервые показал М. Борн), определяет не само положение электрона, а лишь вероятность его нахождения в том или ином месте

К 1927 г. квантовая теория была в принципиальном отношении завершена, хотя впереди ее еще ожидали длительные и бурные дискуссии.

Одновременно с пониманием квантовых законов

обнаружилось замечательное явление — наличие у электрона собственного, врожденного момента количества движения, спина.

Вернемся к тому моменту, когда в 1913 г. Н. Бор опубликовал свои самые первые статьи по квантовой теории атома. Исключительно важным для расчета спектров по Бору было «квантование» момента количества движения, заключавшееся в том, что вектор момента количества движения может принимать по величине лишь значения, кратные постоянной Планка. (Впервые идея о квантовании момента количества движения была высказана Дж. Никольсоном. Однако ему не удалось построить удовлетворительной теории атома.) В единицах постоянной Планка момент импульса, согласно Бору, всегда целое число.

До поры до времени с помощью правил Бора удавалось неплохо описывать спектры излучения атомов, но по мере продвижения к более сложным атомам все чаще дело не ладилось. Гейзенберг в 1922 г. предположил, что внешний электрон каким-то образом передает остальным электронам половину момента импульса, но Вольфганг Паули — друг и collega — осмеял его, заявив, что если еще и дальше делить пополам, то от квантовой теории ничего не останется. Вообще, эта половина момента импульса появлялась не только у Гейзенберга, но и у других физиков. Наконец, в начале 1925 г. молодой американский ученый Р. Крониг, работавший тогда в Европе, пришел к выводу о том, что всё вроде становится на свои места, если предположить, что у электрона есть свой собственный угловой момент — как если бы это был вращающийся шарик. Вообще в квантовой механике электрон не обладает размерами, т. е. является материальной точкой. Предположение Р. Кронига тогда можно было бы понимать в духе предельного перехода к нулевому радиусу вращающегося шари-

ка. В классической механике мы получили бы нулевой момент импульса, но в квантовом мире классика не указ, и почему бы моменту импульса, уменьшаясь, не застопориться на половине? Правда, полуцелые угловые моменты противоречат правилу квантования Бора, но ведь они-то, эти правила, не всегда и сами работают...

Р. Крониг, конечно, имел поводы для сомнений и решил поделиться ими с Паули и с самим Бором. Паули опять выступил в роли «злого гения», раскритиковав Кронига. Возможно, это было сделано по причинам, казавшимся в то время вескими, например за излишнюю наглядность. Ведь только назревал разрыв со старой квантовой теорией, сперировавшей наглядными, но ненаблюдаемыми величинами. Бор также высказался отрицательно. Крониг, побоявшись идти против мнения таких авторитетных людей, не стал ничего публиковать. Примерно в то же время Паули сформулировал свой принцип исключения: электрон в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами, и никакие два электрона не могут иметь идентичные наборы этих квантовых чисел. Это позволило понять неразрешимую в старой квантовой теории загадку о количестве электронов, заполняющих энергетические оболочки.

Но идея собственного момента импульса не умерла. Наоборот, в том же, 1925 году голландские теоретики Г. Е. Уленбек и С. А. Гаудсмит также пришли к выводу, что объяснить расщепление спектральных линий в так называемом аномальном эффекте Зеемана можно, если предположить, что электрон обладает собственным полуцелым угловым моментом — спином. Они, в отличие от Кронига, все же опубликовали свою статью осенью 1925 г., пожав лавры открывателей спина. (Надо, однако, отметить, что Уленбек и Гаудсмит пользовались моральной поддержкой

одного из активных «квантистов» — П. Эренфеста.)

Вскоре Бор, а немного погодя и Паули «признали» спин в качестве особого неотъемлемого свойства электрона. Известно, что именно полужелость спина электрона тесно связана с принципом Паули.

Энрико Ферми в 1926 г. на основании всего имевшегося к тому времени экспериментального материала пришел к выводу: любые частицы с полужелым спином (в единицах постоянной Планка $\hbar/2\pi$) подчиняются принципу запрета Паули. Кроме электрона такими частицами являются протоны, нейтроны, ядра и многие другие физические системы. Общее название таких объектов — фермионы.

А если спин целый? Систему частиц с целым спином на примере фотонов впервые рассмотрел в 1921 г. индийский физик С. Бозе. В отличие от фермионов бозоны (так называли объекты с целым спином) очень любят скапливаться в одном и том же квантовом состоянии.

Такая конденсация, например, приводит к замечательному явлению сверхтекучести жидкого гелия при низких температурах.

— А что особенного в принципе Паули? Это же очевидно, что электроны не могут иметь всё одинаковое — не могут же они находиться в одном и том же месте? Они всегда отличаются, хотя бы координатой.

— Не забывайте, что когда мы говорим о квантовом состоянии электрона, то имеем в виду набор определенных квантовых чисел. В частности, в атоме электроны характеризуются определенными энергиями, а об их координатах нет и речи — они полностью неопределенны, хотя мы и знаем, что в среднем они сосредоточены в ограниченной области. И когда мы говорим, что электроны не могут находиться в одном и том же состоянии, то имеем в виду именно те кван-

товые числа, которые могут быть одновременно измерены: энергия, момент импульса. Координата к этим числам не относится.

— Но ведь в принципе можно использовать и координаты, а не энергии для описания состояния электрона?

— Да, конечно, но это, как мы видели, означало бы фактически удаление электрона из атома, а это уже другая физическая ситуация.

— Но это значит, что и бозоны, когда они скапливаются в одном и том же состоянии, вовсе не находятся в одном и том же месте, а просто имеют одинаковые энергии?

— Совершенно верно.

Итак, все квантовые системы во Вселенной являются либо бозонами, либо фермионами. При этом все эти частицы идентичны в своем классе. Например, все электроны абсолютно одинаковы по своим внутренним характеристикам: массе, заряду, спину. То же относится к другим частицам. Из этой тождественности частиц одного типа получалось удивительно много следствий для излучательной и поглощательной способности атомов: их согласие с экспериментом упрочило квантовую теорию, позволило использовать последнюю как плацдарм для дальнейшего наступления.

Итак, изучение электрона в атоме привело к революции в мировоззрении: люди узнали, что в природе господствует вероятность (заметная, правда, как правило, лишь для атомных явлений), что все частицы обладают спином и по его значению (целому или полуцелому) делятся на два больших класса — бозоны и фермионы — с резко различными свойствами.

Однако еще задолго до создания квантовой механики физикам было известно явление, тесно связанное с атомами и электронами — радиоактивность.

В начале 1896 г. ученые крупнейших европейских городов получили послание от профессора Конрада Рентгена из Германии. Послание содержало в себе тоненькую, в десять страниц, брошюрку и несколько странного вида фотоснимки. В брошюрке сообщалось об открытии нового вида излучения, X-лучей, как назвал их сам К. Рентген (буква X свидетельствовала о том, что автор открытия не понял еще их природу). А на фотоснимках были видны контуры предметов, скрытых под непроницаемыми оболочками.

Необычные свойства X-лучей, дающих возможность увидеть невидимое, быстро нашли применение в практике, способствуя популярности их открывателя. Довольно быстро выяснилось, что рентгеновские лучи — это электромагнитное излучение очень высоких частот. Но главное, пожалуй, было не в этом. Беккерель, услышав в начале 1896 г. сообщение Пуанкаре об открытии Рентгена и решив, что это, как предположил Пуанкаре, один из видов флуоресценции, кинулся в лабораторию. Он был крупнейший специалист по флуоресценции; и кому как не Беккерелю захотелось найти новые лучи в излучении флуоресцентов.

И вот, промучившись этак с месяц и ничего похожего на лучи Рентгена не обнаружив, он все же решил попробовать для порядка все флуоресценты, которые у него были. Настала очередь уранилсульфата калия. Полежав положенное время на солнышке, кристаллы этого вещества, казалось, уступили настойчивости ученого и засветили, наконец, фотопластинки (X-излучение, как думал Беккерель). Поэкспериментировав еще некоторое время, он, наконец, доложил на собрании Парижской академии об открытии проникающих X-лучей, вызываемых светом. Гипотеза Беккереля —

Пуанкаре о происхождении рентгеновского излучения вроде бы получала блестящее экспериментальное подтверждение. Однако вскоре сам Беккерель был вынужден опровергнуть ее. По чистой случайности ему удалось поймать уранилсульфат натрия «на месте преступления», когда тот, вовсе не будучи облученным солнечным светом, преспокойно продолжал засвечивать защищенные фотопластинки. Более того, эта интересная способность не уменьшалась со временем. Беккерель принялся за другие вещества и обнаружил, что новое излучение имеет место лишь там, где есть уран. Итак, выходило, что уран излучает энергию доселе невиданным способом, словно черпая ее из каких-то неведомых источников. Невольно думалось даже о несохранении энергии, вечном двигателе... Помимо урана свойством непрерывно испускать проникающие лучи обладал еще только торий (это выяснилось через два года).

Вскоре супруги Кюри сообщили об открытии двух новых «радиоактивных», как стали называть излучающие вещества, элементов — полония и радия.

Мало что могла сказать тогдашняя теория о радиоактивном излучении. Тем не менее физика двигалась вперед. Было установлено, что при распаде радиоактивных веществ образуются три типа излучений. α -излучение — это поток положительно заряженных частиц с атомным весом 4, что отвечает гелию; β -лучи оказались тождественны с электронами, а γ -лучи с электромагнитным излучением.

