

**ОТКРЫТИЕ ПЛАНКА И ОСНОВНЫЕ ФИЛОСОФСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
АТОМНОЙ ТЕОРИИ *)****В. Гейзенберг**

От редакции. В публикуемой ниже статье В. Гейзенберга «Открытие Планка и основные философские проблемы атомной теории» редакцию привлекло ясное и доступное изложение основных идей последних работ Гейзенберга по теории элементарных частиц. Редакция неоднократно получала пожелания, чтобы эти идеи были изложены в доступной форме.

Следует подчеркнуть, однако, что по существу взгляды Гейзенберга определяют пока лишь некоторую программу. Возможность ее конкретного осуществления представляется в настоящее время неясной.

Что касается философских взглядов, изложенных в статье, то они представляются весьма спорными. Так, нельзя согласиться с проведенной в статье общей трактовкой идейного развития физики, в частности, с утверждениями, что это развитие доказывает платоновскую идею, будто в основе природы лежат не элементы материи, а математические образы, фигуры симметрии, или что квантовая механика, возникшая в связи с атомистическими и близкими материализму идеями («вопреки своей теоретико-познавательной структуре»), в последнее время порывает с этой связью и «совершает поворот от Демокрита к Платону». Можно было бы сделать и другие замечания по философским этюдам автора, однако это задача специального исследования.

Редакция не считала нужным делать купюры из статьи Гейзенберга. Советским физикам он известен как выдающийся физик, знакомство с его взглядами в полном объеме представляет определенный интерес.

Поскольку в дальнейшем речь будет идти о философском влиянии открытия Планка, следует прежде всего поднять вопрос, каким образом специальное естественнонаучное открытие может вообще иметь отношение к общим философским проблемам. Очевидно, что это возможно лишь в том случае, когда благодаря этому открытию ставятся или решаются весьма общие вопросы — вопросы, которые имеют целью не столько специальную естественнонаучную область, сколько сам научный метод или основные предпосылки всего естествознания. Знаменитый пример того, что это возможно, дает в физике ньютонова механика, которая в начале нового времени поставила вопрос: что вообще следует разуметь под словами «понимание» или «объяснение природы»? Исключительное влияние ньютоновых «Начал» на мышление следующих столетий основывалось не на специальных аксиомах или результатах этой ньютоновой механики — скажем, таких, как положение, выражаемое известной формулой $\text{сила} = \text{масса} \times \text{ускорение}$, — но на факте, что впервые явление природы в своем временном течении могло быть описано математически, т. е. — на доказательстве, что подобное математическое описание природы, по существу, возможно.

*) Доклад, читанный 25 апреля 1958 г. в Берлине во время торжеств, посвященных столетию со дня рождения М. Планка. «Naturwissenschaften» 45 (Heft 10), стр. 227 (1958). Перевод Э. В. Шпольского.

Если, таким образом, специальные открытия в естествознании могут приобретать влияние на мышление целых столетий, то это влияние все же проявляется не в том, что открытия приносят решение в пользу одной из конкурирующих философских систем или дают обоснование для какой-либо новой системы. Столь тесной связь между естествознанием и философией быть не может. Также и излагаемые ниже соображения не следует толковать, как если бы на основе квантовой теории или атомной теории можно занять позицию за или против одной из прежних или современных философских систем. Интерес естествоиспытателя к философскому образу мышления — другого рода. Естествоиспытателя интересуют прежде всего постановки вопроса и только во вторую очередь — ответы. Постановки вопроса представляются ему ценными, если они оказались плодотворными в развитии человеческого мышления. Ответы могут иметь в большинстве случаев лишь временное значение; они могут с течением времени, благодаря расширению наших фактических сведений, потерять свое значение. В особенности противоречат духу естествознания попытки возвести в догму какие-либо ответы. Напротив, мы должны попытаться без предубеждения научиться возможно большему из новых фактов и из старых и новых постановок вопроса.

После этого предисловия поставим вопрос о философском значении открытия Планка. Какие вопросы общего характера были поставлены решением весьма специальной проблемы о тепловом излучении? Какое значение для философии может иметь формула Планка

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} ?$$

Фундаментальный характер нового, которое было внесено Планком в современное естествознание, пожалуй, лучше всего можно пояснить, если указать, что открытием Планка была вновь поставлена на дискуссию проблема, которая две с половиной тысячи лет назад разделяла Платона и Демокрита, — проблема, решение которой знаменовало основной пункт в расхождении во взглядах между обоими этими философами.

