**Квантовая теория и строение материи**

В. Гейзенберг

Понятие "материи" на протяжении истории человеческого мышления неоднократно претерпевало изменения. В различных философских системах его интерпретировали по-разному. Когда мы употребляем слово "материя", то надо иметь в виду, что различные значения, которые придавались понятию "материя", пока еще в большей или меньшей степени сохранились в современной науке.

Ранняя греческая философия от Фалеса до атомистов, искавшая единое начало в бесконечном изменении всех вещей, сформулировала понятие космической материи, мировой субстанции, претерпевающей все эти изменения, из которой все единичные вещи возникают и в которую они в конце концов снова превращаются. Эта материя частично идентифицировалась с некоторым определенным веществом -- водой, воздухом или огнем, -- частично же ей не приписывали никаких других качеств, кроме качеств материала, из которого сделаны все предметы.

Позднее понятие материи играло важную роль в философии Аристотеля -- в его идеях о связи формы и материи, формы и вещества. Все, что мы наблюдаем в мире явлений, представляет собой оформленную материю. Материя, следовательно, является реальностью не сама по себе, но представляет собой только возможность, "потенцию", она существует лишь благодаря форме 13. В явлениях природы "бытие", как называет его Аристотель, переходит из возможности в действительность, в актуально свершившееся, благодаря форме. Материя у Аристотеля представляет собой не какое-либо определенное вещество, как, например, воду или воздух, не является она также и чистым пространством; она оказывается в известной степени неопределенным телесным субстратом, который содержит в себе возможность перейти благодаря форме в актуально свершившееся, в действительность. В качестве типичного примера этого соотношения между материей и формой в философии Аристотеля приводится биологическое развитие, в котором материя преобразуется в живые организмы, а также создание человеком произведения искусства. Статуя потенциально содержится в мраморе уже до того, как ее высекает скульптор.

Только значительно позднее, начиная с философии Декарта, материю как нечто первичное стали противопоставлять духу. Имеются два дополняющих друг друга аспекта мира, материя и дух, или, как выражался Декарт, "res extensa" и "res cogitans". Поскольку новые методологические принципы естествознания, особенно механики, исключали сведение телесных явлений к духовным силам, то материя могла быть рассматриваема только как особая реальность, независимая от человеческого духа и от каких-либо сверхъестественных сил. Материя в этот период представляется уже сформировавшейся материей, и процесс формирования объясняется причинной цепью механических взаимодействий. Материя уже утеряла связь с "растительной душой" аристотелевской философии, и поэтому дуализм между материей и формой в это время уже не играет никакой роли. Это представление о материи внесло, пожалуй, наибольший вклад в то, что мы ныне понимаем под словом "материя".

Наконец, в естествознании XIX столетия важную роль играл другой дуализм, а именно дуализм между материей и силой, или, как тогда говорили, между силой и веществом. На материю могут воздействовать силы, и материя может вызывать появление сил. Материя, например, порождает силу тяготения, и эта сила в свою очередь воздействует на нее. Сила и вещество являются, следовательно, двумя ясно различимыми аспектами физического мира. Поскольку силы являются также формирующими силами, это различие снова приближается к аристотелевскому различению материи и формы. С другой стороны, именно в связи с новейшим развитием современной физики, это различие силы и вещества полностью исчезает, так как всякое силовое поле содержит энергию и в этом отношении представляет собой также часть материи. Каждому силовому полю соответствует определенный вид элементарных частиц. Частицы и силовые поля -- только две различные формы проявления одной и той же реальности.

Когда естествознание изучает проблему материи, ему следует прежде всего исследовать формы материи. Бесконечное многообразие и изменчивость форм материи должны стать непосредственным объектом исследования; усилия должны быть направлены на то, чтобы найти законы природы, единые принципы, которые могли бы служить направляющей нитью в этом бесконечном поле исследований. Поэтому точное естествознание и особенно физика уже давно концентрируют свои интересы на анализе строения материи и сил, которые это строение определяют.

Со времени Галилея основным методом естествознания является эксперимент. Этот метод сделал возможным перейти от общих исследований природы к специфическим исследованиям, выделить характеристические процессы в природе, на основе которых ее законы можно изучать более непосредственно, чем в общих исследованиях. То есть при изучении строения материи необходимо произвести над ней эксперименты. Необходимо поставить материю в необычные условия, чтобы изучить ее превращения в этих обстоятельствах, надеясь познать тем самым определенные фундаментальные черты материи, которые сохраняются при всех ее видимых изменениях.

