

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Институт философии

*ФИЛОСОФСКИЕ
ВОПРОСЫ
КВАНТОВОЙ
ФИЗИКИ*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1970

В книге рассмотрены актуальные философские проблемы квантовой физики: субъект и объект в квантовой физике, концепция дополнительности, детерминизм, природа статистических законов квантовой теории, а также принципы симметрии и сохранения, структурность и пространственно-временные представления в физике.

Редакционная коллегия:

*Л. Г. АНТИПЕНКО, В. С. БАРАШЕНКОВ,
М. Э. ОМЕЛЬЯНОВСКИЙ (ответственный редактор),
Ю. В. САЧКОВ, Г. А. СВЕЧНИКОВ*

ПРЕДИСЛОВИЕ

В декабре 1966 г. состоялась научная конференция в г. Дубне, посвященная 40-летию со времени возникновения квантовой механики. В ее работе приняли участие многие сотрудники Объединенного института ядерных исследований, Института философии АН СССР, ряд научных работников исследовательских учреждений и преподавателей вузов Москвы, Ленинграда, Новосибирска, Киева, Харькова и других городов страны. В докладах и сообщениях, представленных участниками конференции, освещались вопросы исторических путей возникновения и становления квантовой механики, а также общие методологические и философские проблемы дальнейшего развития квантовой физики.

Данная книга включает в себя обработанные авторами тексты основных докладов и выступлений на конференции. Среди разнообразия высказанных точек зрения по многим вопросам физической теории, которые нашли отражение в статьях настоящего сборника, некоторые заведомо носят дискуссионный характер. С конечными выводами отдельных работ редакционная коллегия согласиться не может. В качестве примера можно назвать статью И. С. Алексеева «Пространство и квантовая механика», в которой он, анализируя сравнительно част-

ную специфику свойств квантовых объектов, приходит к отрицанию пространственной формы их существования.

Однако при всей спорности отдельных положений редколлегия считает полезным опубликование всех работ, отвечающих оптимальным требованиям научной публикации, выражая тем самым надежду, что «парадоксальная» постановка некоторых вопросов поможет более четкому выявлению тех проблем, которые диктуются логикой самой природы исследуемых объектов.

По просьбе самих авторов в книгу не были включены доклад члена-корреспондента АН СССР Д. И. Блохинцева «О сущности редукции волновых пакетов» и сообщение проф. В. И. Свидерского о значении пространственно-временных представлений для дальнейшего развития современной физики, так как эти работы вошли в другие издания. В частности, с соображениями, изложенными в докладе Блохинцева, читатель может познакомиться в его книге «Принципиальные вопросы квантовой механики» (М., 1966).

Раздел первый

ИСТОРИЯ. ОБЩЕМЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Я. Г. Дорфман

РОЖДЕНИЕ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

1

Возникновение квантовой механики знаменует собою великий исторический переворот не только в физике, но и во всем современном естествознании.

На протяжении многих веков в научном мышлении господствовал принцип экстраполяции от мира макропроцессов, воспринимаемых нашими органами чувств, в мир скрытых от нас, невидимых внутренних микропроцессов; из области тел, доступных нашим непосредственным восприятиям, в область неощутимых субмикроскопических частичек. Успехи классической механики представлялись наглядным подтверждением справедливости схемы экстраполяции от механики материальных тел к механике материальной точки. Ученые XVII и XVIII вв. нередко аппроксимировали воображаемый атом материальной точкой, а порою даже отождествляли их. Принципом экстраполяции руководствовались и творцы классической молекулярно-кинетической теории XIX в., подчиняя атомы и молекулы законам классической механики. А когда в начале XX в. было вскрыто сложное строение атомов, то экстраполяция по существу опустилась на субатомный уровень, но самый принцип экстраполяции продолжал признаваться естественным и незбылемым.

Возникновение квантовой механики явилось результатом вынужденного признания неприменимости макро-

механики тел к атомным и субатомным частицам. Оно знаменовало собою крушение общепризнанного принципа экстраполяции и потребовало от физиков полной перестройки их научного мышления.

Этот переворот происходил на глазах людей моего поколения. Ему посвящено немало обзоров и у нас, и за рубежом [1—8]. Излагая кратко историю создания квантовой механики, я выступаю поэтому не только как историограф, но и как очевидец. Перечитывая оригинальные работы того времени, я невольно вспоминаю некоторые впечатления, которые они вызывали у нас тогда, а также и некоторые наши дискуссии. И я позволю себе здесь поделиться отдельными воспоминаниями.

2

Знакомясь с новейшими обзорами истории зарождения квантовой механики, я был особенно удивлен статьей известного немецкого теоретика Ф. Хунда [8]. В отличие от других авторов юбилейных статей, Ф. Хунд поставил себе целью выяснить, в какой степени путь исторического развития квантовой механики был обусловлен «логической последовательностью», а в какой степени, как он выражается, «случайностью». Автор мотивирует постановку этого вопроса слишком долгим, по его мнению, сроком, протекшим с момента открытия квантов (1900 г.) до оформления квантовой механики (1925 г.). Но такая постановка вопроса представляется мне формальной и антиисторической. Хунд предполагает, что путь последовательного, строго логического развертывания теории должен был бы совпадать с историческим. Это было бы, по мнению Хунда, закономерным, а все происходившие в действительности зигзагообразные искания и блуждания в области физических идей — это, с его точки зрения, только случайные флуктуации, только несчастные случаи. Вывод окончательного уравнения осуществлялся (по его мнению) столь медленно лишь потому, что кто-то случайно чего-то не додумал, кто-то случайно чего-то недосмотрел и т. д. и т. п.