Здесь следует бросить взгляд на историю греческой атомной философии. Систематическое мышление греческих натурфилософов от Фалеса до Демокрита в конце концов привело к проблеме мельчайших частиц. На место приводящей к парадоксам полярности бытия и небытия у Парменида, Демокрит выдвинул полярность между заполненным и пустым, а именно — между атомами и пустым пространством. Сущее, по Демокриту, бесконечно часто встречается именно как мельчайшая, неизменяемая и неделимая составная часть материи. Различные явления в мире объясняются различным расположением и движением атомов в пустом пространстве. Подобно тому как трагедия и комедия могут быть написаны при помощи одних и тех же букв, — подобно этому самые разнообразные объекты могут быть осуществлены при помощи одинаковых атомов. Но о сущности атомов, о том, почему они именно такие, а не иные, не следует спрашивать. Атомы рассматривались просто как данное, они были неделимы, неизменяемы — подлинно сущее, при помощи которого все объясняется, но что само не требует объяснения.

Также и Платон воспринял главные элементы учения об атомах. Четверем элементам: земле, воде, воздуху и огню соответствуют у Платона четыре сорта мельчайших частиц. Эти мельчайшие частицы, по Платону, суть математические образования высокой симметрии. Мельчайшие частицы элемента «земля» считались кубами, элемента «вода» — икосаэдрами.

элемента «воздух» — октаэдрами и элемента «огонь» — тетраэдрами. Но эти элементарные частицы, по Платону, не неделимы; они могут быть разделены на треугольники и составлены из треугольников. Поэтому, например, из двух элементарных частиц воздуха и одной элементарной частицы огня можно построить элементарную частицу воды. Треугольники сами — еще не материя, но только математическая форма. Таким образом, у Платона элементарные частицы не суть просто данное, неизменное и неделимое; они нуждаются еще в объяснении и вопрос «почему» относительно элементарных частиц Платон сводит к математике. Элементарные частицы имеют приписываемую им Платоном форму потому, что эта форма является математически прекраснейшей и простейшей формой. Следовательно, последний корень явлений есть не материя, но математический закон, симметрия, математическая форма. Борьба за примат формы, образа, идеи, с одной стороны, над материей, материально сущим — с другой, или, наоборот, — материи над образом, т. е. борьба между идеализмом и материализмом, приводила в истории философии вновь и вновь человеческое мышление в движение. Естествоиспытателю разница между обоими воззрениями иной раз представлялась не слишком важной. Но уже Платон сам настолько глубоко чувствовал противоречие, что он высказывал желание, чтобы книги Демокрита были сожжены.

Какое же отношение имеет открытие Планка к этому старому вопросу? Для химии XIX столетия атомы были мельчайшими частицами химических элементов. Они сами уже не являлись предметом исследования. Черта дискретности, прерывности, которая проявляется в атомарной структуре материи, должна была сначала приниматься без объяснения. Но открытие Планка сделало очевидным, что этот самый элемент прерывности обнаруживается еще в других местах, именно в тепловом излучении, где он заведомо не может быть понят просто как следствие атомарной структуры материи. Другими словами, открытие Планка выдвинуло идею, что эта черта прерывности в бытии природы, которая проявляется независимо в существовании атомов и в тепловом излучении, должна быть понята как следствие значительно более общего закона природы. Тем самым в естествознании снова проявляется мысль Платона, что в основе атомарной структуры материи в конечном счете лежит математический закон, математическая симметрия. Существование атомов или элементарных частиц, как выражение математической структуры — такова была новая возможность, которую вскрыл Планк своим открытием, — и в этом он соприкоснулся с основными проблемами философии.

Правда, путь к истинному пониманию этой связи был еще очень далеким. Сначала прошло еще четверть столетия, прежде чем можно было дать на основе теории строения атома Бора непротиворечивую математическую формулировку планковой теории квантов. Но и при этом мы были еще далеки от полного понимания структуры материи.

Во всяком случае с открытием Планка выявился как возможный совершенно новый тип закона природы и вместе с тем мы обращаемся уже к специальным физическим вопросам. Прежняя математическая формулировка законов природы, например в ньютоновой механике или в учении о теплоте, содержала в качестве «констант» только свойства тел, к которым эти законы должны были применяться. Но в них не было никаких констант характера универсального масштаба. Например, законы ньютоновой механики в принципе можно было применять к движению падающего камня, к движению Луны относительно Земли или к соударению атомарных частиц. Во всех случаях, по-видимому, происходило одно и то же. Но теория Планка содержит так называемый «квант действия» Планка. Эта величина устанавливает определенный масштаб в природе.

Было выяснено, что в тех случаях, когда «действие» очень велико по сравнению с постоянной Планка, явления протекают совершенно иначе, нежели в тех случаях, когда «действие» сравнимо с планковским квантом действия. Так как в явлениях нашего обыденного опыта мы постоянно имеем дело с действиями, которые очень велики по сравнению с постоянной Планка, то это указывает на возможность того, что явления в атомарной области должны обнаруживать черты, которые вообще лишены непосредственной наглядности. Можно было бы говорить о процессах, которые хотя и были бы по своим действиям доступны для экспериментального наблюдения и которые могли бы быть анализированы средствами математики, но о которых мы уже не можем себе составить наглядного представления. Не наглядный характер современной атомной физики в конечном счете является следствием существования кванта действия Планка, — т. е. следствием существования масштаба атомарной малости в законах природы.