Итак, из открытия А. Беккереля следовало, что вещество может самопроизвольно распадаться. В последующих опытах Э. Резерфорд и Ф. Содди окончательно доказали, что в процессе радиоактивного излучения происходит превращение элементов, т. е. элементы, строго говоря, уже не элементы!

Стало ясно, что это ядерный процесс. Э. Резерфорд установил, что ядра занимают ничтожную часть атома, не более одной стотысячной его размера. Но мысль Э. Резерфорда не останавливается на этом: «...мы не можем отвергнуть той возможности, что дальнейшие исследования покажут, что и эти единицы¹ на самом деле сложны и могут быть разделены на еще более фундаментальные сущности». И сам же, немедленно, приступил к этим «дальнейшим исследованиям».

Итак, ядра распадаются, превращаются в ядра других элементов, при этом они испускают α -лучи — это тоже ядра, а вот β - и γ -лучи? Какова их природа?

В ту пору, наверное, было естественным предположение, что электроны просто-напросто содержатся внутри ядра вместе с α -частицами. Что же касается γ -лучей, то Э. Резерфорд считал, что они «соответствуют типам колебаний, содержащихся в его (ядра) структуре электронов».

В 1913 г. Э. Резерфорд предположил, что в ядрах атомов содержатся протоны — ядра атома водорода (экспериментально он доказал это в 1919 г.). А. ван ден Брук тут же выдвинул модель ядра, состоящую из протонов и электронов, которая продержалась почти двадцать лет. Что ж, это выглядело вполне разумно и многое объясняло.

Например, различие между атомным весом и атомным номером достигалось тем, что заряд «лишних» протонов компенсировался противоположным зарядом электронов. Частицы разных зарядов притягиваются, и Э. Резерфорду (а также, независимо от него, У. Харкинсу) пришло на ум, что в ядре содержатся не просто электроны и протоны, но, скорее, каждый электрон связан с протоном в составную частицу — нейтрон. С этого момента и начались поиски нейтрона.

В 1931 г. супруги Жолио-Кюри, пытаясь понять

результаты опытов, проведенных Боте и Беккером, изучали действие на водород вторичного излучения, получающегося при облучении α -частицами ядер легких элементов. Из-за большой проникающей силы этого излучения они решили, что новое излучение состоит из фотонов высокой энергии, тем более что при этом образовывалось большое число быстрых вторичных протонов. По-другому оценил это явление Джеймс Чэдвик, ученик Э. Резерфорда. Более чем десятилетние поиски нейтрона не прошли даром: Дж. Чэдвик быстро повторил опыт Жолио-Кюри и убедился в том, что это и есть то, что он искал так долго, — нейтроны! Статья Дж. Чэдика увидела свет в начале 1932 г.

Первым из теоретиков, откликнувшихся на это открытие, был Дмитрий Дмитриевич Иваненко. Весной 1932 г. он предложил считать ядра построенными из нейтронов и протонов и, что особенно важно, указал на то, что нейтрон столь же элементарен, сколь и протон. Немного погодя появилась статья В. Гейзенберга, в которой он развил идею Д. Д. Иваненко, в частности предложив считать нейтрон и протон двумя состояниями одной и той же частицы — нуклона. Для этого вводилось новое квантовое число — изоспин, аналогичное до известной степени обычному спину, но отличающее направление не в обычном пространстве, а более абстрактном (внутреннем) пространстве изоспина.

Предыдущая же гипотеза о протон-электронном строении ядер приводила ко многим проблемам, например к неправильному спину ядер.

— Но как все же объяснить β -распад ядер, сопровождающийся испусканием электронов?

— Одним из камней преткновения, мешавших сразу и окончательно признать, что электронов нет в ядре ни в «свободном» виде, ни в виде связанного

состояния с протоном и что нейтрон столь же фундаментален, как и протон, и явился этот β -распад.

Многие физики были в плену механистического представления о том, что если что-то появляется наружу, то это «что-то» обязательно «сидит» в готовом виде внутри. Но уже в следующей своей работе, посвященной ядру, Д. Д. Иваненко указал, что электрон, участвующий в β -распаде, следует считать рождающимся в акте распада (так же как фотон рождается электроном при переходе с одного уровня в атоме на другой).

В 1934 г. Энрико Ферми сформулировал теорию β -распада, в которой основным процессом был процесс $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$, где n, p — нейтрон и протон, e — электрон, $\bar{\nu}$ — антинейтрино (тогда его еще называли просто «нейтрино»), после чего вопрос о строении ядра был решен более или менее окончательно. Кроме того, и это исключительно важно, β -распад демонстрировал новое взаимодействие, не сводимое к электромагнитному. Впоследствии его называли слабым — по величине вероятности процесса по отношению, например, к вероятностям электромагнитных процессов.

В поисках ответа на вопрос, что же удерживает протоны и нейтроны в ядре, физики по очевидным причинам не рассматривали ни электромагнитное, ни тем более гравитационное взаимодействие в качестве подходящих кандидатов. Естественно было, однако, попробовать на эту роль новое, фермиевское взаимодействие, которое можно приводить к следующему процессу взаимодействия между протоном и нейтроном:

$$\begin{array}{c} n \rightarrow p \\ \quad \searrow e\bar{\nu} \\ p \rightarrow n \end{array}$$

т. е. нейтрон, превращаясь в протон, отдавал пару электрон-нейтрино протону, который при этом превращался в нейтрон. Это был пример уже известных ранее из квантовой механики атомов обменных взаимодействий, когда частица (электрон — в случае атомов), переходя от одного атома к другому, приводит к силам притяжения между ними.

Аналогичную роль И. Е. Тамм и Д. Д. Иваненко хотели приписать в 1934 г. паре (e , $\bar{\nu}$) для обеспечения притяжения между нейтроном и протоном.

Но тут же выяснилось, что величина получающихся сил слишком мала, чтобы они могли связать нуклоны в ядро и преодолеть электрическое отталкивание протонов друг от друга. Однако сама идея обменных сил как источника удержания нуклонов в ядре оказалась чрезвычайно плодотворной. В 1935 г. Хидэки Юкава на этой основе сделал следующий смелый шаг: он предположил существование новой частицы, обмениваясь которой нуклоны испытывают достаточно сильное притяжение, чтобы образовать ядро атома. Из известных размеров ядра и соотношения неопределенностей Х. Юкава смог оценить массу гипотетического «тяжелого кванта», оказавшуюся равной, по его расчетам, примерно 200 массам электрона. Интересна концовка статьи Х. Юкавы: «Поскольку квант с такой большой массой и положительным или отрицательным зарядом никогда не наблюдался, изложенная теория находится, по-видимому, на неверном пути. Однако мы в состоянии показать, что в условиях обычных ядерных превращений подобный квант не может быть излучен во внешнее пространство». Так рождалась теория сильных взаимодействий.

Действительно, «тяжелые кванты», или, как их позже стали называть, мезоны, не были известны в то время. Кроме того, многие ведущие физики либо

игнорировали, либо скептически восприняли работу японского теоретика. В 1937 г. Андерсен объявил об открытии в космическом излучении частицы с массой, близкой к массе тяжелого кванта Х. Юкавы. Это стимулировало интерес к идее Х. Юкавы и дальнейшим разработкам в этом направлении, хотя впоследствии оказалось, что Андерсен открыл не ядерный квант, а тяжелый аналог электрона — мюон, который не участвует непосредственно в ядерных взаимодействиях. Квант Х. Юкавы, впоследствии названный л-мезоном (или пионом), был открыт лишь в 1947 г.

После второй мировой войны физика частиц двинулась вперед семимильными шагами. Строились новые и новые ускорители, открывались все новые и новые частицы. Скоро их стало так много, что радостное возбуждение начало постепенно сменяться недоумением: что стоит за этим многообразием, как в нем разобраться, Зачем природе нужно столько частиц? Ведь одно время казалось, что все необходимое для функционирования Вселенной, для существования человека уже обеспечено протоном, нейтроном, л-мезоном, электронами и фотоном. К этому еще добавлялось нейтрино, которого никто не видел, но в существовании которого не сомневались.

Действительно, ядра всех элементов состоят из протонов и нейтронов, «склеенных» л-мезонами, фотоны связывают ядра и электроны во всевозможные атомы, чего еще? Ну еще есть нейтрино — оно нужно хотя бы для закона сохранения энергии, есть мюон, но с ним не ясно пока, со временем разберемся... И вот в 1949 г. физики обнаруживают странные пары частиц: они рождаются всегда вместе, и ничем это нельзя объяснить, если пользоваться только известными законами. Над названием долго голову не ломали: так и называли новые частицы странными,

а чтобы объяснить то, что они рождаются парами, придумали новое квантовое число «странность», так что парность рождения странных частиц примерно того же типа, что парность электрона и позитрона.

Странные частицы имели нулевой спин, изоспин — половинку, умеренные массы, «странность» и были наречены К-мезонами. Эти К-мезоны оказались очень интересными частицами.

Итак, частиц открывалось все больше, и, естественно, хотелось усмотреть в этом какой-то новый порядок; нельзя же считать, скажем, что существует сто элементарных частиц? Конечно, при желании можно, но у большинства физиков такого желания не возникало.

В том же, 1949 году, когда были открыты К-мезоны, Ферми и Янг предложили считать мезоны связанными состояниями нуклонов и антинуклонов. Однако эта модель не встретила большого энтузиазма, так как многого не могла объяснить.