Но Ф. Хунд не замечает некоторых существенно важных обстоятельств. Он **смешивает** формальную логику математического вывода формул с логикой научного от-

крытия. История открытий показывает, что система принципиально новых концепций всегда бывает отделена от системы старых концепций трудно преодолимым логическим «потенциальным барьером». Само открытие новой системы концепций совершается обычно отдельными учеными с помощью интуитивного процесса, т. е. посредством своеобразного «туннельного перехода» сквозь этот барьер без последовательного преодоления его вершины. История любого научного открытия включает в себе, таким образом, с одной стороны, историю одного или нескольких интуитивных этапов открытия, осуществляемых лишь отдельными исследователями, а с другой стороны, историю этапов последующего подтягивания всей науки в целом через крутой «перевал» логического барьера. Вероятность появления интуитивных открытий должна быть в первом приближении пропорциональна числу ученых, занимающихся данной областью проблем. Но ведь в эпоху 20-х годов нашего века число физиков-теоретиков в мире было в сотни раз меньше, чем в настоящее время. Поэтому тогдашняя медлительность развертывания квантовой теории, по сравнению с темпами развития теоретической физики 60-х годов XX столетия, является далеко не случайной, а, напротив, вполне закономерной для своей эпохи. Разве можно считать случайностью, например, тот исторический факт, что от открытия первого эмпирического закона обращения планет И. Кеплером (около 1609 г.) до формулировки Ньютоном основного дифференциального уравнения классической механики (около 1687 г.) прошло примерно 80 лет? Нет, это далеко не случайность — это результат крайней малочисленности научных кадров, отсутствия научных коллективов, это следствие всей обстановки в науке и жизни XVII века.

3

Для понимания процесса развития идей квантовой механики необходимо иметь в виду, что когда в 1913 г. появилась модель водородного атома Н. Бора [9, стр. 1], то большинство физиков приняли ее как новое подтверждение вышеупомянутого принципа экстраполяции классической механики к атомным системам. Они даже не были чересчур «шокированы» парадоксальными кванто-

выми условиями Бора, рассматривая их лишь как некое уточнение электродинамики электрона в атоме. Прежде всего зачаровывала удивительная аналогия между атомом и солнечной системой. Недаром модель Бора — Резерфорда многими называлась «планетарной».

Впрочем, Н. Бор с самого начала подчеркивал, что эта аналогия только кажущаяся. «Полагая в основу закон $h\nu = E' - E''$, — писал он, — мы заключаем, что спектры не дают нам картины движения частиц в атоме» [9, стр. 476].

На протяжении последующих нескольких лет эта модель получила блестящее подтверждение благодаря работам А. Зоммерфельда, П. С. Эпштейна и других. Тем не менее в 1918 г. в своей капитальной работе «Квантовая теория линейчатых спектров» Н. Бор писал: «Несмотря на большой прогресс, достигнутый в этих исследованиях, многие трудности фундаментального характера остались неразрешенными не только в отношении ограниченности применения методов, использованных для расчета частот спектра данной системы, но особенно в отношении вопроса о поляризации и интенсивности испускаемых линий спектра. Эти трудности тесно связаны с радикальным отступлением от обычных идей механики и электродинамики, заключенным в основных принципах квантовой теории... Мы должны принять, что обычные законы электродинамики и механики неприменимы к этим состояниям (атома) без радикальных изменений» [10]. Таким образом, Бор настойчиво подчеркивал те особенности внутриатомной физики, которые отличали ее от макроскопической физики. Лишь постольку, поскольку электродинамические силы, связанные с испусканием излучения, в каждый данный момент крайне малы сравнительно с кулоновскими силами, Бор допускал возможность вычисления движения электронов в стационарных состояниях «как движения материальных точек согласно обычной механике». И он попутно подчеркнул, что уже теория теплового излучения Планка лишена внутренней последовательности.

Существенный вклад внес в 1917 г. А. Эйнштейн [11], впервые показавший, что квантовые постулаты Бора приводят к планковой формуле излучения, если предположить, что вероятность испускания и поглощения излучения соответствующей частоты (при переходе квантовой

системы из одного стационарного состояния в другое) определяется по аналогии с классической электродинамикой системы частиц, совершающих гармонические колебания с той же частотой. В этой же теории Эйнштейн, как известно, впервые рассмотрел не только спонтанные, но и индуцированные переходы. В процессе ее разработки Эйнштейн был вынужден ввести постоянные коэффициенты, характеризующие априорную вероятность отдельных состояний, не делая никаких предположений об условиях, определяющих появление этих вероятностей. Таким образом, в теории Эйнштейна появился статистический аспект принципиально иного характера, чем это знала классическая статистическая физика. Используя далее больцманово соотношение между энтропией и вероятностью, а также закон смещения Вина, А. Эйнштейн получил для излучения формулу, практически совпадающую с формулой Планка. Бор увидел в этом результате веское подтверждение своей точки зрения, приведшей его к принципу соответствия.