Несколько лет спустя после открытия Планка были во второй раз сформулированы законы природы, которые содержат масштабную константу, подобную кванту действия. Сама эта вторая константа — скорость света — была, конечно, давно известна физикам. Но ее фундаментальная роль, как масштаба в законах природы, была понята лишь в теории относительности Эйнштейна. Между пространством и временем, которые кажущимся образом являются совершенно независимыми формами воззрения, с помощью которых мы воспринимаем бытие, имеются некоторые соотношения, и в математической формулировке этих соотношений появляется скорость света как характеристическая константа. В нашем обыденном опыте мы почти всегда имеем дело с движениями, медленными по сравнению со скоростью света. Неудивительно поэтому, что наши наглядные представления отказывают нам в случае процессов, протекающих со скоростями, близкими к скорости света. Скорость света есть установленная природой мера, которая дает нам сведения не об определенных вещах в природе, но об общей структуре пространства и времени. По нашему наглядному представлению эта структура непосредственно недоступна.

Когда было познано значение обеих универсальных констант — кванта действия Планка и скорости света, — естественно было поставить вопрос, сколько вообще существует таких констант. Ответ гласит, что должны существовать по крайней мере три подобные универсальные константы, но что, вероятно, все остальные постоянные природы при посредстве математических соотношений, частью еще не известных, могут быть сведены к этим трем константам. Что должны существовать именно три подобные естественные единицы меры, физики или техники проще всего могут уяснить себе, вспоминая, что обычные физические или технические системы мер всегда содержат три такие единицы: сантиметр, секунду и грамм. Если мы на место этих трех постоянных, установленных путем соглашения, хотим поставить естественные единицы меры, то к постоянной Планка и скорости света надо добавить еще одну константу. Атомная структура материи выдвигает в качестве третьей единицы длину атомарного порядка величины, например длину порядка диаметра простых атомных ядер. Но точная формулировка этой длины станет возможной только после того, как удастся выразить законы природы математически, таким образом, чтобы в них входила единица длины как существенная величина. Снова надо ожидать, что наши наглядные представления применимы к явлениям, которые разыгрываются в пространствах, больших по сравнению с атомарной единицей длины, но что вблизи наименьшей длины, как называется эта константа, явления протекают совершенно иначе, нежели в привычном нам мире.

Однако этими рассуждениями мы далеко опережаем развитие, как оно на самом деле протекало в предыдущие десятилетия. Вначале открытие Планка вскрыло возможность сведения атомарной структуры материи к математически формулируемым законам, т. е. к математическим формам. Хотя в то время едва ли можно было составить себе представление о том, о каких именно формах может идти речь,—все же тем самым атомной физике была поставлена цель. Взор естествоиспытателя был направлен на отдаленные еще вершины атомной теории, с которых может быть познано как следствие простых математических структур не только существование элементарных частиц и всех состоящих из них атомарных образований, но также и косвенно-физические соотношения в мире вообще. В этом месте надежды атомных физиков соприкоснулись с намерениями Альберта Эйнштейна, который в двадцатых годах развил план, исходя из общей теории относительности, прийти к единой теории поля. Существование рядом друг с другом различных, кажущимся образом независимых силовых полей, ощущалось как неудовлетворительное положение уже со времени возникновения теории тяготения Эйнштейна. В качестве силовых полей физикам давно уже были известны гравитационное или поле силы тяжести и электромагнитное поле. Сюда присоединились в нашем столетии волны материи, которые можно назвать силовым полем химической связи, наконец,—многочисленные волновые поля, сопоставляемые в смысле теории квантов различным, открытым в течение последних десятилетий элементарным частицам. Эйнштейн надеялся на то, что все эти поля можно будет рассматривать как проявления варьирующей от места к месту геометрической структуры пространства и времени и при посредстве соотношения между геометрией и материей свести к общему корню.

При этих попытках Эйнштейн рассматривал как основное используемое в общей теории относительности истолкование гравитационных полей зависящей от места геометрией, между тем как открытые Планком квантовые закономерности он считал вторичными. Совершенно отличную математическую формулировку теории квантов Планка, о которой речь еще впереди, Эйнштейн не считал окончательной, так как она не соответствовала его философским представлениям о задачах точного естествознания. Он ощущал, как неудовлетворительность положения, когда законы природы относятся не к объективным процессам, но к возможностям, вероятностям таких процессов. С другой стороны, атомным физикам как раз теория квантов Планка представлялась истинным ключом к пониманию соотношений. Поэтому они пытались прийти к единой теории поля через квантовую теорию элементарных частиц. Противоречие между силой и материей (*Stoff und Kraft*), которое играло известную роль в натурфилософии XIX столетия, в квантовой теории давно разрешилось в математически анализируемый дуализм между волной и частицей или между силовым полем и материальной элементарной частицей, так что путь отсюда к единой теории поля и материи представлялся открытым.