И вот в 1956 г. Сеёти Саката попытался навести порядок. Он предположил, развивая в известном смысле идею Янга — Ферми, что из всех сильно-взаимодействующих частиц — адронов — только три фундаментальны: протон, нейтрон и открытый в 1950 г. странный нейтральный барион, названный лямбда-гипероном. Так, по теории С. Сакаты, положительно заряженный л-мезон состоит из протона и антинейтрона; открытый в 1954 г. кси-минус-гиперон — из антипротона, антилямбда — гиперона и нейтрона и т. д. Но после первых успехов начались трудности, которые в конце концов привели к отказу от модели С. Сакаты. Однако эта модель сыграла ключевую роль в дальнейших исследованиях. В частности, она показала, что фактически поиски порядка в мире адронов были поисками симметрии. Симметрия, симметричный — знакомые слова, не правда

ли? Но среди тех, кто употребляет их, не всякий сразу ответит на вопрос: что такое симметрия? Перевод с греческого («соразмерность») не годится, он ничего не объясняет. Для дальнейшего можно удовлетвориться следующим определением: симметрия — это свойство чего-либо оставаться неизменным при совершении определенных действий (преобразований симметрии). Поясним на примере.

Если вы повернете карандаш или переложите его на другой стол, это будут преобразования симметрии. Если же вы в сердцах сломаете его, то, конечно, нет.

Что остается неизменным при вращении и переносе карандаша? Его длина, например.

Другой пример преобразований симметрии — переход от одной инерциальной системы к другой. При этом не меняются законы движения и взаимодействия физических объектов. Преобразования симметрии не всегда столь наглядны. Например, если поменять местами протоны и нейтроны и не обращать внимания на разницу в электрическом заряде, то законы сильного взаимодействия между протонами и нейтронами останутся неизменными. В действительности разница, конечно, есть, но ее можно вполне списать на электромагнитные взаимодействия в виде небольшой поправки. Это значит, что с высокой степенью точности сильные взаимодействия обладают симметрией относительно замены протона нейтроном и наоборот. Если теперь мы вспомним, что Гейзенберг ввел изоспин, то эту замену можно более или менее наглядно представить себе как поворот изоспинового вектора в воображаемом внутреннем трехмерном пространстве. Преобразования симметрии можно комбинировать и получать новые преобразования той же симметрии. Например, два последовательных поворота — это, конечно, то же самое, что определен-

ный поворот, проделанный сразу. Набор преобразований симметрии математики называют группой.

А теперь обратимся к адронам. В начале 60-х гг. было замечено, что все адроны можно распределить по так называемым мультиплетам — наборам частиц, характеризующимся рядом общих признаков. При этом переход от частицы к частице внутри каждого мультиплета отвечал преобразованиям вращения в восьмимерном внутреннем пространстве — обобщении пространства изоспина. Соответствующая группа симметрии — $SU(3)$ — была введена в физику японскими учеными Огава, Онуки и Икеда еще в 1959 г. Дальше на помощь пришла математика. Из теории групп следовало, что существует так называемый фундаментальный мультиплет, отвечающий в данном случае всего трем частицам. Но ни одна из известных частиц не могла претендовать на участие в этом триплете, в то время как все они могли быть составлены из членов этого триплета, если бы они существовали. В 1964 г. Гелл-Манн и Цвейг, независимо друг от друга, предположили, что такие частицы на самом деле существуют. Гелл-Манн назвал их кварками, а Цвейг — асами.

По теории кварков барионы состоят из трех кварков, а мезоны — из двух. Про кварки мы еще поговорим, а пока что возвратимся к тем самым странным К-мезонам, открытым в середине 50-х гг. После того как их снабдили новым квантовым числом — «странностью», выяснилось, что главные-то странности еще впереди. К-мезоны — нестабильные частицы и из-за слабого взаимодействия распадаются на л-мезоны (хотя не только на них, но это сейчас не важно). Так вот эти распады происходили так, словно нарушается никогда не вызывавшая сомнений симметрия относительно замены правого на левое.

— Почему же это «не вызывавшая сомнений»?

Мы сами-то живое опровержение этой симметрии, иначе бы у каждого из нас был бы зеркальный двойник!

— Совершенно правильно! Но речь идет об элементарных частицах, для которых эта симметрия всегда строго выполнялась. Конечно, если даже сто частиц подчиняются какому-то закону, то отсюда не следует, что сто первая тоже будет ему подчиняться. Но ведь вся физика стоит на максимально возможном распространении действия установленных закономерностей, в физике нет строгих логических доказательств. Вернее, у нее своя логика, не совсем похожая на ту, которая применяется в математике.

Впрочем, в данном случае для веры в зеркальную симметрию было гораздо меньше оснований, чем для веры, скажем, в теорию относительности. И может поэтому Янг Чженьнин и Ли Цзундао поставили зеркальную (на самом деле более общую) симметрию под сомнение и предложили ряд экспериментов, в которых этот вопрос можно было решить окончательно. Эксперименты были поставлены, и закон зеркальной симметрии перестал быть всеобщим законом! В β -распаде радиоактивного изотопа кобальта электроны явно не желали вылетать одинаково охотно направо и налево. Впрочем, справедливости ради, надо сказать, что зеркальная симметрия не так уж и безнадежно нарушена. Для многих и многих процессов, не связанных со слабыми взаимодействиями, это действительно симметрия.

Вместо закона зеркальной симметрии придумали другой, в котором преобразованием симметрии является комбинация зеркального отражения и замены частицы на античастицу. Но слабые взаимодействия оказались удивительно сильными в борьбе за ниспровержение симметрий, и не прошло и десяти лет, как комбинированную симметрию постигла судьба зеркальной.

Мы по возможности избегаем формул и уравнений. Можно ли без них рассказать о такой в высшей степени математизированной науке, какой в настоящее время является физика частиц? Еще в начале 20-х гг., когда создавалась квантовая теория, ее творцы, такие, как Гейзенберг и Паули, высказывали мнение, что из новой теории уйдут классическая наглядность, мысленные образы происходящего в микромире, уступив место математическим, абстрактным соотношениям, предсказывающим сразу возможные результаты опыта в виде показаний приборов. Тем не менее даже в наше время авторы многих (и очень хороших) работ, публикуемых в физических журналах, не могут отказать себе в удовольствии, наряду с математическим выводом того или иного физического результата (как правило, в виде предсказания для показаний экспериментальных установок), использовать простые понятия.

Более того, во многих случаях такие наглядные представления — существенный элемент творческого процесса. Это и дает надежду на то, что нам удастся нарисовать хотя бы тот средний словесный портрет обитателей микромира, который соответствует нашим нынешним знаниям.

В современной физической литературе немного найдется словосочетаний, способных соперничать по своей распространенности, по частоте употребления со словосочетанием «уравнение Дирака». Чем же оно столь знаменито? Мы уже говорили раньше об уравнении Шрёдингера, которое определяет поведение квантовых систем. Так вот, уравнение Дирака — это уравнение Шрёдингера для электрона.

Дело в том, что сам Шрёдингер смог решить свое уравнение для электрона в атоме лишь для случая,

когда скорости движения электронов были достаточно малы, чтобы можно было не учитывать эффектов теории относительности, проявляющихся лишь при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Найти же правильное уравнение для электрона, движущегося с произвольной скоростью, было суждено Полю Дираку. Но в этом уравнении были не только правильно учтены требования теории относительности (независимости вида уравнения от выбора инерциальной системы отсчета), но вдобавок, а может даже это и самое главное, оно содержало два приятных сюрприза. Первый — это то, что из уравнения Дирака следовало, что у электрона есть полупецельный спин и соответствующий магнитный момент. Ведь раньше, даже когда все признали существование спина электрона на опыте, в самой теории это было чуждое понятие, его приходилось вводить в уравнения «руками». В уравнении Дирака спин получался сам собой, совершенно естественно, и это казалось чудом, ведь с самого начала о нем и не думали, главной заботой было соединить в уравнении квантовую механику и теорию относительности.

Второй сюрприз сначала казался досадным недоразумением: уравнение Дирака имело решения, отвечающие формально электронам с отрицательной энергией.

Прошло два года споров и предложений, что делать с этими решениями, но самым лучшим выходом из положения оказалось предложение интерпретировать решения с отрицательной энергией как частицы с положительным зарядом, а в остальном подобные электронам, т. е. как «антиэлектроны» или позитроны. При этом позитрон обладает нормальной, положительной кинетической энергией. Вскоре это великое открытие было экспериментально подтверждено К. Д. Андерсоном, наблюдавшим следы заряжен-

ных частиц из космоса в камере Вильсона.

Очень скоро физики пришли к выводу, что не только у электрона, но и у других частиц (тогда еще существовавших лишь в статьях теоретиков) должны быть античастицы. Эксперименты полностью подтвердили это положение, являющееся одним из фундаментальных свойств микромира.

Частицы и античастицы могут появляться на свет парами (чтобы не нарушить закон сохранения заряда) или, наоборот, взаимно уничтожаться, переходя, например, в электромагнитное излучение.

Примерно с начала 30-х гг. XX в. теоретики все чаще приходили к тому, что одновременный учет квантовой механики и теории относительности приводит к очень нетривиальной структуре вакуума.

Сейчас настало время, когда уже можно на основе всего, что мы рассказывали, попытаться понять, что означает пустота вакуума и что означает одновременно имеющая место его непустота.