Второй существенный вклад внес в 1914—1917 гг. П. С. Эренфест [12], показавший, что расчет движения частиц в атоме может быть приближенно выполнен с помощью классической механики не только в случае неизменных внешних условий, но и в случае их медленного «адиабатического» изменения. Этот принцип, названный Бором принципом «механической трансформируемости» (*mechanical transformability*), позволял механически связать между собою два стационарных состояния, хотя самый переход между ними имеет существенно квантовый характер. Эренфест показал, что величины априорных вероятностей должны оставаться неизменными в процессе перехода.

Опираясь на все эти соображения, Бор дал в 1918 г. развернутую теорию принципа соответствия, хотя он никак не упускал из виду ограниченности этого принципа. Характерно, что в этой теории Бор не пользовался модельным представлением об электронных орбитах, а, напротив, рассматривал любую атомную систему лишь как «некоторое число заряженных частиц, движущихся в силовом поле, имеющем в данном приближении потенциал, зависящий только от положения этих частиц» [10].

В течение последующих лет разработка этих вопросов велась в двух направлениях.

С одной стороны, Бором, Крамерсом и др. последовательно углублялась теория электронных орбит в атоме водорода и развивалась теория движения валентного электрона в атомах, обнаруживающих водородоподобный спектр. В 1923 г. Бор намечает теорию электронного строения всех элементов периодической системы, исходя из модели последовательного захвата электронов полем ядра [13]. Опираясь на анализ оптических и рентгеновских спектров, он строит оболочечную модель атома, впрочем, снова и снова оговаривая ее условность.

В то же время Крамерс и Гейзенберг, основываясь на принципе соответствия Бора и на теории спонтанного и индуцированного излучения Эйнштейна, предпринимают попытку разработки теории дисперсии. Незадолго до этого Крамерс [14] ввел новое представление о так называемых «виртуальных вибраторах». В предшествующих теоретических работах по дисперсии всегда рассматривались только частоты поглощения, возможные для основного состояния атома. Крамерс впервые включил в исследование атома любые возбужденные его состояния. Исходя из принципа соответствия, он при этом обосновал представление, согласно которому в формуле дисперсии должны быть приняты во внимание все возможные «виртуальные» частоты испускания, т. е. все разности энергий $E_k - E_j$, для которых $E_j < E_k$.

Гейзенберг и Крамерс [15] предприняли затем исследование возмущения атомных систем, вызываемого полем излучения. Как указывал впоследствии Бор, авторы «смутно надеялись, что, соединяя эффекты дисперсии с эффектами возмущения, они сумеют постепенно прийти к такой перестройке теории, при которой шаг за шагом можно будет исключить неприемлемое применение классических представлений» [4]. Дисперсионная теория Гейзенберга и Крамерса [15], широко используя представление о виртуальных вибраторах, действительно вплотную подошла к открытию квантовой механики.

В то время как, с одной стороны, продолжала успешно развиваться теория линейчатых спектров, а с другой, вырастала новая теория дисперсии, произошло событие, заставившее физиков обратить особое внимание на проблему, поднятую еще в 1905 г. Эйнштейном,— проблему корпускулярной природы фотонов. Я говорю об открытии в 1923 г. эффекта Комптона [16]. Это событие вызвало разнообразные отклики.

В том же 1923 г. в Лондонском Королевском обществе выступил с докладом Г. А. Лоренц [17], в котором он прежде всего напомнил о переплетении корпускулярных и волновых представлений о природе света в трудах Ньютона. Далее Лоренц указал на то, что применение релятивистской механики к движению корпускул в сочетании с волновыми представлениями могло бы разрешить противоречия, которые неоднократно встречались на путях развития теории света. Впрочем, Лоренц подчеркнул при этом, что некоторые противоречия все же остаются неразрешенными. В числе этих противоречий он особо выделил вопрос об интерференции света при больших разностях хода, достигающих миллионов длин волн, т. е. ~ 50 см. Г. А. Лоренц указал, что в этом случае линейные размеры фотона должны иметь тот же порядок величины и, значит, такой фотон-гигант не может даже проникнуть в глаз. Между тем он должен быть достаточно малым, чтобы поглощаться единичным электроном. И Лоренц сделал следующий вывод: «Нельзя думать, что решение будет найдено в некоторой счастливой комбинации протяженных волн и концентрированных квантов, причем волны будут ответственны за интерференцию, а кванты — за фотоэлектричество». Лоренц приходил этим путем к заключению, что механическое сочетание волн и корпускул для объяснения природы света принципиально непригодно.

Я припоминаю, как в 1924 г. в ленинградском Физико-техническом институте А. Ф. Иоффе и Н. И. Добронравов осуществили замечательный эксперимент, смысл которого описан А. Ф. Иоффе в следующих словах: «Пусть какой-нибудь источник испускает некоторое время энергию в виде волн, каждый раз передавая им энергию U ; волны эти расходятся от источника во все

стороны. Если мы будем наблюдать на некотором расстоянии проходящие мимо нас волны, то можем обнаружить ту часть волны, которая проходит через данный участок, где находится измеряющий прибор (например, выбрасываемый светом электрон). Из энергии U одновременно расходящихся по всем направлениям волн мы ожидали бы получить в данном направлении только небольшую часть. Остальная часть энергии и должна была бы разойтись по всем другим направлениям от источника» [18]. Опыт этот, блестяще задуманный А. Ф. Иоффе и виртуозно осуществленный Н. И. Добронравовым, не подтвердил столь упрощенного представления о природе света. Но проблема эта волновала в те годы каждого физика, и любая попытка ее решения осторожно рассматривалась и проверялась.