Со времени формирования естествознания нового времени это было одной из важнейших целей химии, в которой довольно рано пришли к понятию химического элемента. Субстанция, которая не могла быть разложена или расщеплена далее какими угодно средствами, имевшимися в то время в распоряжении химиков: кипячением, сжиганием, растворением, смешиванием с другими веществами, была названа "элементом". Введение этого понятия было первым и исключительно важным шагом в понимании строения материи. Многообразие имеющихся в природе веществ было тем самым сведено по крайней мере к сравнительно малому числу более простых веществ, элементов, и благодаря этому среди различных явлений химии был установлен определенный порядок. Слово "атом" поэтому и было применено к мельчайшей единице материи, которая входит в состав химического элемента, и самая маленькая частица химического соединения могла быть наглядно представлена в виде маленькой группы различных атомов. Мельчайшей частицей элемента железа оказался, например, атом железа, и наименьшая частица воды, так называемая молекула воды, оказалась состоящей из атома кислорода и двух атомов водорода.

Следующим и почти столь же важным шагом было открытие сохранения массы в химических процессах. Если, например, сжигается элемент углерода и при этом образуется двуокись углерода, то масса двуокиси углерода равна сумме масс углерода и кислорода до того, как процесс начался. Это открытие придало понятию материи прежде всего количественный смысл. Независимо от химических свойств материя могла быть измерена ее массой.

В течение следующего периода, главным образом в XIX столетии, было открыто большое число новых химических элементов. В наше время их число перешагнуло за 100. Это число, однако, совершенно ясно говорит о том, что понятие химического элемента еще не привело нас к тому пункту, исходя из которого можно было бы понять единство материи. Предположение о том, что существует очень много качественно различных видов материи, между которыми нет никаких внутренних связей, не было удовлетворительным.

К началу XIX столетия были уже найдены свидетельства в пользу наличия взаимосвязи между различными химическими элементами. Эти свидетельства заключались в том факте, что атомные веса многих элементов казались целочисленно кратными некоторой наименьшей единице, которая приблизительно соответствует атомному весу водорода. Подобие химических свойств некоторых элементов также говорило в пользу существования этой взаимосвязи. Но только благодаря применению сил, которые во много раз сильнее, чем те, которые действуют в химических процессах, можно было действительно установить связь между различными элементами и подойти ближе к пониманию единства материи.

Внимание физиков было привлечено к этим силам в связи с открытием радиоактивного распада, осуществленного Беккерелем в 1896 году. В последовавших затем исследованиях Кюри, Резерфорда и других превращение элементов в радиоактивных процессах было показано со всей очевидностью. Альфа-частицы испускались в этих процессах в виде обломков атомов с энергией, которая приблизительно в миллион раз больше, чем энергия единичной частицы в химическом процессе. Следовательно, эти частицы могли быть теперь использованы в качестве нового инструмента для исследования внутреннего строения атома. Ядерная модель атома, предложенная Резерфордом в 1911 году, явилась результатом экспериментов по рассеянию альфа-частиц. Важнейшей чертой этой известной модели было разделение атома на две совершенно различные части -- атомное ядро и окружающие атомное ядро электронные оболочки. Атомное ядро занимает в центре только исключительно малую долю всего пространства, которое занято атомом, -- радиус ядра приблизительно в сто тысяч раз меньше радиуса всего атома; но оно все-таки содержит почти всю массу атома. Его положительный электрический заряд, являющийся целочисленно кратным так называемому элементарному заряду, определяет общее число окружающих ядро электронов, ибо атом как целое должен быть электрически нейтрален; он определяет тем самым и форму электронных траекторий.

Это различие между атомным ядром и электронной оболочкой сразу дало согласованное объяснение тому факту, что в химии именно химические элементы являются последними единицами материи и что для превращения элементов друг в друга необходимы очень большие силы. Химические связи между соседними атомами объясняются взаимодействием электронных оболочек, и энергии взаимодействия при этом сравнительно малы. Электрон, ускоренный в разрядной трубке потенциалом всего в несколько вольт, обладает достаточной энергией, чтобы "разрыхлить" электронные оболочки и вызвать испускание света или разрушить химическую связь в молекуле. Но химическое поведение атома, хотя в основе его и лежит поведение электронных оболочек, определяется электрическим зарядом атомного ядра. Если хотят изменить химические свойства, нужно изменить само атомное ядро, а это требует энергий, которые примерно в миллион раз больше, чем те, которые имеют место при химических процессах.

Но ядерная модель атома, рассматриваемого как система, в которой выполняются законы ньютоновской механики, не может объяснить стабильность атома. Как было установлено в одной из предыдущих глав, только применение к этой модели квантовой теории может объяснить тот факт, что, например, атом углерода, после того как он взаимодействовал с другими атомами или излучил квант света, по-прежнему остается в конечном счете атомом углерода, с той же самой электронной оболочкой, какую он имел ранее. Эту стабильность можно просто объяснить на основе тех самых черт квантовой теории, которые делают возможным объективное описание атома в пространстве и во времени.