Прежде чем мы пойдем по этому пути, насколько его удалось пока пройти, и вместе с тем проследим развитие последних десятилетий, рассмотрим теоретико-познавательную ситуацию, которая возникла благодаря открытию Планка и его точной математической формулировке в двадцатых годах. Уже выше была речь о новом типе законов природы, в котором проявляются устанавливаемые природой единицы меры. Быть может, следовало бы правильнее сказать, что речь идет о математически формулируемых основных структурах природы, ибо уже само понятие закона природы, пожалуй, слишком узко, чтобы охватить эти весьма общие соотношения. Уже были упомянуты две подобные области взаимоотношений: теория квантов и теория относительности. Обе теории повлекли

за собой решительные изменения в нашей картине мира, так как они отчетливо показали, что наглядные представления, при помощи которых мы воспринимаем вещи нашего обыденного опыта, применимы лишь в ограниченной области эмпирического опыта и что они поэтому ни в коем случае не принадлежат к обязательным предпосылкам естествознания.

В квантовой теории специально речь идет об объективном описании физических процессов. В прежней физике измерение было путем к установлению объективных, независимых от измерения процессов. Эти объективные процессы могли описываться математически, их причинная связь тем самым строго устанавливалась. В квантовой теории измерение хотя еще и является объективным процессом, так же как и в прежней физике, но заключение от измерения к объективному течению измеряемого атомарного бытия стало проблематичным, так как измерение вмешивается в течение события и уже полностью не может быть отделено от измеряемого объекта. Наглядное описание атомарных процессов, к которому стремились в физике 50 лет назад, стало поэтому невозможным. Мы уже не можем поэтому интерпретировать процессы в атомарной области так же, как процессы большого масштаба. Если же мы пользуемся привычными понятиями, то их применимость ограничивается так называемыми «соотношениями неопределенности». Относительно последующего течения атомарного процесса мы можем, как правило, предсказывать лишь вероятности. Не сами объективные события, но вероятности наступления известных событий могут быть установлены математическими формулами. Уже не сами фактические явления, но возможности явлений—«*Potentia*», если пользоваться понятием философии Аристотеля, подчинены строгим законам природы. Об этой стороне теории квантов уже много говорилось, и я не буду здесь сколько-нибудь подробно обсуждать эту тему. Я не буду также говорить и об истории развития теории квантов — истории, которая прежде всего связана с именами Бора, Борна, Иордана и Дирака. Не буду я останавливаться и на истории развития волновой механики Де Бройлем и Шредингером.

Если считать шаг от классической физики к квантовой теории окончательным, если, следовательно, допустить, что и в будущем в ее основах будет содержаться понятие вероятности или возможности—«*Potentia*», то тогда многие проблемы из философии прежних времен представляются в ином свете и, наоборот, понимание теории квантов углубляется изучением этих прежних постановок вопросов. На связь с понятием «*Potentia*» уже указывалось. Но также и философия нового времени в ее различных системах имеет с квантовой теорией множество связей, которых мы здесь лишь слегка коснемся; от подробного и тщательного изложения следует отказаться.

В философии Декарта противоположность между «*res cogitans*» и «*res extensa*» играла решающую роль; выраженное в этой паре понятий расщепление мира оказало сильнейшее влияние на мышление следующего столетия. В квантовой физике это противоречие выглядит несколько иначе, нежели раньше. Это противоречие представляется менее резким, так как квантовая физика вынудила нас мыслить в различных областях, которые находятся в отношении друг друга в положении, которое Бор выразил понятием «дополнительность». Эти области связей, с одной стороны, исключают друг друга, а с другой,— дополняют, так что лишь благодаря игре этих различных областей возникает полное единство. Каким образом это возможно, без малейшей неясности показывает математика теории квантов. По сравнению с классической физикой квантовая теория заметно отступает от упомянутого слишком резкого разделения мира в философии Декарта.

Кант предоставил в своей философии центральное место так называемым «синтетическим суждениям *a priori*» и априорным формам воззрения. В новом толковании квантовой теории основы классической физики признаны априорными элементами; поскольку это так, — теория квантов содержит существенные элементы философии Канта. Но в то же время априори уделено лишь относительное значение, так как, в противоположность воззрению Канта, априорные понятия не являются неизменяемой основой точного естествознания.

Часто указывалось на позитивистские элементы в теории относительности и в квантовой теории. В частности, идеи Маха не раз оплодотворяли развитие физики со времени открытия Планка. Однако и это влияние не следует переоценивать. В особенности теория квантов в ее современном общепринятом толковании ни в коем случае не рассматривает чувственные ощущения как первично данное, как это делает позитивизм. Если вообще что-либо следует охарактеризовать как первичное, то таковым является в теории квантов реальное, описываемое с помощью понятий классической физики.