Начнем с классического вакуума, в котором, грубо говоря, все равно нулю: энергия, импульс, число частиц и т. д. — и применим к нему квантовую механику. Итак, мы имеем физическую систему (вакуум), энергия которой, по определению, равна нулю. Как измерить этот ноль?

Энергия, как всякая квантовомеханическая величина, имеет дополнительную величину — длительность ее измерения. Неопределенность в значении энергии можно сделать сколь угодно малой (т. е. точно измерить энергию системы), если неограниченно увеличивать время измерения. Если же рассматривать малые промежутки времени Δt , то соответствующая неопределенность в энергии ΔE связана с Δt соотношением $\Delta E \Delta t \sim \hbar$

Это справедливо для любой системы, в частности и для вакуума. Отсюда следует, что в течение малых

промежутков времени энергия системы может сильно отклоняться от среднего (измеренного в течение длительного по квантовым масштабам времени) значения, нарушая тем самым закон сохранения энергии. Это, однако, не означает возможности создать «вечный двигатель» — дополнительную энергию нельзя отвести без того, чтобы не затратить столько энергии, что в целом баланс будет в полном соответствии с законом сохранения энергии. Происходит это довольно любопытно.

Рассмотрим ситуацию, когда энергия вакуума стала равной не нулю, а ΔE . Такое состояние, называемое в физике виртуальным, «живет» в среднем время порядка $\hbar/\Delta E$. В квантовой теории энергия неразрывно связана с частицами.

— Стало быть, ΔE — это энергия частиц?

— Да, например, это может быть пара электрон — позитрон, возникшая в вакууме на время $\hbar/\Delta E$ и снова исчезнувшая. Или это может быть пара с фотоном. Все эти то и дело возникающие и исчезающие состояния частиц называются флуктуациями вакуума. Так что благодаря квантовой механике (любая величина обладает неопределенностью, например энергия E) и теории относительности ($E=mc^2$) вакуум оказывается довольно сложной системой. Виртуальные состояния можно сделать реальными, если обеспечить закон сохранения энергии. Вот в вакууме возникла флуктуация — пара электрон — позитрон. Если за время ее существования успеть подвести к ней достаточно энергии, то эту флуктуацию можно «материализовать», сделать наблюдаемой. Именно так можно, например, объяснить рождение пар в интенсивных электромагнитных полях.

К непустоте вакуума можно подойти и по-другому. Вакуум — это квантовая система, в которой число реальных (не виртуальных) частиц равно нулю,

т. е. квантовомеханическая величина (число частиц) имеет точно определенное значение. Согласно принципу дополнительности, существуют другие квантовомеханические величины, дополнительные к числу частиц, неопределенность которых обратно пропорциональна неопределенности в числе частиц. Например, такой величиной для числа фотонов является напряженность электромагнитного поля. И поскольку неопределенность в числе реальных частиц для вакуума равна нулю (их, по определению, там нет), то, в свою очередь, значение напряженности электромагнитного поля в вакууме неопределенно и может, в принципе, быть любым! Согласитесь, что такой вакуум, в котором мерцают поля любой величины, трудно считать пустым. Его можно было бы рассматривать как возрожденное воплощение эфира. Однако свойства его, конечно, намного сложнее (и интереснее!) той «тонкой» субстанции, которую столь интенсивно обсуждали до теории относительности.

— Как же выглядит электрон в таком вакууме?

— Представим себе, что в вакууме внезапно оказывается электрон. Вокруг него кипят флуктуации. Но заряды всегда действуют друг на друга. И вот наш электрон начинает притягивать позитроны, отталкивать электроны, пока, наконец, в среднем не устанавливается какое-то подобие равновесия. И если теперь измерять его заряд, то он уже не такой, каким был раньше, теперь наш электрон окружен «шубой» виртуальных электрон-позитронных пар, виртуальных фотонов, да и вообще уже трудно сказать, где он сам. Приборы воспринимают весь этот рой как целое, потому что процедуру внесения «голого» заряда в вакуум можно лишь представить, но реально мы имеем всегда дело с «одетыми», физическими электронами.

Такое устройство электрона очень не похоже на то, что представляли себе в начале века Абрахам,

Лоренц, Пуанкаре и другие. И не удивительно, ведь они никак не принимали (да и не могли принять еще тогда) во внимание квантовые законы микромира.

На этом можно было бы и закончить нашу историю об электро́не, но...

— Ведь в вакууме полно и других виртуальных частиц: нейтрино, протоны, мюоны... Они же взаимодействуют с электронами?

— Да, совершенно верно, электрон связан не только с электричеством. Он активно участвует в слабом взаимодействии — том самом, что нарушает закон зеркальной симметрии, о котором мы уже рассказывали. Если помните, мы вели речь о том, как происходит слабое взаимодействие (например, β -распад).

С 1934 г. более сорока лет самым удачным для описания экспериментальных данных оставался предложенный Ферми «четырёхфермионный механизм», согласно которому, например, распад начального фермиона (нейтрона) на три конечных фермиона (протон, электрон, антинейтрино) происходит в одной точке пространства—времени. То же самое относится и, скажем, к процессу, в котором вначале имеются электрон и мюонное нейтрино, а в конце — мюон и электронное нейтрино. (Идея о существовании двух типов нейтрино была выдвинута впервые в 1957 г. независимо М. А. Марковым, К. Нишиджимой и Ю. Швингером. Ныне считается, что существуют по крайней мере три нейтрино: электронное, мюонное и тау-нейтрино, отвечающее еще более тяжелому аналогу электрона — тау-лептону.) Чем эти процессы отличаются от электромагнитного взаимодействия двух электронов?

Электроны взаимодействуют не непосредственно, а с электромагнитным полем друг друга. На кванто-

вом языке один из электронов испытывает флуктуацию (точно так же, как вакуум) — превращается в электрон и фотон. «Процесс» идет с нарушением сохранения энергии, но это всегда ускользает (как и должно быть) от наблюдения — фотон поглощается другим электроном. При этом энергии обоих электронов изменились, но в сумме полная энергия осталась той же, что и в начале. Интересно, впрочем, другое. Масса фотона равна нулю, и за время существования флуктуации фотон, двигаясь с максимальной скоростью, может оказаться очень далеко от родителя — электрона. Другими словами, радиус действия электромагнитных сил фактически бесконечен, и даже очень далекие электроны всегда чувствуют друг друга.

Слабое взаимодействие в этом смысле очень «близорукое» — электрону надо сойтись с нейтрино, чтобы провзаимодействовать. В принципе, ничего плохого нет в том, что каждый вид взаимодействия имеет свой собственный радиус: у электромагнитных он бесконечный, а у слабых — нулевой. Эти взаимодействия и по интенсивности столь разительно отличаются друг от друга, что разница в радиусах вроде и не должна удивлять.

И все же с момента открытия четырехфермионной теории слабых взаимодействий теоретики не оставляли попыток придумать другую теорию, более похожую на электродинамику, со своими квантами типа фотона. Первым, кто высказал такую идею, был Хидэки Юкава, и сделал это он уже в следующем году после создания теории Ферми.

Поскольку не вызывало сомнений, что слабые силы очень короткодействующие, то получалось, что «слабые» фотоны, в отличие от обычных фотонов, должны обладать массой покоя, и весьма значительной: чем тяжелее частица, тем труднее ей

уйти далеко за время флуктуации. Вдобавок они должны быть электрически заряженными. Действительно, если использовать идею о «слабых» фотонах, или, как их чаще называют, промежуточных бозонах, то процесс β -распада идет в две стадии; сначала нейтрон разваливается на протон и промежуточный бозон, а затем последний распадается на электрон и антинейтрино. Нейтрон имеет заряд ноль, протон — плюс единицу; стало быть, промежуточный бозон имеет отрицательный единичный заряд, такой же, как у электрона.

— Почему же, несмотря на отсутствие каких-либо экспериментальных указаний о непригодности четырехфермионного взаимодействия (на деле прекрасно объяснявшего результаты опытов), каких-либо прямых проявлений промежуточных бозонов физики продолжали настойчиво искать другой путь?

— Ответ кроется в непрекращающихся поисках единства физической картины мира. Вопреки, казалось бы, абсолютной непохожести двух типов взаимодействия, слабого и электромагнитного, шли упорные поиски следов их гипотетического единства. В истории физики такое уже бывало. Электричество, магнетизм, свет долгое время рассматривались как независимые явления, пока, наконец, благодаря Фарадею и Максвеллу не было осознано, что это лишь разные проявления единого электромагнитного поля. Теперь в роли электричества и магнетизма выступили слабое и электромагнитное взаимодействия.

Долгое время вопрос о массе промежуточного бозона был препятствием на пути к построению теории. Дело в том, что если просто изменить уравнения электродинамики, снабдив фотоны зарядом и массой, то теория сразу же сталкивается с такими

трудностями, что все попытки преодолеть их, предпринимавшиеся на этом пути в течение нескольких десятилетий, неизменно оканчивались неудачей.