Этим путем было, следовательно, создано первоначальное основание для понимания строения материи. Химические и другие свойства атомов можно было объяснить, применяя к электронным оболочкам математическую схему квантовой теории. Исходя из этого основания, далее можно было пытаться вести анализ строения материи в двух различных направлениях. Можно было или изучать взаимодействие атомов, их отношение к более крупным единицам, таким, как молекулы или кристаллы или биологические объекты, или же можно было пытаться, исследуя атомное ядро и его составные части, продвинуться до того пункта, в котором стало бы понятным единство материи. Физические исследования форсированно развивались в прошедшие десятилетия в обоих направлениях. Последующее изложение и будет посвящено выяснению роли квантовой теории в обеих этих областях.

Силы между соседними атомами являются в первую очередь электрическими силами -- речь идет о притяжении противоположных зарядов и об отталкивании между одноименными; электроны притягиваются атомным ядром и отталкиваются другими электронами. Но эти силы действуют здесь не по законам ньютоновской механики, а по законам квантовой механики.

Это ведет к двум различным типам связи между атомами. При одном типе связи электрон одного атома переходит к другому атому, -- например для того, чтобы заполнить еще не совсем заполненную электронную оболочку. В этом случае оба атома оказываются в конечном счете электрически заряженными и получают название "ионов"; поскольку их заряды в таком случае противоположны, они взаимно притягиваются. Химик говорит в этом случае о "полярной связи".

При втором типе связи электрон определенным образом, характерным только для квантовой теории, принадлежит обоим атомам. Если использовать картину электронных орбит, то можно приблизительно сказать, что электрон обращается вокруг обоих атомных ядер и значительную долю времени проводит как в одном, так и в другом атоме. Этот второй тип связи соответствует тому, что химик называет "валентной связью".

Эти два типа связи, которые могут существовать во всевозможных комбинациях, вызывают в конечном счете образование различных совокупностей атомов и оказываются в конце концов определяющими все сложные структуры, которые изучаются физикой и химией. Итак, химические соединения образуются благодаря тому, что из атомов различного рода возникают небольшие замкнутые группы, и каждая группа может быть названа молекулой химического соединения. При образовании кристаллов атомы располагаются в виде упорядоченных решеток. Металлы образуются тогда, когда атомы расположены так плотно, что внешние электроны покидают свои оболочки и могут проходить сквозь весь кусок металла. Магнетизм некоторых веществ, особенно некоторых металлов, возникает вследствие вращательного движения отдельных электронов в этом металле и т. д.

Во всех этих случаях дуализм между материей и силой еще может быть сохранен, так как ядра и электроны можно рассматривать как строительные кирпичи материи, которые удерживаются вместе с электромагнитными силами.

В то время как физика и химия (там, где они имеют отношение к строению материи) составляют единую науку, в биологии с ее более сложными структурами положение складывается несколько по-другому. Правда, несмотря на бросающуюся в глаза целостность живых организмов, резкое различие между живой и неживой материей, вероятно, проведено быть не может. Развитие биологии дало нам большое число примеров, из которых можно видеть, что специфически биологические функции могут выполняться особыми большими молекулами или группами, или цепями таких молекул. Эти примеры подчеркивают тенденцию в современной биологии объяснять биологические процессы как следствие законов физики и химии. Но род стабильности, который мы усматриваем в живых организмах, по своей природе несколько отличен от стабильности атома или кристалла. В биологии речь идет скорее о стабильности процесса или функции, чем о стабильности формы. Несомненно, квантово-механические законы играют в биологических процессах очень важную роль. Например, для понимания больших органических молекул и их разнообразных геометрических конфигураций существенны специфические квантово-механические силы, которые только несколько неточно могут быть описаны на основе понятия химической валентности. Опыты по биологическим мутациям, вызываемым излучением, показывают также как важность статистического характера квантово-механических законов, так и существование механизмов усиления. Тесная аналогия между процессами в нашей нервной системе и процессами, которые имеют место при функционировании современной электронной счетной машины, снова подчеркивает важность для живого организма отдельных элементарных процессов. Но все эти примеры все-таки не доказывают, что физика и химия, дополненные учением о развитии, сделают возможным полное описание живых организмов. Биологические процессы должны трактоваться естествоиспытателями-экспериментаторами с большей осторожностью, чем процессы физики и химии. Как пояснил Бор, вполне может оказаться, что описания живого организма, которое с точки зрения физика может быть названо полным, совсем не существует, потому что данное описание потребовало бы таких экспериментов, которые должны были бы прийти в слишком сильный конфликт с биологическими функциями организма. Бор описал эту ситуацию следующим образом: в биологии мы имеем дело скорее с реализацией возможностей в той части природы, к которой мы принадлежим, чем с результатами экспериментов, которые мы сами можем произвести. Ситуация дополнительности, в которой действенна эта формулировка, отражается как тенденция в методах современной биологии: с одной стороны, полностью использовать методы и результаты физики и химии и, с другой стороны, все же постоянно употреблять понятия, которые относятся к тем чертам органической природы, которые не содержатся в физике и химии, как, например, понятие самой жизни.