Так как теория квантов возникла в связи с атомным учением, то она стоит также, несмотря на свою теоретико-познавательную структуру, в тесной связи с теми философиями, которые выдвигают материю на центральное место системы. Но развитие последних лет, о котором речь будет дальше, совершает вполне отчетливо, — если уж вообще проводить сравнение с античной философией, — поворот от Демокрита к Платону. Именно открытие Планка уже содержит указание на то, что атомную структуру материи можно рассматривать, как проявление математических образов в законах природы.

Кроме того, теоретико-познавательный анализ теории квантов, особенно в той форме, которую ему дал Бор, содержит черты, напоминающие философию Гегеля.

Наконец, были выполнены исследования по поводу отношений теории квантов к логике. Я имею в виду особенно исследования Бейцзеккера. Очевидно, что квантово-теоретическую интерпретацию атомарных процессов можно поставить в связь с расширением логики, которое, возможно, в будущем точном естествознании приобретет весьма общее значение. Тем самым мы бросили весьма поверхностный взгляд на связь между теорией квантов и разнообразными философскими постановками вопросов, в обсуждение которых я, к сожалению, здесь вдаваться не могу.

Наконец, следует еще более подробно упомянуть некоторую физическую проблему, которая привела в последнем десятилетии к развитию теории квантов и атомной теории. Теория относительности и теория квантов выявили некоторые фундаментальные структуры природы, которые ранее были неизвестны. В теории относительности речь идет о структуре пространства и времени, в теории квантов — о следствиях того обстоятельства, что всякое измерение в атомарной области требует акта вмешательства.

Открытая в теории относительности структура может быть коротко описана примерно следующим образом: мы можем словом «прошедшее» объединить все те события, о которых мы, по крайней мере принципиально, можем кое-что узнать, словом «будущее» — все события, на которые мы, по крайней мере в основном, можем еще воздействовать. В нашем наглядном представлении обе эти области событий разделены бесконечно коротким моментом времени, который мы называем «настоящее». Но из теории Эйнштейна мы знаем теперь, что эта область настоящего имеет конечную величину, что она продолжается во времени тем дольше, чем дальше в пространстве удалено от нас место события. Это происходит потому,

что действия не могут распространяться быстрее скорости света. Существует, следовательно, резкая пространственно-временная граница между событиями, о которых мы еще можем узнать, и событиями, о которых мы уже не можем узнать, и существует другая резкая граница между событиями, на которые мы можем воздействовать, и событиями, на которые мы уже не можем воздействовать.

Однако существование подобных резких границ плохо вяжется со структурой физических процессов, которые вскрыты теорией квантов. Из соотношений неопределенности мы знаем, что определение места требует тем более сильного вмешательства, чем точнее оно должно быть произведено. Бесконечно точное определение места требовало бы даже бесконечно сильного вмешательства, и потому вообще не может быть осуществлено. Не приходится поэтому удивляться тому, что утверждаемое теорией относительности резкое разделение приводит к противоречиям при попытке квантово-теоретической формулировки физических процессов. В детали я опять-таки здесь не могу входить, но литература по теоретической физике за последние 25 лет переполнена дискуссиями об этой несовместимости и кажущимися противоречиями, которые долгое время делали невозможным удовлетворительное описание процессов с элементарными частицами вследствие так называемых «расходимостей», к числу которых относится, например, бесконечная собственная энергия электрона. Итак, очевидно, что теория квантов и теория относительности могут быть объединены не без трудностей.

Согласно результатам последнего года мы имеем все основания допустить, что обе теории удастся объединить только в том случае, когда будет вовлечена в круг рассмотрений третья фундаментальная структура, которая связана с универсальной длиной порядка 10^{-13} см.

Прежде всего следует коротко обсудить, о каких физических явлениях идет здесь речь. Химия первоначально сопоставляла различным химическим элементам по одному виду атомов. Опыты Резерфорда и теория Бора показали затем, что так называемый атом химиков состоит из ядра и оболочки электронов. Ядерная физика тридцатых годов научила нас рассматривать ядра как образование из нейтронов и протонов. Таким образом, в конце концов были познаны три важнейших сорта элементарных частиц: протоны, нейтроны и электроны в качестве последних «кирпичей» всякой материи. Но затем, однако, позднейшие эксперименты показали, что существует еще много типов элементарных частиц, которые отличаются от перечисленных выше прежде всего тем, что они могут существовать лишь короткое время, так как они очень быстро испытывают радиоактивный распад, т. е. превращаются в другие частицы. Были открыты мезоны и гипероны, и мы знаем в настоящее время около 30 различных сортов элементарных частиц, большинство из которых обладает лишь очень коротким временем жизни.