Попытку решения данной проблемы сделал тогда, например, американский физик Дюэн [19], предположивший, что свет состоит из фотонов, которые, однако, могут передавать дифракционной решетке лишь импульсы, определяемые квантовой теорией, вследствие чего закон рассеяния квантов совпадает с законом дифракции волн. Несмотря на свою крайнюю ограниченность, теория эта была тщательно проанализирована П. С. Эренфестом и П. С. Эпштейном [20] и признана допустимой по крайней мере для случая конечной решетки. Теория Дюэна позволяла также ожидать дифракции микрочастиц. Но она не содержала в себе никаких новых путей для истолкования свойств атомных систем. И потому она, естественно, канула в Лету.

6

Первая попытка синтеза корпускулярной и волновой теорий света была предпринята в 1923—1924 гг. Луи де Бройлем. Новым в работе де Бройля было использование оптико-механической аналогии Гамильтона. Он показал, что принцип Гамильтона — Мопертюи и принцип Ферма совпадают, когда фазовая скорость распространения волны вдоль луча u и скорость движения частицы v связаны соотношением $u \cdot v = c^2$. Де Бройль выдвинул идею о необходимости создания новой квантовой динамики материальной точки, формулируя эту идею

следующим образом: «Новая динамика свободной материальной точки есть по отношению к прежней динамике (включая динамику Эйнштейна) то же, что волновая оптика по отношению к геометрической» [21].

Несмотря на то, что де Бройль правильно сформулировал основную идею волновой механики, привести ее в стройную физическую теорию ему не удалось. Дело в том, что правильно сопоставив частицам волны материи, де Бройль все же продолжал мыслить в рамках механических моделей. В своей теории он тщетно старался каким-то образом найти место частицы в волне и искал по существу уравнение движения частицы.

Вместе с тем интересно отметить, что блестяще написанная работа де Бройля была в то время с интересом прочитана большинством из нас, но многим показалась фантастической. Любопытно, что хотя де Бройль уже в этой работе 1924 г. предсказал явление дифракции электронов, это как-то прошло незамеченным. В 1925 г. явление дифракции было вновь независимо предсказано Эйнштейном для атомов и молекул [22]. Но и это замечание не привлекло к себе особого внимания.

В декабре 1925 г. мне довелось побывать совместно с А. Ф. Иоффе в лаборатории Дэвиссона и Джермера в США. Они показывали нам свою очень изящную экспериментальную установку и еще неопубликованные удивительные результаты опытов по рассеянию электронов от поверхности металлического кристалла. Они задавали недоуменный вопрос: как объяснить эти странные графики? Но ни им самим, ни нам, ни кому-либо из присутствовавших тут же американских физиков не приходило тогда в голову, что открыто явление дифракции электронов. И только в 1927 г. Дэвиссон и Джермер смогли дать правильное истолкование этим новым опытным фактам, открытым ими еще в 1925 г., и, усовершенствовав установку, подтвердили предсказания теории в полной мере [23].

Во всех книгах обычно утверждается, что Дэвиссон и Джермер предприняли свое экспериментальное исследование для проверки теории де Бройля. Небезынтересно попутно вспомнить об одной беспрецедентной научной «панаме», разыгравшейся в те годы. Уже начиная с 1926 г. в физических журналах стали почти ежемесячно появляться все новые и новые экспериментальные

работы немецкого физика А. Руппа, изумлявшие своей виртуозностью, в которых блестяще подтверждались все теоретические предвидения о волновых свойствах микро-частиц. Быстрота и качество выполнения столь трудных экспериментальных исследований вскоре стали вызывать и у нас, и у зарубежных ученых смутные подозрения¹.

В середине 30-х годов Рупп был разоблачен В. Герлахом как мошенник. В «Zeitschrift für Physik» было опубликовано покаянное письмо самого Руппа, в котором он сообщал, что почти все эти работы им вообще никогда не ставились, но что он о них сообщал в состоянии... психостении. Любопытно, что все его сенсационные «исследования» исходили из берлинской промышленной лаборатории «Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft», которая поспешила отмежеваться от работ своего сотрудника. К сожалению, эти мнимые работы Руппа порою цитируются в современных монографиях.

7

В то время как изящный и наглядный путь, которым пошел де Бройль, не оправдал возлагавшихся на него надежд, значительных успехов удалось достигнуть В. Гейзенбергу, попытавшемуся продвинуться вперед с помощью принципа соответствия.