Пока мы провели, следовательно, анализ строения .материи в одном направлении -- от атома к более сложным структурам, состоящим из атомов: от атомной физики к физике твердого тела, к химии и, наконец, к биологии. Теперь мы должны повернуть в противоположном направлении и проследить линию исследований, направленную от внешних областей атома к внутренним областям, к атомному ядру и, наконец, к элементарным частицам. Только эта вторая линия приведет нас, быть может, к пониманию единства материи. Здесь не нужно бояться того, что характеристические структуры будут сами разрушены в опытах. Если поставлена задача проверить в опытах принципиальное единство материи, то мы можем подвергнуть материю действию самых сильных из возможных сил, воздействию самых предельных условий, чтобы увидеть, может ли ,в конце концов материя быть превращена в какую-нибудь другую материю.

Первым шагом в этом направлении был экспериментальный анализ атомного ядра. В начальные периоды этих исследований, которые заполняют примерно первые три десятка лет нашего столетия, единственным инструментом для экспериментов над атомным ядром были альфа-частицы, испускаемые радиоактивными веществами. С помощью этих частиц Резерфорду удалось в 1919 году превратить друг в друга атомные ядра легких элементов. Он смог, например, ядро азота превратить в ядро кислорода, присоединяя к ядру азота альфа-частицу и в то же самое время выбивая из него протон. Это был первый пример процесса на расстояниях порядка радиусов атомных ядер, который напоминал химические процессы, но который вел к искусственному превращению элементов. Следующим решающим успехом было искусственное ускорение протонов в приборах высокого напряжения до энергий, достаточных для ядерных превращений. Для этой цели необходимы разности напряжений примерно в миллион вольт, и Кокрофту и Уолтону в их первом решающем эксперименте удалось превратить атомные ядра элемента лития в атомные ядра элемента гелия. Это открытие выявило для исследований совершенно новое поле, которое может быть названо ядерной физикой в собственном смысле слова и которое очень быстро привело к качественному пониманию строения атомного ядра.

На самом деле строение атомного ядра оказалось очень простым. Атомное ядро состоит всего из двух различных видов элементарных частиц. Одна из элементарных частиц -- протон, являющаяся одновременно ядром атома водорода. Другая была названа нейтроном, частица, обладающая примерно той же массой, что и протон, и, кроме того, электрически нейтральная. Каждое атомное ядро можно, таким образом, охарактеризовать общим числом протонов и нейтронов, из которых оно состоит. Ядро обычного атома углерода состоит из 6 протонов и 6 нейтронов. Но есть также и другие ядра атомов углерода, которые являются несколько более редкими -- они были названы изотопами первых -- и которые состоят из 6 протонов и 7 нейтронов и т. д. Так в конце концов пришли к описанию материи, в котором вместо многих различных химических элементов использовались только три основные единицы, три фундаментальных строительных кирпича -- протон, нейтрон и электрон. Вся материя состоит из атомов и построена поэтому в конечном счете из этих трех основных строительных кирпичей. Это еще, конечно, не означает единства материи, но несомненно означает важный шаг в направлении этого единства и, что было, пожалуй, еще важнее, означает существенное упрощение. Правда, впереди был еще длинный путь от знания этих основных строительных кирпичей атомного ядра к полному пониманию его строения. Здесь проблема была несколько отличной от соответствующей проблемы относительно внешней оболочки атома, решенной в середине двадцатых годов. В случае электронной оболочки силы между частицами были известны с большой точностью, но, кроме того, должны были быть найдены динамические законы, и они в конце концов были сформулированы в квантовой механике. В случае атомного ядра можно было вполне предположить, что динамическими законами являются в основном законы квантовой теории, но здесь были прежде всего неизвестны силы между частицами. Их необходимо было вывести из экспериментальных свойств атомных ядер. Эта проблема не может быть решена полностью еще до сих пор. Силы, вероятно, не имеют такого простого вида, как в случае электростатических сил между электронами во внешних оболочках, и поэтому математически вывести свойства атомных ядер из более сложных сил труднее, и, кроме того, прогрессу препятствует неточность экспериментов. Но качественные представления о структуре ядра приобрели вполне определенный вид.