Этими открытиями были поставлены два важных вопроса. Первый: являются ли эти элементарные частицы, в особенности протоны, нейтроны и электроны, на самом деле последними неделимыми кирпичиками материи или и они в свою очередь построены из еще более мелких частиц? Но если они являются мельчайшими «кирпичиками», почему их нельзя разделить дальше. Второй вопрос: почему существуют именно эти экспериментально открытые элементарные частицы, почему они имеют наблюдаемые, а не иные свойства? Какой закон природы определяет их массы и заряды, а также силы, с которыми они действуют друг на друга?

На первый вопрос современная физика дает определенный ответ, состоящий в том, что элементарные частицы являются действительно последними мельчайшими единицами материи. Для такого ответа совре-

менная физика дает обоснование, вначале вызывающее некоторое удивление. Каким образом можно установить, что элементарные частицы действительно дальше не могут быть разделены? Единственный метод исследования этого вопроса состоит в том, чтобы попытаться на опыте разложить их дальше при помощи огромных сил. Так как, конечно, не существует ножа или другого инструмента, с помощью которого можно было бы попытаться осуществить деление, то остается единственная возможность заставить частицы испытать соударение, сообщив им наивысшую энергию. Большие ускорительные машины, которые теперь строятся в различных частях света, например в Женеве в качестве совместной европейской работы, в Америке, в России, служат именно этой цели. Также и имеющееся в природе космическое излучение осуществляет подобные соударения. При этом элементарные частицы действительно разлагаются иногда на много разлетающихся частей, но—и это как раз поразительно — части эти не меньше или не легче, нежели элементарные образования, которые были разбиты. Ибо высокая кинетическая энергия соударяющихся частиц может быть по теории относительности превращена в массу, она может быть на самом деле использована для того, чтобы создать новые элементарные частицы. Таким образом, в действительности происходит не расщепление элементарных частиц, но создание новых частиц за счет энергии движения соударяющихся частиц. Итак, уравнение Эйнштейна $E=mc^2$ создает возможность того, что известные в настоящее время элементарные частицы являются на самом деле мельчайшими из существующих образований.

Вместе с тем мы узнаем также, что элементарные частицы все, так сказать, построены из единого вещества, именно, если хотите, — из энергии. Здесь можно увидеть отклики философии Гераклита, согласно которой огонь является основным элементом, из которого состоят все вещи. Но огонь вместе с тем является движущей силой, которая поддерживает мир в движении и если идентифицировать огонь с энергией, то можно прийти к современным представлениям. Элементарные частицы современной физики могут, совершенно так же как в философии Платона, превращаться друг в друга. Они, собственно, не состоят из материи, но они являются единственно возможными формами материи. Энергия становится материей, поскольку она проявляется в форме элементарных частиц, поскольку она себя в этой форме обнаруживает. Это напоминает связь между формой и веществом, которая занимает в философии Аристотеля центральное место.

Вместе с тем мы подошли ко второму вопросу: почему существуют именно эти и нет никаких других элементарных частиц? Этот вопрос тождествен с вопросом о законе природы, который определяет свойства элементарных частиц; этот закон должен заключать третью естественную единицу меры, так называемую «наименьшую длину». Поставленная проблема ни в коем случае не решена, однако на дискуссию выдвинут эскиз теории, которая исследованиями ближайших лет должна быть проверена и развита.

Сначала надо сказать об успехах предшествующих лет. Примерно 15 лет назад Дирак в Англии указал на возможность преодоления математических затруднений «расходимостей» в квантовой теории поля, о которых было уже коротко упомянуто, путем введения в математическое представление новой мнимой единицы, квадратного корня из -1 или, говоря более точным математическим языком, — преодоления с тем, чтобы гильбертову пространству квантовой теории поля дать неопределенную метрику. Разумеется, подобное введение означает глубокое изменение структуры теории, и короткое время спустя Паули в Цюрихе мог показать, что подобную теорию невозможно физически интерпретировать. Ибо величины, которые в теории квантов означают вероятности определенного

события, могут в формулировке Дирака стать отрицательными, а отрицательная вероятность есть понятие физически бессмысленное. Несмотря на это, мы в Геттингене около 5 лет назад вновь вернулись к этой идее Дирака в надежде, что математический формализм можно будет развить следующим образом: основное уравнение материи, как уже неоднократно подчеркивалось, должно содержать единицу меры, которая вводится в виде длины порядка 10^{-13} см. Нельзя ли использовать неопределенную метрику таким образом, чтобы отрицательные вероятности появлялись только тогда, когда будет возникать вопрос о физическом поведении в пространстве порядка 10^{-13} см? Но что касается вопросов, относящихся к гораздо большим пространствам и временам, то все вычисляемые вероятности станут снова положительными, так что формулы будут допускать физическую интерпретацию. Тем самым трудности будут устранены, ибо о процессах в малейших пространственных областях вообще нельзя спрашивать. Под этим мы разумеем следующее: процессы в малейших пространственно-временных областях непосредственно недоступны наблюдению и выводы из наблюдений относительно этих процессов уже не могут быть сделаны с помощью понятий обычной физики. Тем самым такие процессы недоступны для наглядного описания вообще. Эта возможность была изучена затем во всех деталях на упрощенной модели—упомяну здесь об исследованиях Миттера, Кортера и Асколи в Геттингене. При этом оказалось, что подобное использование предложения Дирака в простейшем случае, который математически может быть полностью проанализирован, на самом деле возможно без противоречий. При этих исследованиях оказалось, что уже подобная упрощенная модель обнаруживает весьма существенные черты единой теории поля, которая и была целью исследования. Например, электромагнитные поля получились как следствия полей материи, а поле материи обнаружилось в элементарных частицах свойства, сходные с теми, которые наблюдаются на самом деле.