В 1925 г. появилась известная работа Гейзенберга «О квантово-теоретическом преобразовании кинетических и механических соотношений». Автор подчеркивает, что «трудности, встретившиеся на пути развития квантовой теории, зачастую неправильно называют отклонениями от классической механики... Частотное условие Бора — Эйнштейна ($W = h\nu$), — говорит Гейзенберг, — представляет собою с точки зрения классической механики, вернее, с точки зрения волновой теории, такой отказ от кинематики, лежащей в ее основе, что даже в самых простых квантово-теоретических задачах нельзя и думать о справедливости классической механики. Поэтому надо с самого начала полностью отказаться от надежды на наблюдение ненаблюдаемых величин и по-

В 1929 г. В. Герлах мне лично говорил, что он твердо убежден, что работы Руппа являются попросту надувательством.

лагать, что согласие с опытом расчетов, основанных на квантовых правилах, является попросту случайным... Нельзя приписать электрону точку в пространстве в функции времени посредством наблюдаемых величин», — решительно заявил Гейзенберг [24]. Иными словами, Гейзенберг попытался построить феноменологическую теорию, исключив из рассмотрения как «непосредственно ненаблюдаемые» все те величины, которые характеризуют кинематику электрона в атоме. Он взял за исходные величины только частоты спектральных линий, испускаемых электроном при переходах между стационарными энергетическими уровнями. Эти частоты представляют двухмерное счетное многообразие, которое Гейзенберг записал в виде матрицы. Так было заложено основание «матричной механики».

Разумеется, каждому, кто читал вышеприведенные слова Гейзенберга, должно было броситься в глаза, что «непосредственно ненаблюдаемой» величиной являлось не только местоположение и траектория электрона внутри атома, но и вообще сам атом. Поэтому рассуждение о наблюдаемых и ненаблюдаемых величинах, предпосланное изложению «матричной механики», не могло служить сколько-нибудь убедительной аргументацией для интуитивно открытого Гейзенбергом нового формального метода расчета. В этом методе «наблюдаемые» величины, характеризующие стационарные состояния и переходы между стационарными состояниями, связываются с величинами, характеризующими излучение, посредством аппарата принципа соответствия.

Самому Гейзенбергу не удалось сразу построить формальный аппарат матричной механики, он только наметил его. Фактически это было осуществлено Борном и Иорданом [25] совместно с Гейзенбергом [26].

Интересно отметить, что этот математический аппарат был в то время настолько чужд и малоизвестен физикам, что Борну и Иордану пришлось предпослать своей статье [25] краткое изложение теории матриц.

Впоследствии Н. Бор в одной из своих статей [4] вспоминал сокрушенные слова юного Гейзенберга, сказанные им во время разработки основ матричной механики: «Ученые геттингенские математики говорят так много об эрмитовых матрицах, а я даже не знаю, что такое — матрица!».

Расчеты отдельных конкретных задач, осуществленные Борном и Иорданом с помощью вновь созданной матричной механики Гейзенберга, оказались в превосходном согласии с экспериментальными данными, наметив тем самым огромные перспективы новой теории.

8

В 1926 г. Э. Шредингер опубликовал результаты своего исследования [27], к которым он пришел, идя путем, существенно отличным от пути Гейзенберга. Эта работа сразу же приковала к себе всеобщее внимание. Как отмечает сам Шредингер, толчком к его исследованию послужила волновая механика де Бройля. Но в отличие от последнего, он попытался решить задачу движения частицы, рассматривая ее как волновой пакет. Подобно де Бройлю Шредингер опирался на оптико-механическую аналогию. Но если на первом этапе и самому Шредингеру, и его читателям казалось, что речь идет в некоторой степени о наглядной картине движения частиц и волновых пакетов, то в процессе дальнейшей разработки теории и появления в печати последующих частей этой работы стало ясно, что теория трактует о волнах в конфигурационном пространстве и, следовательно, возврат к старым наглядным представлениям не имеет ничего общего с этой теорией.

Существенным и важным было то, что квазиволновая теория Шредингера и матричная теория Гейзенберга приводили при расчетах к идентичным результатам. Вскоре было показано, что обе теории представляют собою лишь два аспекта одной и той же квантовой механики.

Но теперь, когда математический аппарат квантовой механики был уже построен, приобретал актуальное значение вопрос о ее физической интерпретации и, в частности, о физическом смысле шредингеровской ψ -функции.

Борн в 1927 г. положил начало статистическому истолкованию квантовой механики [28]. Он показал, что если рассматривать микрочастицы с корпускулярной точки зрения, то квадрату ψ -функции надо приписать смысл плотности вероятности.

Эта трактовка квантовой механики получила в 1927 г. значительное подкрепление в работе Гейзенберга [29], в которой было выведено и обосновано известное «соотношение неточностей», названное впоследствии «принципом неопределенности». Фактически из соотношения неточностей следует, что микрочастицы не являются ни дискретными корпускулами, ни волнами, ни комбинацией того и другого, но представляют собою материальные объекты особого рода, не имеющие себе аналогов в макромире. Их движение можно аппроксимировать перемещением корпускул лишь при условии отказа от применения к ним лапласовского детерминизма.

В вышеупомянутой работе 1927 г., опубликованной под заглавием «О наглядном содержании квантово-теоретической кинематики и механики», Гейзенберг писал: «Мы только тогда полагаем, что наглядно поняли физическую теорию, когда мы можем во всех простых случаях качественно продумать экспериментальные следствия, вытекающие из данной теории; но мы должны при этом одновременно установить, что применение этой теории нигде не содержит противоречий». Статистическая трактовка квантовой механики явилась одним из методов ее наглядного понимания. Но приписывая микрочастицам атрибуты корпускул, эта трактовка вынуждена была сделать их игрушкой неумолимого рока.