В конце концов, в качестве последней важнейшей проблемы остается проблема единства материи. Являются ли эти элементарные частицы -- протон, нейтрон и электрон последними, неразложимыми строительными кирпичами материи, иными словами, "атомами" в смысле философии Демокрита, без каких-либо взаимных связей (отвлекаясь от действующих между ними сил), или же они являются только различными формами одного и того же вида материи? Далее, могут ли они превращаться друг в друга или даже в другие формы материи? Если решать эту проблему экспериментально, то для этого требуются силы и сконцентрированные на атомных частицах энергии, которые должны быть во много раз больше, чем те, которые были использованы для исследования атомного ядра. Так как запасы энергии в атомных ядрах недостаточно велики, чтобы обеспечить нам средства для проведения таких экспериментов, то физики должны или воспользоваться силами в космосе, то есть в пространстве между звездами, на поверхности звезд, или же они должны довериться умению инженеров.

На самом деле успехи были достигнуты на обоих путях. Прежде всего физики использовали так называемое космическое излучение. Электромагнитные поля на поверхности звезд, простирающиеся на гигантские пространства, при благоприятных условиях могут ускорить заряженные атомные частицы, электроны и атомные ядра, которые, как оказалось, вследствие своей большей инерции имеют больше возможностей более долгое время оставаться в ускоряющем поле, и когда они в конце концов уходят с поверхности звезды в пустое пространство, то иногда успевают пройти потенциальные поля во много миллиардов вольт. Дальнейшее ускорение при благоприятных условиях происходит еще в переменных магнитных полях между звездами. Во всяком случае, оказывается, что атомные ядра долгое время удерживаются переменными магнитными полями в пространстве Галактики, и в конце концов они, таким образом, заполняют пространство Галактики тем, что называют космическим излучением. Это излучение достигает Земли извне и, следовательно, состоит из всех возможных атомных ядер -- водорода, гелия и более тяжелых элементов, -- энергии которых изменяются примерно от сотен или тысяч миллионов электрон-вольт до величин, в миллион раз больших. Когда частицы этого высотного излучения вторгаются в верхние слои атмосферы Земли, они сталкиваются здесь с атомами азота или кислорода атмосферы или атомами какого-либо экспериментального устройства, которое подвергают воздействию космического излучения. Результаты воздействия могут быть затем исследованы.

Другая возможность состоит в конструировании очень больших ускорителей элементарных частиц. В качестве прототипа для них может считаться так называемый циклотрон, который был сконструирован в Калифорнии в начале тридцатых годов Лоуренсом. Основная идея конструкции этих установок состоит в том, что благодаря сильному магнитному полю заряженные атомные частицы принуждают многократно вращаться по кругу, так что они на этом круговом пути могут снова и снова ускориться электрическим полем. Установки, в которых могут быть достигнуты энергии во много сотен миллионов электрон-вольт, в настоящее время действуют во многих местах земного шара, главным образом в Великобритании. Благодаря сотрудничеству 12 европейских стран в Женеве строится очень большой ускоритель такого рода, который, как надеются, будет давать протоны энергией до 25 миллионов электрон-вольт. Эксперименты, проведенные с помощью космического излучения или очень больших ускорителей, выявили новые интересные черты материи. Кроме трех основных строительных кирпичей материи -- электрона, протона и нейтрона, -- были открыты новые элементарные частицы, которые порождаются в этих происходящих при высоких энергиях столкновениях и которые по истечении исключительно малых промежутков времени исчезают, превращаясь в другие элементарные частицы. Новые элементарные частицы имеют свойства, подобные свойствам старых, за исключением своей нестабильности. Даже самые стабильные среди новых элементарных частиц имеют продолжительность жизни только около миллионной доли секунды, а время жизни других -- еще в сотни или тысячи раз меньше. В настоящее время известно приблизительно 25 различных видов элементарных частиц. Самая "молодая" из них -- отрицательно заряженный протон, который называют антипротоном.

Эти результаты кажутся на первый взгляд опять уводящими в сторону от идей о единстве материи, так как число фундаментальных строительных кирпичей материи, по-видимому, снова увеличилось до количества, сравнимого с количеством различных химических элементов. Но это было бы неточным толкованием действительного положения вещей. Ведь эксперименты одновременно показали, что частицы возникают из других частиц и могут быть превращены в другие частицы, что они образуются просто из кинетической энергии таких частиц и могут снова исчезнуть, так что из них возникнут другие частицы. Стало быть, другими словами: эксперименты показали полную превращаемость материи. Все элементарные частицы в столкновениях достаточно большой энергии могут превратиться в другие частицы или могут быть просто созданы из кинетической энергии; и они могут превратиться в энергию, например в излучение. Следовательно, мы имеем здесь фактически окончательное доказательство единства материи. Все элементарные частицы "сделаны" из одной и той же субстанции, из одного и того же материала, который мы теперь можем назвать энергией или универсальной материей; они -- только различные формы, в которых может проявляться материя.