Существенный вклад в разрешение проблемы материи был внесен открытием двух китайских физиков Ли и Янга, согласно которому электромагнитные поля совершенно неожиданным образом связаны со «спиральностью», присущей элементарным частицам. Например, существуют положительно заряженные так называемые π -мезоны, которые радиоактивно распадаются. Возникающие при распаде μ -мезоны, электроны и нейтрино обнаруживают определенную поляризацию, которая по своему направлению вращения соответствует, скажем, правому винту. Не существует положительно заряженных π -мезонов, при распаде которых обнаруживалось обратное направление винта. Но существуют отрицательные π -мезоны той же массы, при распаде которых определенно обнаруживается обратная спиральность поляризации. Таким образом, путем отражения из частицы возникает так называемая «античастица», которая несет противоположный заряд. Это открытие имело исключительно интересные следствия для понимания элементарной частицы, существование которой уже давно было предсказано Паули в результате анализа β -распада элементов—нейтрино. При изучении этих следствий Паули в прошлом году натолкнулся на особое трансформационное свойство,—на незамеченную раньше симметрию волнового уравнения нейтрино. Принимая во внимание, что, как уже было подчеркнуто при описании платоновых тел, математические симметрии в теории элементарных частиц играют особенно важную роль, можно было быть готовым к тому, что именно названная симметрия, быть может, имеет значение, выходящее за специальные пределы уравнения нейтрино.

Эмпирический материал, относящийся к элементарным частицам, который был накоплен в предшествующие 20 лет, обнаруживает свойства

симметрии, хотя и косвенным образом, там, где он дает нам так называемые «правила отбора и законы сохранения». Под этим разумеется следующее: если мы из опыта знаем, какие частицы могут радиоактивно превращаться в какие другие частицы, то отсюда можно делать заключения о свойствах симметрии частиц и лежащих в их основе законах. При попытке преобразовать развитую в Геттингене математическую модель теории так, чтобы она учитывала правила отбора, мы натолкнулись на уравнение, относительно которого Паули мог показать, что оно содержит также найденные Паули свойства симметрии. Далее, турецкий физик Гюрзей указал на то, что эта симметрия Паули, очевидно, передает свойство системы элементарных частиц, которое было установлено 25 лет назад и которое нашло математическое выражение в понятиях «изотопический спин» или «изоспин» (на пояснении этих понятий мы здесь останавливаться не будем*)).

Вместе с тем, можно было указать уравнение, которое, выражаясь осторожно, по крайней мере на первый взгляд выглядит так, как если бы оно представляло все известные нам свойства элементарных частиц, как если бы оно было правильным уравнением материи. Уравнение это гласит:

$$\gamma_\nu \frac{\partial}{\partial x_\nu} \psi \pm l^2 \gamma_\mu \gamma_5 \psi (\psi^* \gamma_\mu \gamma_5 \psi) = 0.$$

Здесь ψ (оператор поля, зависящий от координат и времени) означает материю; γ_μ — простые матрицы, введенные Дираком, l — естественная единица длины, о которой уже много раз шла речь. Причина, по которой скорость света и постоянная Планка видимым образом отсутствуют в этом уравнении, заключается просто в том, что обе эти величины уже использованы в качестве масштабных единиц, т. е. положены равными 1. Также и l , конечно, может быть использовано в качестве единицы меры и положено равным 1; тогда оно уже не будет фигурировать в уравнении.

Следует подчеркнуть, что в этом уравнении речь идет о предложении и только далеко не простой математический анализ его следствий по сравнению с экспериментальными результатами через несколько лет позволит сделать надежное заключение, как далеко можно пойти с этим уравнением.

В настоящий момент быть может важнее исследовать возможности мышления, которые, опираясь на открытие Планка, через описанное выше развитие привело к успехам последних лет. Как будет выглядеть физика, если надежды физиков в этом пункте оправдаются? Упомянутое уравнение содержит, кроме трех естественных единиц меры, еще только математические требования симметрии. Этими требованиями, по-видимому, определяется все дальнейшее. Можно, собственно говоря, уравнение рассматривать как особенно простое следствие требований симметрии, а эти требования считать истинным зерном теории. Подобно тому, как это имело место в философии Платона, дело выглядит так, как если бы в основе нашего кажущимся образом столь сложного мира из элементарных частиц и силовых полей лежит простая и прозрачная математическая структура. Все же соотношения, которые мы знаем как законы природы в различных областях физики, должны выводиться из этой единой структуры.