Правильный путь к созданию теории нащупали лишь тогда, когда обратили внимание на вакуум. Обычно предполагалось, что все поля в вакууме (вернее, их средние значения) равны нулю. Это кажется довольно естественным, но посмотрим на другие области физики. Вот, например, ферромагнетик (железо). Из школьного курса физики известно, что магнитные свойства железа хорошо объясняются, если считать, что его атомы подобны маленьким магнитам (вспомним хотя бы молекулярные токи Ампера). Установлено, что при температурах выше некоторой критической атомные магниты из-за теплового движения ориентированы хаотически, так что полная намагниченность равна нулю. Если наложить достаточно сильное магнитное поле, то все атомные магниты выстроятся вдоль него и усилят его. Интересно, что при температурах ниже критической атомные магниты выстраиваются в одном направлении сами собой, спонтанно. Нулевая намагниченность оказывается энергетически невыгодной. Если при высоких температурах (и без внешних полей) есть полная симметрия по отношению к вращениям, то при температурах ниже критической эта симметрия теряется, происходит так называемое спонтанное нарушение симметрии.

— Очень интересно. Но какое отношение это имеет к слабым взаимодействиям?

— Прямого отношения нет, но аналогия очень полезная, если осознать, что спонтанное нарушение симметрии, т. е. появление ненулевой средней величины — намагниченности, происходит в основном, обладающим наинизшей энергией состоянии ферромагнетика. Что если так же, как и в ферромагнети-

ках, какая-нибудь величина в вакууме отлична от нуля? Физики-теоретики обычно обсуждают свои проблемы на языке теории полей, квантами которых являются наблюдаемые, а по большей части ненаблюдаемые частицы. Можно построить теорию так, что некоторые поля отличны от нуля в вакууме. Эти поля называют полями Хиггса. Но все-таки хотелось бы, чтобы вакуум был ближе к тому, что он означает, т. е. чтобы все поля в нем были равны нулю. Это можно сделать, если, грубо говоря, отсчитывать поля Хиггса от их средних значений в вакууме, тогда снова все поля равны нулю, но уже в новом вакууме. Однако это еще не все. Если у нас есть «заряженные» фотоны, которые переносят слабые взаимодействия, то при новом отсчете хиггсовых полей возбудить колебания полей, соответствующих «заряженным» фотонам, можно, только затратив определенную энергию.

А это означает, что у «заряженных» фотонов есть, в отличие от обычных фотонов, масса, что и требуется для искомых промежуточных бозонов.

Такой способ «наращивания массы» у промежуточных бозонов отличается от простого введения массы «руками» тем, что все трудности в построении теории, о которых мы говорили выше, исчезают и, в принципе, расчеты происходят так же, как в электродинамике — образцовой теории квантовых полей. Заодно можно единым способом описывать электромагнитные и слабые взаимодействия, сохранив фотон безмассовым. Теория единого взаимодействия, названного электрослабым, была создана к 1967 г. Ш. Глэшоу, С. Вайнбергом и А. Саламом. Пятнадцать лет спустя в Женеве на ускорителе, в котором сталкивались протоны и антипротоны, с энергией, достаточной для рождения 546 нуклонов, но построенном специально для поиска промежуточных бозонов, они,

эти долгожданные промежуточные бозоны, были зарегистрированы! Немного примеров такого рода найдем мы в истории физики. Массы обнаруженных бозонов в точности отвечали предсказаниям теории. Их три, этих бозона: два заряженных W^+ и W^- и один нейтральный Z^0 ; массы $W^\pm$ примерно равны 80 массам протона, а Z^0 — 90 массам протона. (Теория электро-слабого взаимодействия предсказывает еще существование частиц с нулевым спином — квантов полей Хиггса. Масса их, в отличие от масс промежуточных бозонов, не задается теорией. Судя по тому, что частицы Хиггса еще не обнаружены, масса их весьма велика.)

— Какое же тут единство? Нулевые массы фотонов и огромные массы промежуточных бозонов вроде бы свидетельствуют об обратном?

— Это, конечно, так. Но не будем забывать, что каждому явлению свойственны свои характерные пространственно-временные масштабы.

Если же промежуточный бозон движется со все возрастающей скоростью, то он во многих отношениях будет все меньше отличаться от фотона, все менее существенным будет наличие у него массы. В очень малых пространственно-временных масштабах, согласно соотношению неопределенности, импульсы частиц достигают огромных значений, и тогда все четыре частицы: три промежуточных бозона и фотон — выглядят как разные кванты одного и того же единого поля. Но проникнуть на такие расстояния можно, лишь обладая ускорителями с энергией, во много раз превышающей массы промежуточных бозонов. Поэтому мы и видим такую разницу между слабым и электромагнитным взаимодействиями, что разрешающая сила наших современных микроскопов (ускорителей) недостаточна для проникновения туда, где эта разница исчезает. Тем более фанта-

стическим кажется то, что человеческий разум оказался способным угадать это скрытое единство сил природы.

После того как было открыто единство электромагнитных и сильных взаимодействий, совершенно естественно было поставить вопрос: а нет ли единого источника вообще для всех известных взаимодействий — сильного (ядерного), электрослабого и гравитационного? Такая программа не могла оставить равнодушными истинных ревнителей науки. До сих пор публикуется множество статей, в которых разрабатываются проекты, или «сценарии», великого объединения всех взаимодействий.

Сделаем некоторое отступление с тем, чтобы проследить путь, который к этому времени проделала теория сильных взаимодействий. Мы уже рассказывали о том, что для наведения какого-то порядка в обилии сильновзаимодействующих частиц (адронов) очень удобной и экономной оказалась модель кварков, согласно которой элементарными являются не сами адроны, а некоторые гипотетические частицы — кварки, из которых адроны и сделаны. Очень скоро выяснилось, что трех кварков, которыми хотели обойтись поначалу («верхний», «нижний» и «странный»), не хватает. Например, были обнаружены адроны (дельта — плюс — плюс — барионы), которые должны были по всем статьям (заряд, спин) состоять только из «верхних» кварков. Загвоздка же была в том, что все эти три одинаковых кварка — фермионы, а принцип Паули запрещает им находиться в одном и том же состоянии. Ответ был найден очень простой: надо сделать эти кварки разными. Как? Да просто снабдить их еще одним названием или номером, и тогда верхних кварков будет несколько и для дельта — плюс — плюс — бариона надо взять «верхние» кварки, отличающиеся этими новыми

номерами. В этом случае принцип Паули никаких запретов не налагает. Так и сделали советские физики Николай Николаевич Боголюбов, Борис Владимирович Струминский и Альберт Никифорович Тавхелидзе и, независимо от них, японцы М. Хан и Е. Намбу, введя три дополнительных номера, утроив каждый из уже имевшихся трех сортов кварков.

Итак, снова три кварка? Да, но эта тройка и была «настоящей», а тройка Гелл-Мана и Цвейга была тройкой лишь случайно: будь ускорители помощнее в то время, а экспериментаторы — поизобретательнее, в истории с кварками все начиналось бы с четверки, или пятерки, или... Вот в чем дело. Для объяснения спектра известных сейчас адронов не хватает упомянутых выше «верхнего», «нижнего» и «странного» кварка. Были обнаружены адроны, свойства которых можно объяснить, лишь введя новый сорт «очарованных» кварков с очень большой массой (примерно полторы массы протона). Далее пришлось ввести «прелестный» (и еще более тяжелый) кварк, и вот сейчас все ждут открытия шестого, «истинного», кварка, который, как многие думают, завершит этот парад кварковых поколений. Для того же, чтобы формально ввести в физику новые типы кварков, было изобретено новое квантовое число — «аромат». Так что любой кварк может иметь цвет («желтый», «красный» или «синий») и аромат, который трудно себе представить («верхний», «нижний», «странный», «очарование», «прелесть», «истина»).

Гелл-Манн и Цвейг имели дело с известными тогда тремя ароматами. Может быть, в этом физикам повезло, начини они с четырех или более «ароматов», путь к трем «цветам» мог бы быть намного труднее.

Однако время шло, а сами кварки так и не появлялись в детекторах, предназначенных для их регистрации. Сначала думали, что кварки слишком

тяжелые и просто не хватает энергии, чтобы их выбить из адронов. Но мощь ускорителей росла, открывали новые и новые частицы, а кварков среди них не было.

Некоторые склонялись к мысли, что кварки — это лишь удобная математическая фикция, отражающая свойства симметрии адронов, и никакие частицы им не соответствуют. Но вот начались опыты по прощупыванию протона электронами высоких энергий. Результаты были неожиданными — всё происходило так, как будто электроны отскакивают от неведомых заряженных частичек внутри протона, а не рассеиваются непрерывно распределенным «ядерным веществом». (Здесь трудно удержаться от сравнения с опытами Резерфорда, Гейгера и Марсдена. Не правда ли поразительная аналогия?)

Это было обнаружено на линейном ускорителе электронов в Стэнфорде (США) в 1968 г. Последовавшие опыты по взаимодействию протона с нейтрино подтвердили эту версию, более того, по всему выходило, что и спин, и заряд этих частичек такие же, как у гипотетических кварков.

Примерно в это же время в СССР, на крупнейшем тогда в мире ускорителе в Протвине, физики приступили к изучению явлений, происходящих при столкновении двух адронов. Еще раньше было замечено, что с ростом скорости адронов (помимо таких столкновений, когда они отскакивают в стороны, как бильярдные шары) происходят «неупругие» столкновения, когда начальная энергия переходит в массу новых частиц.