В те годы среди физиков шли дискуссии о том, какой аспект — волновой или корпускулярный — следует предпочесть, который из них лучше соответствует истинной природе микрочастиц. Дискуссии шли о том, как «наглядно» себе представить объединение обоих аспектов.

В связи с этими обсуждениями я неоднократно приводил рассказ, услышанный мною однажды от человека, попавшего в давние времена в Заполярье. Местные жители знали тогда из овощей одну картошку, а из ягод — одну лишь клюкву. И вот они обратились к приезжему с просьбой рассказать им, что собою представляет яблоко. «Яблоко подобно клюкве, но величиной оно с картошку», — ответил он им. И они были вполне удовлетворены этим ответом, вообразив, что теперь они могут себе «наглядно» представить яблоко.

Итак, попытаемся теперь сформулировать ответ на вопрос, на что же ушли двадцатилетние искания физиков, постепенно приведшие их от полуэмпирических квантовых постулатов к рождению квантовой механики.

Суть этих исканий заключалась, во-первых, в постепенном приспособлении мышления к новым парадоксальным опытным фактам; во-вторых, она заключалась в поисках путей, ведущих сквозь «потенциальный барьер», отделявший старую классическую систему концепций от новой квантовой системы концепций, и, в-третьих, она состояла в разработке адекватного математического аппарата теории.

И лишь тогда, когда все эти задачи были решены усилиями маленькой горсточки ученых, физика XX столетия в целом преодолела крутой «перевал» и пришла к грандиозным успехам наших дней, увлекая за собою все отрасли естествознания.

Если сравнить этот путь, так сказать, утробного развития квантовой механики с путем, проделанным когда-то классической механикой от эмпирических постулатов Кеплера до формулировки дифференциального уравнения Ньютона, то мы можем с известным удовлетворением констатировать, что квантовая механика прошла аналогичную стадию эволюции почти в четыре раза быстрее классической механики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Глебов. Из истории создания квантовой механики.— «Труды ИИЕТ», т. 28, 1959.
2. Р. Крониг. Переломные годы.— «Теоретическая физика 20-го века». М., 1962.
3. В. Гейзенберг. Воспоминания об эпохе развития квантовой механики.— Там же.
4. N. Bohr. Die Entstehung der Quantenmechanik.— «Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit». Braunschweig, 1961.
5. E. Hund. Göttingen, Kopenhagen, Leipzig und Rückblick.— Там же.
6. Л. де Бройль. Революция в физике (новая физика и кванты). М., 1965.
7. M. Jammer. The conceptual development of quantum mechanics. N. Y., 1966.
8. F. Hund.— «Physics Today», 19, 23, 1966.
9. N. Bohr.— «Phil. Mag.», 26, 1913.

- 10 *N. Bohr*. Det Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter. Nat. Math. Afd. 8, Rackke IV, 1, 2, 1918.
- 11 *A. Einstein*.—«Phys. Zs.», **XVIII**, 121, 1917.
- 12 *P. Ehrenfest*.—«Proc. Acad. Amsterdam», **XVI**, 591, 1914; «Phys. Zs.», **XV**, 657, 1914; «Ann. d. Phys.», **LI**, 327, 1916; «Phil. Mag.», **XXXIII**, 509, 1917.
- 13 *N. Bohr*.—«Zs. f. Phys.», **18**, 117, 1923.
- 14 *H. A. Kramers*.—«Zs. f. Phys.», **3**, 199, 1920.
- 15 *W. Heisenberg*, *H. A. Kramers*.—«Zs. f. Phys.», **31**, 681, 1925.
- 16 *A. H. Compton*, *A. Simon*.—«Phys. Rev.», **25**, 306, 1905.
- 17 *H. A. Lorentz*.—«Collected Papers», **8**, 1923.
- 18 *А. Ф. Иоффе*. Основные представления современной физики. М.—Л., 1949.
- 19 *W. Duane*.—«Proc. Nat. Acad.», **9**, 158, 1923.
- 20 *P. Ehrenfest*, *P. Epstein*.—«Proc. Nat. Acad.», **10**, 133, 1924.
- 21 *L. de Broglie*.—«Ann. de Phys.», **3**, 22, 1925.
- 22 *A. Einstein*.—«Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.», **23**, 334, 1925.
- 23 *C. Davisson*, *L. H. Germer*.—«Phys. Rev.», **30**, 705, 1927.
- 24 *W. Heisenberg*.—«Zs. f. Phys.», **33**, 879, 1925.
- 25 *M. Born*, *P. Jordan*.—«Zs. f. Phys.», **34**, 858, 1925.
- 26 *M. Born*; *W. Heisenberg*, *P. Jordan*.—«Zs. f. Phys.», **35**, 557, 1926.
- 27 *E. Schroedinger*.—«Ann. d. Phys.», **79**, 361, 489, 734; **80**, 437; **81**, 109, 1926.
- 28 *M. Born*.—«Zs. f. Phys.», **37**, 863; **38**, 803; 1926.
- 29 *W. Heisenberg*.—«Zs. f. Phys.», **43**, 172, 1927.