В этом месте, конечно, современное представление включает ту степень строгости, которая была совершенно чужда греческой философии и, во избежание недоразумений, следует подчеркнуть существенное отличие

*) Об изотопическом спине и его роли в теории элементарных частиц см. в статье М. Гелл-Мана и Е. Розенбаума (УФН, в. 4, 407 (1958)). *Ред.*

современного естествознания от античного. Прежде всего имеется существенное отличие в методе,—именно в том, что мы ставим систематические эксперименты и теорию принимаем только тогда, когда она представляет эти эксперименты во всех деталях. Далее, имеется очень важное отличие в роли, которую играет понятие времени в физике со времен Ньютона и Галилея.

Элементарные частицы философии Платона приобретали свою симметрию из так называемой «пространственной группы»—группы вращений в трехмерном пространстве. Там речь шла, следовательно, о статической, непосредственно наглядной симметрии. Современная физика с самого начала включает время в рассмотрение природы. Со времен Ньютона физика направлена на динамику явлений. Она исходит из того, что в этом непрерывно меняющемся мире неизменными могут быть не геометрические формы, но законы. Но законы, по существу, являются лишь абстрактными математическими формами, которые как раз и относятся к пространству и времени. Понимание материи представляется нам поэтому возможным лишь в том случае, когда на основе эксперимента заключают о математической структуре, которая одинаковым образом содержит пространство и время.

Окончательная теория материи будет, как и у Платона, характеризоваться рядом важных требований симметрии, которые мы уже сейчас можем указать. Эти симметрии уже нельзя представлять просто фигурами и картинками, как это можно было у платоновых тел. Но эти симметрии представляются уравнениями и я упомяну некоторые из простейших уравнений, хотя, конечно, подобное изложение понятно лишь математикам.

Первое решающее свойство симметрии представляется так называемой «неоднородной группой Лоренца», которая, как вы знаете, образует основу теории относительности. В несколько упрощенном виде она такова

$$x' - x_0 = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

$$t' - t_0 = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Вторая, столь же важная группа есть группа преобразований в гильбертовом пространстве, которая оставляет инвариантными перестановочные соотношения. Эта группа образует основу теории квантов. Также в несколько упрощенном виде она гласит:

$$\langle \Psi_i | = S_{ik} \Psi_k.$$

Далее имеется так называемая «группа изоспина» и связанная с сохранением числа барионов группа, которая, как мы предполагаем согласно исследованиям Паули и Гюрзея, представляется преобразованиями Паули:

$$\psi' = a\psi + b\gamma_5 C^{-1}\psi^*$$

$$(|a|^2 + |b|^2 = 1)$$

и

$$\psi' = e^{i\alpha\gamma_5}\psi.$$

Наконец, существуют еще важные зеркальные симметрии, например инвариантность теории при изменении знака времени и при одновременном пространственном отражении и обращении знака заряда. Все эти симмет-

рии представляются указанным ранее уравнением — в правильной ли форме, покажет будущее.

Теория, которая с помощью одного простого уравнения правильно дает массы и свойства элементарных частиц, есть вместе с тем единая теория поля. Установленный экспериментом факт, что все элементарные частицы могут превращаться друг в друга, указывает на то, что едва ли можно было бы выделить какую-нибудь одну определенную группу элементарных частиц и найти для этой группы математическое представление. Благодаря этому основанному на опыте обстоятельству и вследствие фундаментального значения свойств симметрии всякая попытка построения теории элементарных частиц, например заключающаяся в приведенном выше уравнении, имеет своеобразный характер замкнутости. Речь идет о структурах, которые настолько между собой связаны, что уже ни в каком месте нельзя сделать изменения, чтобы не поставить все соотношения под сомнение.

Это напоминает искусный орнамент арабских мечетей, в котором одновременно осуществлено столько симметрии, что нельзя было нарушить ни единый листок, не разрушая решительно связь целого. И подобно тому как эти орнаменты выражают дух религии, из которой они возникли, также и в свойствах симметрии квантовой теории поля отражается дух естественно-научной эпохи, которая была начата открытием Планка.

Но сейчас мы стоим в середине этого развития, результаты которого можно будет увидеть лишь через несколько лет. Открытие Планка в течение полустолетия, отдельные этапы которого я пытался вам представить, доведено до такого места, откуда уже отчетливо видны очертания цели — понять атомарную структуру материи на основе простых математических свойств симметрии. Если даже подойти к развитию последних лет, о котором я говорил, с максимальным скепсисом — что является высшим долгом естествоиспытателя, — то все же можно считать, что удалось натолкнуться на структуры необычайной простоты, замкнутости и красоты, — структуры, которые нам представляются особенно важными потому, что они касаются не только специальной области физики, но и всего мира.