Соответственно усложняется и теоретическое и экспериментальное описание таких процессов. В поисках выхода из сложной ситуации теоретики пришли к выводу, что если при анализе любого события, происшедшего в результате столкновения адронов,

следить только за одной-двумя частицами, не обращая внимания на все остальные, то уже эта информация достаточно богата для изучения деталей составного строения и механизма взаимодействия адронов. Такая постановка задачи, когда изучается не один какой-то процесс, а сразу все процессы, где рождается, скажем, ρ -мезон (совокупность таких процессов была названа «инклюзивным процессом»), оказалась исключительно плодотворной. В 1969 г. в Протвино было открыто замечательное свойство инклюзивных процессов (не имеющее аналога для отдельных процессов) — масштабная инвариантность. Суть этого явления заключается в том, что если пропорционально увеличить энергию сталкивающихся адронов и энергию той единственной частицы, за «судьбой» которой следят приборы, то вероятность инклюзивного процесса практически не изменяется, т. е. имеется неизменность (инвариантность) относительно изменения масштаба энергий. Физическая же причина такого явления кроется в составной структуре адронов, в особенностях взаимодействия частиц-кварков, из которых они состоят.

И вскоре все поверили в то, что кварки существуют внутри протона. Правда, из тех же экспериментов по прощупыванию протона вытекало, что на кварки приходится лишь половина импульса протона. Что же несет на себе оставшуюся половину импульса? Ответ почти ясен: это поле, удерживающее кварки вместе. Кванты этого поля были названы глюонами потому, что по-английски «глю» означает «клей». У глюонов нет массы, спин их равен единице, и в этом они сродни фотону. Но их восемь сортов, и они непосредственно взаимодействуют друг с другом, что резко отличает их от фотона. Глюоны меняют цвет кварков и вызывают силы притяжения между ними. Так же как кварки, глюоны никак не

проявляли себя в детекторах. Почему решили взять на вооружение эту теорию? Дело в том, что результаты рассеяния электронов на протонах выглядели так, будто кварки совсем не действуют друг на друга.

В то же время они, очевидно, сильно связаны, раз их не видят экспериментаторы. Ситуация прямо-таки парадоксальная, и некоторое время было не ясно, существует ли теория, приводящая к таким странным явлениям.

Теория такая нашлась, и это была именно теория кварков, взаимодействующих с глюонами посредством «цвета». Поэтому теория получила название «квантовая хромодинамика» (от греч. *chrōma* — цвет).

Так вот, именно из-за того, что глюоны взаимодействуют друг с другом, оказалось, что чем ближе кварки друг к другу, тем слабее они действуют друг на друга: «цветовые» заряды (аналог электрических) уменьшаются. Это во многом объяснило «квази свободное» поведение кварков в экспериментах с электронами. Но если заряд убывает с уменьшением расстояния, то это значит, что он растет с увеличением расстояния.

Как именно это происходит, пока еще не ясно, и проблема «невыветания» кварков и глюонов еще ждет своего решения. Но пока суть да дело, это «невыветание» многими принято как факт и используется для объяснения текущих экспериментов. Впрочем, некоторые физики отвергают саму идею «невыветания» и верят в то, что рано или поздно кварки будут обнаружены в свободном виде.

Если же «невыветание» «цвета» действительно имеет место, то мы достигли последнего предела в делимости вещества — раздробить адроны на составные части не удастся ни при каких энергиях. И в

то же самое время адроны не являются истинно элементарными, коль скоро все их свойства обуславливаются заключенными в них кварками и глюонами.

«Невылетание» «цвета» может быть описано в «сценарии двух вакуумов». Фактически дело обстоит следующим образом: есть два класса частиц — кварки-глюоны и адроны (лептоны, промежуточные бозоны здесь пока не нужны).

В квантовой теории спектр состояний системы начинается с низшего состояния с наименьшей энергией, т. е. вакуума, далее идут уже состояния частиц. Например, в адронном мире ближайшим состоянием (или возбуждением) является л-мезон, потом идут К-мезоны, барионы и т. д. Теперь представим себе гипотетический кварк — глюонный мир. В нем возбуждениями над вакуумом будут глюоны и кварки. Этот мир, однако, не может быть нашим миром, миром, в котором мы живем, — так говорит эксперимент.

Но в то же время он существует, и об этом тоже говорит эксперимент. И вот вопрос: одинаковы ли вакуумы двух миров? Вопрос кажется странным: чем же могут отличаться системы, в которых «все равно нулю»? Но, как мы уже говорили, на самом деле в вакууме далеко не все «равно нулю».

Обычно удобно начинать отсчет энергий с нуля — как с низшей отметки, но, в принципе, выбор любого значения для энергии вакуума ничего не меняет — он не наблюдаем. Но это — если вакуум один. А если их два? Тогда вовсе не очевидно, что отсчет можно выбрать так, что энергия обоих вакуумов равна нулю. Так вот, «невылетание» требует, чтобы энергия кварк-глюонного вакуума была выше, чем энергия адронного вакуума, которую обычно и принимают за нуль.

Каким же образом сосуществуют эти два вакуума? Очень просто: кварк-глюонный вакуум существует в адронном вакууме, как, скажем, пузырьки газа в жидкости. (Помните электрон Пуанкаре?) Пузырьки кварк-глюонного вакуума с реальными кварками внутри и есть реальные адроны, с виртуальными кварками — виртуальные адроны.

Адронный вакуум «не пускает» в себя глюонные «цветные» поля, но если энергии кварков (окруженных, конечно, своими глюонными «шубами») или глюонов достаточно велики, то они могут разойтись далеко, растягивая при этом поверхность пузырька, в котором они живут. Такая конфигурация неустойчива: стоит появиться, скажем, кварк-антикварковой паре, как такой растянутый пузырь распадется на два новых, в одном из которых останется теперь уже реальный (за счет поглощенной энергии натяжения глюонного поля) кварк, а в другом — антикварк. Два новых пузыря — это либо уже готовые адроны, либо продолжается процесс деления, пока не образуется несколько «успокоившихся» пузырей — адронов.

Итак, мы обсудили предположительную картину строения адронов. А как обстоят дела с электроном? На первый взгляд физики давным-давно уже должны были бы составить себе исчерпывающее представление об электронах, с которыми они близко знакомы гораздо дольше, чем с адронами. Вспомним, что электроны как составная часть материи были известны еще в конце XIX в., в то время как адроны стали активно изучаться лишь в 40-х гг. XX в. И тем не менее...

Вывод из классической теории электрона, сделанный Пуанкаре (а также Абрагамом), гласил, что электрон не может быть порождением лишь электромагнитных полей — необходимы силы иного происхождения.

С тех пор как был сделан этот вывод, предпринималось немало попыток реализовать непротиворечивую теорию протяженного электрона. По разным причинам эти попытки оказывались несостоятельными. Главная же трудность состояла в невозможности последовательно сочетать модели электрона с квантовыми законами.

Однако, после того как была создана квантовая теория поля, вопрос о структуре электрона казался решенным. Но квантовополевая структура («шуба» виртуальных частиц) отличается от (гипотетической) «истинной» структуры электрона так же, как, например, облако пи-мезонного поля возле протона отличается от «истинной» структуры последнего, состоящего, как мы теперь знаем, из кварков (и глюонов). До сих пор ни в одном эксперименте электрон не обнаружил никакого особенного поведения, которое можно было бы по отклонению от предсказаний имеющейся теории расценить как проявление его сложного строения. Что это значит? Есть два ответа: либо вовсе нет смысла в поисках структуры электрона, отличной от обычной виртуальной «шубы», либо надо искать ее, эту «истинную» структуру дальше.

Из чего же может состоять электрон? Укажем две возможности. Если составные части электрона (одно из наименований — преоны) будут при столкновении в ускорителе выбиты из него, то мы увидим строение электрона непосредственно, регистрируя эти преоны. Может, однако, оказаться, что преоны подвержены такому же невылетанию, как кварки в адронах.

Вопрос о возможности сложной структуры в той же степени, что для электрона, уместно задать и относительно кварков. На это указывает и аналогия между открытыми в настоящее время кварками и лептонами.

По своим свойствам кварки группируются в три семейства, по два кварка в каждом, причем семейства сильно отличаются по массам.

То же самое характерно и для лептонов, которые группируются так: электрон, электронное нейтрино, мюон, мюонное нейтрино, тау-лептон, тау-лептонное нейтрино. Здесь тоже масса возрастает от семейства к семейству.

Таким образом, есть три, как их называют физики, «поколения» кварков и лептонов. Причина такого размножения неизвестна, и очень вероятно, что она кроется в сложной структуре лептонов и кварков.

Независимо от того, из каких именно составных частей и с помощью каких именно новых сил образованы электроны и кварки, имеется характерное отличие от всех предыдущих структурных уровней — атомов, ядер, адронов.

Из соотношения неопределенностей для импульсов и координат: $p \cdot r \sim \hbar$ можно убедиться в том, что импульсы (а значит, и энергии) внутреннего движения в атомах, ядрах и адронах всегда меньше или примерно равны их массам. В случае же электронов и кварков картина резко противоположна: энергия «внутреннего движения» превосходит массу покоя системы не менее чем в сотни тысяч раз!

Такое «соотношение сил» порождает много вопросов, на которые непросто ответить исходя из имеющихся теоретических представлений.

А теперь вернемся к обсуждению планируемого великого объединения всех взаимодействий. Если пока оставить в стороне гравитацию, то для объединения электрослабых и сильных взаимодействий в единое «электроядерное» есть все основания — глюоны во многом аналогичны промежуточным бозонам на малых расстояниях, где массами пренебрегают, и

вполне могут составить компанию фотону, W^+ , W^- и Z^0 — бозонам.

Все, однако, не так уж просто. Ценой такого объединения оказывается необходимость существования дополнительных бозонов со спином единица и чудовищными массами в 10^{15} масс протона.