М. Э. Омельяновский

ИДЕИ ДИАЛЕКТИКИ В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ*

В квантовых воззрениях наиболее глубоко выражаются характерные черты современной физики, и дух диалектики в квантовой теории проявляет себя по-особому ярко. Уже в квантовой гипотезе Планка и фотонах Эйнштейна заключался зародыш диалектических противоречий, развитие которых привело к квантовой механике и квантовой теории поля наших дней. Часто утверждается, что Планк, пытаясь понять квантовые свойства излучения, не оставлял почвы классической физики, но гораздо реже обращают внимание на его мысли о корпускулярной и волновой гипотезах света, которые стоит здесь на-

* Многие положения настоящего доклада были уточнены и развиты в работах автора 1968—1969 гг. (см. его статьи в книгах: «Материалистическая диалектика и методы естественных наук». М., 1968; «Ленин и современное естествознание». М., 1969, и др.).

помнить. По словам Планка, эти гипотезы «противостоят друг другу, как два равных по силе борца... Каков будет исход этой борьбы, предсказать трудно. Но вероятней всего, что ни одна из этих двух гипотез не одержит окончательной победы; с какой-то более высокой точки зрения будут указаны как достоинства, так и односторонность каждой гипотезы» [1, стр. 54—55].

Об Эйнштейне также хорошо известно, что он рассматривал микрочастицы в аспектах представлений классической физики и отклонял взгляды Бора на квантовую механику. Вместе с тем — это существенно — Эйнштейн всегда отмечал фундаментальный характер для физики объединения корпускулярных и волновых идей.

Квантовая гипотеза Планка и фотоны Эйнштейна, модель атома Бора, «волны материи» Л. де Бройля, матричная и волновая механика, концепция дополнительности, идеи квантовой теории полей — все это вехи физического понимания движущейся материи, как обладающей одновременно корпускулярными (дискретными) и волновыми (непрерывными) свойствами.

О диалектике и ее необходимости в физике по-своему — прямо или в неявной форме — высказывались выдающиеся ученые нашего времени, критически относящиеся к претензиям позитивизма быть единственной философией науки. Бор, дискутируя с Эйнштейном о проблемах теории познания в атомной физике, писал о «глубоких истинах», представляющих «такие утверждения, что противоположные им утверждения содержат также глубокую истину» [2, стр. 93]. Подобных мыслей немало в работах Эйнштейна, Гейзенберга, Паули, Борна. Показательна в этом плане стихийная материалистическая и диалектическая позиция американского ученого Р. Фейнмана в его «Лекциях по физике»; она типична для большинства современных ученых в буржуазных странах с их критическим отношением к позитивизму.

Хорошо известно, какую большую работу ведут ученые Советского Союза и других социалистических стран по исследованию философских проблем современной физики. Достаточно здесь напомнить, что с позиции диалектического материализма дано истолкование теории относительности и квантовой механики, проанализированы существенные вопросы, относящиеся к логике научного познания, раскрыты несостоятельность позитивист-

ской и других идеалистических интерпретаций принципов современных физических теорий.

Хотелось бы подчеркнуть, что эта работа, если можно так выразиться,— не торжественное шествие по проспектам познания, а жестокая и упорная борьба с нашими идеологическими противниками.

Сейчас особенно усилились атаки недругов марксизма-ленинизма на диалектический материализм и его применение в естествознании. Все школы современной реакционной философии объединяют свои усилия против материализма и диалектики в естествознании.

Соответствующих фактов в этом отношении больше чем достаточно, но я не собираюсь на них останавливаться; хочу только обратить внимание на то, что все они на свой лад свидетельствуют о более и более крепнущей связи современного естествознания и материалистической диалектики.

Обратимся к некоторым проблемам нашей темы.

1. Дополнительность и диалектика

Открытия в явлениях атомного масштаба корпускулярных свойств света и волновых свойств вещества поставили задачу объединения корпускулярных и волновых представлений о веществе и поле применительно к атомным процессам. Решение этой задачи затруднялось, однако, потому, что с точки зрения классической физики объект в данном процессе не мог вести существование в виде частицы и одновременно волны; в «лучшем» случае в любом данном процессе волна и частица могли, так сказать, *сосуществовать*, представляясь в виде некоторой классической модели. Это затруднение, казалось, должна была преодолеть копенгагенская интерпретация квантовой механики.

Последний термин принадлежит Гейзенбергу. По его словам, копенгагенская интерпретация квантовой механики начинается с парадокса: принимается, что каждый эксперимент, безразлично, относится ли он к явлениям повседневной жизни или к атомным явлениям, должен описываться в понятиях классической физики, и вместе с тем признается, что применимость их ограничена соотношением неопределенностей [3, стр. 27]. Корпускуляр-

ная и волновая характеристики атомных объектов, разъясняет Гейзенберг далее идею дополнительности Бора, взаимоисключают одна другую, ибо определенная вещь не может быть одновременно частицей (т. е. субстанцией, ограниченной очень малым объемом) и волной (т. е. полем, распространяющимся в пространстве большого размера. Но обе характеристики дополняют друг друга.

Таким образом, копенгагенской интерпретации, по существу, необходимо было осмыслить диалектику атомных процессов, которая нашла выражение в открытии противоположных корпускулярных и волновых свойств атомных объектов.