Если сравнить эту ситуацию с понятием материи и формы у Аристотеля, то можно сказать, что материю Аристотеля, которая в основном была "потенцией", то есть возможностью, следует сравнивать с нашим понятием энергии; когда элементарная частица рождается, энергия выявляет себя благодаря форме как материальная реальность.

Современная физика не может, естественно, удовлетвориться только качественным описанием фундаментальной структуры материи; она должна попытаться на основе тщательно проведенных экспериментов углубить анализ до математической формулировки законов природы, определяющих формы материи, а именно элементарные частицы и их силы. Четкое разграничение между материей и силой или силой и веществом в этой части физики больше проведено быть не может, так как любая элементарная частица не только сама порождает силы и сама испытывает воздействие сил, но и в то же самое время сама представляет в данном случае определенное силовое поле. Квантово-механический дуализм волн и частиц является причиной того, что одна и та же реальность проявляет себя и как материя, и как сила.

Все попытки найти математическое описание для законов природы в мире элементарных частиц до сих пор начинались с квантовой теории волновых полей. Теоретические исследования в этой области были предприняты в начале тридцатых годов. Но уже первые работы в этой области выявили очень серьезные трудности в области, где квантовую теорию пытались объединить со специальной теорией относительности. С первого взгляда кажется, будто две теории, квантовая и теория относительности, относятся к столь различным сторонам природы, что практически они никак не могут влиять друг на друга и что поэтому требования обеих теорий должны быть легко выполнимы в одном и том же формализме. Но более точное исследование показало, что обе эти теории вступают в определенном пункте в конфликт, в результате чего и проистекают все дальнейшие трудности.

Специальная теория относительности раскрыла структуру пространства и времени, которая оказалась несколько отличной от структуры, приписывавшейся им со времени создания ньютоновской механики. Наиболее характерная черта этой вновь открытой структуры -- существование максимальной скорости, которая не может быть превзойдена любым движущимся телом или распространяющимся сигналом, то есть скорости света. Как следствие этого два события, имеющие место в двух весьма удаленных друг от друга точках, не могут иметь никакой непосредственной причинной связи, если они происходят в такие моменты времени, когда световой сигнал, выходящий в момент первого события из этой точки, достигает другой только после момента свершения другого события и наоборот. В этом случае оба события можно назвать одновременными. Поскольку никакое воздействие любого рода не может передаться от одного процесса в один момент времени другому процессу в другой момент времени, оба процесса не могут быть связаны никаким физическим воздействием.

По этой причине действие на большие расстояния так, как оно выступает в случае сил тяготения в ньютоновской механике, оказалось несовместимым со специальной теорией относительности. Новая теория должна была заменить такое действие "близкодействием", то есть передачей силы из одной точки только непосредственно соседней точке. Естественным математическим выражением взаимодействий этого рода оказались дифференциальные уравнения для волн или полей, инвариантные относительно преобразования Лоренца. Такие дифференциальные уравнения исключают какое-либо прямое воздействие одновременных событий друг на друга.

Поэтому структура пространства и времени, выражаемая специальной теорией относительности, предельно резко отграничивает область одновременности, в которой не может быть передано никакое воздействие, от других областей, в которых непосредственное воздействие одного процесса на другой может иметь место.

С другой стороны, соотношение неопределенностей квантовой теории устанавливает жесткую границу точности, с которой могут быть одновременно измерены координаты и импульсы или моменты времени и энергии. Так как предельно резкая граница означает бесконечную точность фиксации положения в пространстве и во времени, то соответствующие импульсы и энергии должны быть полностью неопределенными, то есть с подавляющей вероятностью должны выступить на первый план процессы даже со сколь угодно большими импульсами и энергиями. Поэтому всякая теория, которая одновременно выполняет требования специальной теории относительности и квантовой теории, ведет, оказывается, к математическим противоречиям, а именно к расходимостям в области очень больших энергий и импульсов. Эти выводы не обязательно могут носить необходимый характер, так как всякий формализм рассмотренного здесь рода является ведь очень сложным, и возможно еще, что будут найдены математические средства, которые помогут устранить в этом пункте противоречие между теорией относительности и квантовой теорией. Но до сих пор все-таки все математические схемы, которые были исследованы, приводили в самом деле к таким расходимостям, то есть к математическим противоречиям, или же они оказывались недостаточными, чтобы удовлетворить всем требованиям обеих теорий. Кроме того, было очевидно, что трудности в самом деле проистекают из только что рассмотренного пункта.