Массы, конечно, впечатляющие, но главное-то не в этом, а в том, что эти новые бозоны приводят к распаду протона, того самого протона, который считался вместе с электроном примером стабильности. Вселенная рушится, ведь все вокруг состоит из протонов, нейтронов и электронов! Впрочем, это все теория, а она, наряду с триумфами, знает и немало провалов. Но даже если поверить теории, то протон должен жить в среднем более 10^{31} лет, что практически значит вечность, ведь, по современным понятиям, возраст нашей Вселенной всего 10^{10} лет! В принципиальном отношении, однако, наблюдение распадов протона имеет огромное значение для становления объединительного подхода к физике частиц. Вот почему несколько экспериментальных групп, кто — в брошенных угольных шахтах, кто — в специальных тоннелях в горах Монблана, пытаются уловить эти редчайшие события. Пока безуспешно.

Еще один важный момент в теории великого объединения — огромная разница в масштабах масс, отвечающих электрослабому объединению и электроядерному объединению. Первое связано с массами порядка масс W^+ и Z^0 — бозонов, т. е. примерно 10^2 масс протона, второе же — с массами порядка 10^{15} масс протона. В связи с этим ряд теоретиков высказывал даже пессимистический прогноз: в огромной области энергий между указанными выше масштабами никаких интересных явлений нет и физикам предстоит в будущем тоскливо брести по этой «калибровочной пустыне». В действительности, ско-

рее всего, это пустыня существует в воображении некоторых теоретиков, реальный же мир, как писал В. И. Ленин еще в начале века, «богаче, живее, разнообразнее, чем он кажется, ибо каждый шаг развития науки открывает в нем новые стороны».

В неустанных поисках симметрии физики-теоретики спросили себя: а почему фермионы и бозоны так различны и всегда стоят особняком? Нет ли какой-нибудь сверхсимметрии, которая перемешивает бозоны и фермионы, объединяет их в один класс? Речь идет, конечно, не о том, что фермионы перестают отличаться от бозонов, — принцип Паули незыблем. Дело здесь в другом. Мы уже говорили, что все адроны группируются по мультиплетам, причем в каждом мультиплете содержатся либо бозоны, либо фермионы. Внутри каждого мультиплета частицы могут различаться — массой, зарядом, другими квантовыми числами. Можно переходить от одной частицы к другой, при этом (если симметрия точная) энергия сильных взаимодействий не меняется. Переходя от частицы к частице, мы изменяем ее заряд, «странность» и т. д., но спин при этом, конечно, не изменяется. И здесь уместно задать вопрос: а нет ли в природе такой симметрии, чтобы энергия взаимодействия оставалась неизменной и при изменении спина? На первый взгляд вопрос довольно праздный — ни одно из известных пока явлений, никакие свойства известных частиц не могут навести на такую мысль. Однако если все же попробовать рассмотреть такую симметрию, то получается теперь в каком-то смысле обратная ситуация: в одном мультиплете сидят частицы разного спина. В простейшем случае их всего две и они совпадают по всем параметрам кроме спина. Таким образом, суперсимметрия предсказывает существование у каждой частицы ее двойника, партнера, со спином, отличающимся на половину.

Например, вместе с фотоном должно существовать так называемое фотино — нейтральный фермион, электрону отвечает электрино — отрицательно заряженный бозон с нулевым спином. Однако увеличение числа частиц (а это ведь элементарные частицы) вряд ли можно отнести к достоинствам теории. Есть, однако, и весьма обнадеживающий момент: для того чтобы преобразования между частицами с разными спинами образовывали группу, их необходимо дополнить преобразованиями теории относительно-сти: это переходы между инерциальными системами отсчета, обычные повороты, сдвиги в пространстве и времени.

Это обстоятельство сыграло решающую роль, поскольку означало автоматическое, обязательное включение гравитационного поля в процессе объединения. До сих пор никаким другим методом этого сделать не удавалось.

Сама идея найти единую основу тяготения и электричества вовсе не нова и обсуждается с XVIII в. (а возможно, и с более ранних времен).

Разумеется, свою роль сыграло и внешнее сходство закона гравитационного взаимодействия Ньютона и закона Кулона для электростатического взаимодействия. Фарадей, пожалуй, был первым из физиков, кто еще в 50-х гг. XIX в. поставил задачу экспериментально обнаружить связь сил тяготения и электричества.

Однако его попытки измерить электрическое действие тел, ускоренно движущихся в поле тяготения, не увенчались успехом. Это не смутило великого ученого, его интуиция была сильнее, казалось бы, очевидной неудачи. «Результаты отрицательны», — говорил он на одной из своих лекций. Но «они не колеблют моего сильного убеждения в существовании связи между тяготением и электричеством...»

Как пример можно еще привести несколько фантастическую и безуспешную попытку Лоренца построить гравитационное взаимодействие как следствие электромагнитного.

Новые представления о пространстве-времени, сложившиеся в процессе становления теории относительности, создали условия для релятивистского обобщения ньютоновой теории тяготения. Первый шаг в этом направлении был сделан Пуанкаре в той самой работе 1905 г. «О динамике электрона», в которой была сформулирована теория относительности.

После быстрого прогресса в теории тяготения, увенчавшегося в 1915 г. уравнением Гильберта — Эйнштейна, связывавшим геометрию пространства-времени с распределением энергии и импульса негравитационных видов материи, возобновился и интерес к поискам единого начала гравитации и электромагнетизма.

В 1918 г. математик Герман Вейль выдвинул теорию, согласно которой и гравитация, и электромагнетизм есть лишь следствие геометрических свойств пространства-времени. С формальной точки зрения теория Вейля выглядела вполне корректно, однако из нее вытекали ненаблюдаемые физические эффекты. Несмотря на то что непротиворечивого объединения гравитации и электромагнетизма Г. Вейлю достичь не удалось, его работы сыграли важную роль в осознании значения калибровочной инвариантности — ныне руководящего принципа фундаментальной физики. Смысл калибровочной инвариантности в несколько упрощенном виде сводится к следующему. Вспомним, что в квантовой теории состояние любой системы описывается волновой функцией, квадрат абсолютного значения которой характеризует распределение вероятности обнаружить систе-

му в определенных состояниях. Волновая функция — комплексное число. Как известно, комплексные числа эквиваленты векторам на плоскости. При этом квадрат абсолютного значения комплексного числа совпадает с квадратом длины вектора.

Очевидно, что при повороте вектора, исходящего из начала координат, на некоторый угол длина его не изменится. Поскольку волновая функция зависит от времени и пространственных координат, то вполне естественно считать, что и угол, на который мы можем безболезненно «вращать волновую функцию», также зависит от той же пространственно-временной точки. При этом, однако, оказывается, что энергия квантовой системы изменяется при повороте на такой «локальный» угол. Это плохо, ведь нас интересуют преобразования симметрии, т. е. те, которые не меняют полную энергию.

И здесь мы находим способ сделать «локальные» повороты волновых функций, описанные выше, преобразованиями симметрии, не меняющими энергии. Только надо иметь в виду, что мы говорим о полной энергии, включающей энергию частиц, энергию поля и энергию взаимодействия зарядов с полями. Так вот, если вместе с поворотом волновых функций изменять и потенциалы поля так, что к ним добавляется производная от угла поворота (который является функцией 4-мерной координаты), то в результате этого преобразования («локального калибровочного преобразования») полная энергия не меняется.

Вскоре после работы Г. Вейля появились работы Т. Калуцы и немного позже О. Клейна, в которых взаимосвязь гравитации и электричества освещалась с новой, оригинальной точки зрения.

Представьте себе, что наше пространство-время имеет не четыре, а более измерений. Например, пять. Где же пятое измерение, почему мы его не видим?

Согласно теории Калуцы — Клейна, пятое измерение отличается от остальных тем, что оно закручено в кольцо, т. е. движение вдоль пятого измерения — это хождение по кругу, в то время как остальные четыре измерения — нормальные, бесконечные в обе стороны оси. И вот, если радиус этого круга очень мал, то в пространственном отношении мы его не замечаем, но — и это очень важно — вращение по кругу тесно связано с вращением волновой функции, которое мы недавно обсуждали. Из периодичности 5-мерных функций поля по пятой координате следует калибровочное преобразование потенциалов в 4-мерном пространстве. Интересно, что вся теория Калуцы — Клейна формулируется как теория одной только гравитации в 5-мерном пространстве и только после учета периодичности по пятой координате теория переходит в 4-мерную теорию гравитации и электромагнетизма. Подход Калуцы — Клейна многим казался очень перспективным.

В ходе своих (оказавшихся безуспешными) попыток построить единую теорию поля к этой идее, постоянно модифицируя ее, не раз возвращался А. Эйнштейн. Однако это была классическая теория поля, не учитывающая квантовых законов.

Впрочем, с самого рождения квантовой теории поля в конце 20-х гг. XX в. была поставлена задача «квантования» гравитации. Задача эта оказалась невероятно сложной. Лучшие ученые пробовали свои силы в решении этой проблемы, и среди них — советские физики В. А. Фок, Д. Д. Иваненко, А. А. Соколов, М. П. Бронштейн. Определенных результатов удавалось достичь лишь при исследовании случая слабых гравитационных полей, и тогда это была теория гравитонов — безмассовых квантов гравитационного поля, обладающих спином 2 — в два раза больше, чем у фотонов. Гравитоны взаимодействуют с

квантами остальных видов материи, в частности могут порождать их либо сами поглощаться ими.