Тот пункт, в котором сходящиеся математические схемы не удовлетворяют требованиям теории относительности или квантовой теории, оказался очень интересным уже сам по себе. Одна из таких схем вела, например, когда ее пытались интерпретировать с помощью реальных процессов в пространстве и времени, к некоторого рода обращению времени; она описывала процессы, в которых в определенной точке внезапно происходило рождение нескольких элементарных частиц, а энергия для этого процесса поступала только позднее благодаря каким-то другим процессам столкновения между элементарными частицами. Физики же на основании своих экспериментов убеждены, что процессы такого рода в природе не имеют места, по крайней мере тогда, когда оба процесса отделены друг от друга некоторым измеримым расстоянием в пространстве и во времени.

В другой теоретической схеме попытка устранить расходимости формализма делалась на основе математического процесса, который был назван "перенормировкой". Этот процесс заключается в том, что бесконечности формализма можно было передвинуть в такое место, где они не могут помешать получению строго определяемых соотношений между наблюдаемыми величинами. Действительно, эта схема уже привела до определенной степени к решающим успехам в квантовой электродинамике, так как она дает способ расчета некоторых очень интересных особенностей в спектре водорода, которые до этого были необъяснимы. Более точный анализ этой математической схемы сделал, однако, правдоподобным вывод о том, что те величины, которые в обычной квантовой теории должны быть истолкованы как вероятности, могут в данном случае при некоторых обстоятельствах, после того как процесс перенормировки проведен, стать отрицательными. Это исключало бы, разумеется, непротиворечивое истолкование формализма для описания материи, так как отрицательная вероятность -- бессмысленное понятие.

Тем самым мы уже пришли к проблемам, которые ныне стоят в центре дискуссий в современной физике. Решение будет получено когда-нибудь благодаря постоянно обогащающемуся экспериментальному материалу, который добывается во все более и более точных измерениях элементарных частиц, их порождения и уничтожения, сил, действующих между ними. Если искать возможные решения этих трудностей, то, может быть, следует вспомнить о том, что такие процессы с видимым обращением времени, обсужденные выше, нельзя исключить на основании экспериментальных данных в том случае, если они имеют место только внутри совсем малых пространственно-временных областей, внутри которых с нашим теперешним экспериментальным оборудованием детально проследить процессы еще невозможно. Разумеется, при теперешнем состоянии нашего знания мы едва ли готовы признать возможность таких процессов с обращением времени, если из этого и следует возможность на какой-то более поздней стадии развития физики наблюдать подобного рода процессы таким же образом, каким наблюдают обычные атомные процессы. Но здесь сравнение анализа квантовой теории и анализа теории относительности позволяет представить проблему в новом свете.

Теория относительности связана с универсальной постоянной природы -- со скоростью света. Эта постоянная имеет решающее значение для установления связи между пространством и временем и поэтому должна сама по себе содержаться во всяком законе природы, удовлетворяющем требованиям инвариантности относительно преобразований Лоренца. Наш обычный язык и понятия классической физики могут быть применены только к явлениям, для которых скорость света может рассматриваться практически бесконечно большой. Если мы в наших экспериментах в какой-либо форме приближаемся к скорости света, то мы должны быть подготовлены к появлению результатов, которые более не могут быть объяснены с помощью этих обыкновенных понятий.

Квантовая теория связана с другой универсальной постоянной природы -- с планковским квантом действия. Объективное описание процессов в пространстве и во времени оказывается возможным только тогда, когда мы имеем дело с предметами и процессами сравнительно больших масштабов, а именно тогда постоянную Планка можно рассматривать как практически бесконечно малую. Когда мы в наших экспериментах приближаемся к области, в которой планковский квант действия становится существенным, мы приходим ко всем тем трудностям с применением обычных понятий, которые были обсуждены в предыдущих главах этой книги.

Но должна быть еще третья универсальная постоянная природы. Это следует просто, как говорят физики, из соображений размерности. Универсальные постоянные определяют величины масштабов в природе, они дают нам характеристические величины, к которым можно свести все другие величины в природе. Для полного набора таких единиц необходимы, однако, три основные единицы. Проще всего заключить об этом можно из обычных соглашений о единицах, как, например, из использования физиками системы CQS (сантиметр -- грамм -- секунда). Единицы длины, единицы времени и единицы массы вместе достаточно, чтобы образовать полную систему. Необходимы по меньшей мере три основные единицы. Их можно было бы заменить также единицами длины, скорости и массы или единицами длины, скорости и энергии и т. д. Но три основные единицы необходимы во всяком случае. Скорость света и планковский квант действия дают нам, однако, только две из этих величин. Должна быть еще третья, и только теория, содержащая такую третью единицу, возможно, способна вести к определению масс и других свойств элементарных частиц. Если исходить из наших современных познаний об элементарных частицах, то, пожалуй, самым простым и самым приемлемым путем введения третьей универсальной постоянной является предположение о том, что существует универсальная длина порядка величины 10-13 см, длина, стало быть, сравнимая примерно с радиусами легких атомных ядер. Если из. этих трех единиц образовать выражение, имеющее размерность массы, то эта масса имеет порядок величины массы обычных элементарных частиц.