Чтобы лучше понять современные взгляды на эту проблему, нам необходимо сделать отступление для того, чтобы обсудить проблемы, возникшие в теории сильных взаимодействий.

Как мы уже не раз говорили, представление об адронах как о связанных состояниях кварков оказалось чрезвычайно плодотворным при наведении порядка в изобилии адронов, открытых к середине 60-х гг. Это однако еще не решало другую важную проблему (не решена она, впрочем, и по сей день): как взаимодействуют между собой сталкивающиеся адроны? На языке квантовой механики это значит: какова амплитуда процесса взаимодействия? Амплитуда взаимодействия до известной степени аналогична волновой функции: квадрат ее абсолютной величины определяет вероятность, с которой после столкновения начальных частиц можно ожидать тот или иной результат. Для амплитуды взаимодействия адронов было придумано много разных выражений, но ни одно из них не было удовлетворительным до конца. Не была таковой и формула для амплитуды, предложенная в конце 60-х гг. Г. Венециано. Она, однако, обладала рядом интереснейших качеств, благодаря которым очень быстро приобрела широкую известность и стала стартовой точкой различных модификаций и обобщений. Для нас важно лишь то, что динамика, отвечавшая амплитуде Венециано, совпадала с динамикой квантованных релятивистских струн. Что же это такое?

Как правило, мы ранее имели дело с точечными объектами — частицами. Струна — это следующий шаг по направлению к протяженному объекту. Струна (вы можете представить себе буквально струну от гитары) — одномерно протяженный объект и обла-

дает собственными колебаниями. Кванты этих колебаний можно сопоставить с частицами. Первоначальное возбуждение после открытия струнной интерпретации амплитуды Венециано вскоре сменилось разочарованием: для построения непротиворечивой квантовой теории струны нужно было, чтобы она существовала в пространстве... 26 измерений! Почему именно 26? Толком на этот вопрос никто до сих пор ответить не смог. Правда, некоторое время спустя удалось после включения фермионных степеней свободы снизить число измерений до 10, но мы-то живем в 4-мерном пространстве! Кроме того, среди квантованных колебаний струны появлялись безмассовые частицы со спином 2, которых и в помине нет в спектре адронов. Были и другие неприятности.

Как же с ней быть? Отбросить как неудачную модель? Вспомним, однако, единые модели Калуцы — Клейна...

Ну конечно же! То, что было недостатком в теории адронов, становится преимуществом в единой теории! Действительно, 10 измерений не страшны тем, кто слышал о моделях Калуца — Клейна, — достаточно «скрутить лишние 6 измерений». Но если в теории Калуца — Клейна «скручивание» одной координаты давало лишь электродинамику, то наличие дополнительных измерений дает дополнительные поля, которые можно связать с промежуточными бозонами и глюонами. Соответственно, аналог периодичности по «скрученным» координатам приводит к инвариантности относительно, например, локальных калибровочных преобразований, связанных с внутренним квантовым числом «цвета». Таким образом преодолевается разрыв между пространственно-временными и «внутренними» симметриями — отныне это лишь разные стороны единой геометрической сущности, 10-мерной струны.

Надо сказать, что понижение размерности с 26 до 10 было фактически обусловлено введением суперсимметрии. Наличие же безмассового кванта со спином 2, т. е. гравитона, создает теории «суперструны» репутацию наилучшего кандидата на звание «теории всего сущего».

Ясно, что лишние шесть измерений закручены в «гипершар» весьма малого радиуса, незаметного в наших обычных условиях. И только когда в «наших» 4 измерениях мы начинаем прощупывать расстояния, сравнимые с размерами области изменения «лишних» 6 измерений, разница между ними исчезает. Исчезает и разница между различными полями. На каких же расстояниях происходит это (окончательное) объединение сил природы?

Очень многие физики разделяют мнение, что это случается на расстояниях порядка планковской фундаментальной длины l_p , сконструированной Планком в самом конце XIX в.

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-33} \text{ см},$$

где $\hbar$ — постоянная Планка, G — гравитационная постоянная Ньютона, а c — скорость света.

Итак, не исключено, что теория суперструны действительно станет «теорией всего сущего». Как же быть тогда с электроном? На столь малых расстояниях и электроны, и кварки уже неадекватные понятия, а вопрос, как устроен электрон, приобретает всеобщее значение — как вопрос о структуре материи вообще.

Вспомним, однако, что в ближайшие десятки лет физики могут рассчитывать на ускорители, «разрешающая способность» которых не превышает 10^{-20} см. Так что увидеть суперструнный мир «живьем» вряд ли удастся. Укрупняя масштабы

(от 10^{-33} до 10^{-20} см), мы будем видеть все более искаженный облик «теории всего сущего», но все же какие-то характерные черты останутся, и по ним мы будем пытаться угадать их источник.

Одна из таких характерных черт — суперсимметрия. Конечно, не в чистом виде, иначе таблицы элементарных частиц были бы вдвое больше за счет суперпартнеров фотона, протона, нейтрино и т. д. Но пока что экспериментаторам не удалось обнаружить ни одного суперпартнера типа бозонного (скалярного) электрона или фермионного фотона (фотино). Стандартное объяснение: суперсимметрия на больших расстояниях уже нарушена и суперпартнеры имеют различные массы, причем (судя по отрицательным результатам их поисков на имеющихся ускорителях) различие может быть очень велико. Например, суперпартнер электрона, имеющего массу $5 \cdot 10^{-4}$ ГэВ, скорее всего имеет массу в несколько сотен ГэВ. Открытие суперсимметрии было бы, конечно, эпохальным событием!

А пока физики-экспериментаторы, замороженные моделями теоретиков, разрабатывают в деталях грандиозные проекты будущих машин для новой атаки микрокосмоса. Но оказывается, что в этом деле можно использовать не только микроскопы (т. е. ускорители-коллайдеры), но и... телескопы!

Обратим свой взор ввысь, в темную бездну Вселенной, усыпанную звездами, которым «несть числа»!

Почему они разбросаны в небе именно так, а не иначе? Существовали ли они вечно, а если нет, то откуда они взялись? Бесконечна ли Вселенная?..

Много мыслей возникает, когда смотришь на звездное небо. Но при чем тут электрон, казалось бы теряющийся со своим ничтожным ($< 10^{-16}$ см) радиусом на фоне невообразимых (10^{28} см!) размеров видимой Вселенной?

Как известно, Вселенная — это не застывшая система звезд, она находится в процессе эволюции, расширения. Со временем расстояния между звездами, галактиками растут. А если мысленно обратить время вспять? Относительные расстояния будут убывать, соответственно возрастает плотность материи. Когда «будут» достигнуты времена, близкие к Большому Взрыву, плотность возрастет настолько, что средняя кинетическая энергия квантов уже трудно даже сказать каких полей легко достигнет значений 10^{19} масс протона. При этом «длина пробега» сравнится с планковской длиной 10^{-33} см. Так что очень возможно, что при таких комфортных условиях в «начале мира» безраздельно царила суперсимметрия. Потом (теперь мы имеем в виду не обратный, а нормальный ход времени) Вселенная расширялась, охлаждалась, и «первобытная симметрия» запечатлевалась в наизидание потомству в распределении вещества, в реликтовом излучении известных (и, может быть, неизвестных) волн. Вот почему космология — наука о строении и эволюции Вселенной — в последние годы все прочнее связывается с физикой микромира в парадоксальном, но неизбежном союзе. И быть может, именно там, в необъятных просторах Вселенной, и таится ответ на вопрос: *как устроен электрон?*

*Анатолий Алексеевич
Логунов
Владимир Алексеевич
Петров*

Как устроен электрон?

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗДАНИЕ

Содержание

**Художник
В. П. Бухарев**

Введение

Как открыли электрон?

Как электрон помог разобраться в тайнах пространства и времени

Электрон и атом

Электроны и ядра

Электрон неисчерпаем

Заведующий редакцией

А. А. Чуба

Редактор

Н. Н. Габисония

Мл. редактор

Е. Б. Крышкина

Художественный редактор

В. П. Храмов

Технический редактор

Е. А. Чулкова

Корректор

М. А. Суворова

ИБ № 176

Сдано в набор 27.05.87.

Подписано в печать 16.12.87.

Формат $70 \times 100^{1/32}$. Бумага

офсетная № 1. Офсетная печать. Гарнитура школьная.

Усл. печ. л. 4,55. Уч.-изд. л.

4,79. Усл. кр.-отт. 18,68. Тираж

200 000 экз. Заказ

№ 1177. Цена 35 коп.

Издательство «Педагогика»

Академии педагогических

наук СССР и Государствен

ного комитета СССР по де

лам издательств, полигра

фии и книжной торговли.

107847, Москва, Лефортов

ский пер, 8. Ордена Трудо

вого Красного Знамени Ка

лининский полиграфиче

ский комбинат Союзполи

графпрома при Государ

ственном комитете СССР по

делам издательств, поли

графии и книжной торгов

ли.

170024, г. Калинин, пр. Ле

нина, 5.

35 коп.

**О том, как сварщики покоряют
металл и плазму.**

**О том, что изучает сварочная
наука.**

**О достижениях современной сва-
рочной техники.**

**Вы сможете прочитать в книге ака-
демика Б. Е. Патона и кандидата
технических наук А. Н. Корниенко
«Огонь сшивает металл» (2-е изд.).**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПЕДАГОГИКА»**