Если предположить, что законы природы действительно содержат такую третью универсальную постоянную размерности длины порядка величины 10-13 см, то тогда вполне возможно, что наши обычные представления могут быть применимы только к таким областям пространства и времени, которые велики по сравнению с этой универсальной постоянной длины. По мере приближения в своих экспериментах к областям пространства и времени, малым по сравнению с радиусами атомных ядер, мы должны быть готовы к тому, что будут наблюдаться процессы качественно нового характера. Явление обращения времени, о котором говорилось выше и пока что только как о возможности, выводимой из теоретических соображений, могло бы поэтому принадлежать этим мельчайшим пространственно-временным областям. Если это так, то, вероятно, его было бы нельзя наблюдать таким образом, что соответствующий процесс мог бы быть описан в классических понятиях. И все же в той мере, в какой такие процессы могут быть описаны классическими понятиями, они должны обнаруживать также и классический порядок следования во времени. Но пока о процессах в самых малых пространственно-временных областях -- или (что согласно соотношению неопределенностей приблизительно соответствует этому высказыванию) при самых больших передаваемых энергиях и импульсах -- известно слишком мало.

В попытках достичь на основе экспериментов над элементарными частицами большего знания о законах природы, определяющих строение материи и тем самым структуру элементарных частиц, особенно важную роль играют определенные свойства симметрии. Мы напомним о том, что в философии Платона самые маленькие частицы материи были абсолютно симметричными образованиями, а именно правильными телами -- кубом, октаэдром, икосаэдром, тетраэдром. В современной физике, правда, эти специальные группы симметрии, получающиеся из группы вращений в трехмерном пространстве, не стоят больше в центре внимания. То, что имеет место в естествознании нового времени, ни в коем случае не является пространственной формой, а представляет собой закон, стало быть, в определенной степени пространственно-временную форму, и поэтому применяемые в нашей физике симметрии должны всегда относиться к пространству и времени совместно. Но определенные типы симметрии, кажется, в действительности играют в теории элементарных частиц наиболее важную роль.

Мы познаем их эмпирически благодаря так называемым законам сохранения и благодаря системе квантовых чисел, с помощью которых можно упорядочить соответственно опыту события в мире элементарных частиц. Математически мы можем их выразить с помощью требования, чтобы основной закон природы для материи был инвариантным относительно определенных групп преобразований. Эти группы преобразований являются наиболее простым математическим выражением свойств симметрии. Они выступают в современной физике вместо тел Платона. Наиболее важные здесь кратко перечислены.

Группа так называемых преобразований Лоренца характеризует вскрытую специальной теорией относительности структуру пространства и времени.

Группа, исследованная Паули и Гюрши, соответствует по своей структуре группе трехмерных пространственных вращений -- она ей изоморфна, как говорят математики, -- и проявляет себя в появлении квантового числа, которое эмпирически было открыто у элементарных частиц уже двадцать пять лет назад и получило название "изоспин".

Две следующие группы, ведущие себя формально как группы вращений вокруг жесткой оси, приводят к законам сохранения для заряда, для числа барионов и для числа лептонов.

Наконец, законы природы должны быть инвариантны еще относительно определенных операций отражения, которые здесь нет нужды перечислять подробно. По этому вопросу особенно важными и плодотворными оказались исследования Ли и Янга, согласно идее которых величина, называемая четностью и для которой ранее предполагался справедливым закон сохранения, в действительности не сохраняется.

Все известные до сих пор свойства симметрии удается выразить с помощью простого уравнения. Причем под этим понимается, что это уравнение инвариантно относительно всех названных групп преобразований, и поэтому можно думать, что это уравнение уже правильно отображает законы природы для материи. Но решения этого вопроса еще нет, оно будет получено только со временем с помощью более точного математического анализа этого уравнения и с помощью сравнения с экспериментальным материалом, собираемым во все больших размерах.

Но и отвлекаясь от этой возможности, можно надеяться, что благодаря согласованию экспериментов в области элементарных частиц наивысших энергий с математическим анализом их результатов когда-нибудь удастся прийти к полному пониманию единства материи. Выражение "полное понимание" означало бы, что формы материи -- приблизительно в том смысле, в каком употреблял этот термин в своей философии Аристотель, -- оказались бы выводами, то есть решениями замкнутой математической схемы, отображающей законы природы для материи.