Отметим два аспекта копенгагенской интерпретации. Первый из них, развиваемый Гейзенбергом, сводится к следующему. В классической физике в принципе возможно освободиться от влияния процесса измерения на объект; в квантовой механике такое освобождение в принципе невозможно, так как в ней имеется соотношение неопределенностей, которое обуславливает неточности в измерениях объекта (идея «принципиальной неконтролируемости»).

Второй аспект, разработанный Бором, можно изложить таким образом. Микрообъекты не могут рассматриваться ни как частицы, ни как волны в смысле классической физики. В одних экспериментальных условиях наиболее естественным является описание микрообъектов, исходя из корпускулярных представлений, в других — исходя из волновых представлений. Оба они находятся в дополнительном соотношении друг к другу, и это соотношение обеспечивает непротиворечивое применение классических понятий в области микроявлений.

Обычно полагают, что эти аспекты эквивалентны. Гейзенберг, например, охотно привлекает идею дополнительности в своих рассуждениях; также и Бор привлекал идею «неконтролируемого взаимодействия между объектом и прибором (см. его статью «О понятиях причинности и дополнительности» [4]). Все же эти аспекты не совпадают, что достаточно четко выявляется в последних работах Бора, особенно в его статье «Квантовая физика и философия» (1959) [5].

Прежде всего в аспекте копенгагенской интерпретации, разработанном Гейзенбергом, подчеркивается не столько та мысль, что микрообъектам нельзя приписы-

вать свойства и поведение макрообъектов, сколько говорится о «неточностях», связанных с применением к микрообъектам классических понятий. Этим «неточностям» и соответственно истолкованному соотношению неопределенностей приписывается несвойственное им фундаментальное значение в квантовой механике. В духе такого толкования и предлагает Гейзенберг решение парадокса, с которого — об этом шла речь выше — начинается копенгагенская интерпретация¹.

Почему классические понятия, посредством которых описываются эксперименты с атомными объектами, не точно соответствуют этим объектам? Ответ, по Гейзенбергу, состоит в том, что «наблюдение играет решающую роль в атомном событии и реальность различается в зависимости от того, наблюдаем ли мы ее или нет» [3, стр. 29].

Таким образом, Гейзенберг находит основание (принципиально) ограниченного применения классических понятий к микрообъектам, становясь на путь отрицания понятия объективной реальности. С этой точки зрения (если ее последовательно придерживаться) импульс или энергия, например, не столько свойственны объекту, сколько возникают в акте его наблюдения; математический аппарат квантовой механики имеет не объективный, а символический характер (нужный лишь для согласования показаний приборов); соотношение неопределенностей становится абсолютной границей человеческого познания и т. д.

Обратимся теперь к концепции дополнительности, которую мы изложим на основе последней работы Бора «Квантовая физика и философия». В этой работе отсутствует понятие «неконтролируемое взаимодействие». Термин «дополнительность», сохраненный Бором, обозначает своеобразное соотношение различных опытных данных об атомных объектах, полученных при помощи разных экспериментальных установок. Эти данные, указывает Бор, хотя кажутся противоречащими друг другу при попытке свести их в единую картину, на самом деле исчерпывают все, что мы можем узнать о предмете [8, стр. 40].

Описание атомных явлений, подчеркивает Бор, имеет «совершенно объективный характер в том смысле, что оно

Критический разбор трактовки соотношен неопределенностей
«неконтролируемости» см. [6—7].

обходится без явной ссылки на какого-либо индивидуального наблюдателя» [8, стр. 39]. Он утверждает также, что в квантовой механике мы имеем дело «не с ограничениями точности измерений, а с ограниченной применимостью пространственно-временных понятий и динамических законов сохранения».

В квантовой механике, пишет Бор, «слово «измерение» должно... употребляться в своем прямом смысле количественного сравнения (сравнения с эталоном)». Он высказывается против применения таких выражений, как «наблюдение возмущает явление» или «измерение создает физические атрибуты объектов» [8, стр. 41].

Подводя итог, Бор приходит к заключению: «... Более широкие рамки дополнительности отнюдь не означают произвольного отказа от идеала причинности. Понятие дополнительности непосредственно выражает наше положение в вопросе об отображении фундаментальных свойств материи, которые считались подлежащими классическому физическому описанию, но оказались вне пределов его применимости» [8, стр. 42].

Таким образом, в названной работе Бора явственно выражена материалистическая в своей основе и диалектическая позиция. Бор, связывая математический формализм квантовой механики с наглядными представлениями и классическими понятиями, раскрыл, как сказал бы философ, антитетику корпускулярных и волновых представлений.

Сопоставление этих представлений в некоторой антиномии всегда играло решающую роль в концепции дополнительности Бора; но в прежних его работах указанная антитетика была затемнена идеей «неконтролируемого взаимодействия», в работе же «Квантовая физика и философия» этот недостаток преодолен.

Серьезное философское значение идеи дополнительности для физической теории заключается в том, что согласно ей не только можно, но при определенных условиях даже необходимо применять противоположные понятия к одному и тому же предмету. Такое применение, как показал Бор (особенно в своих дискуссиях с Эйнштейном), не ведет ни к каким формальнологическим противоречиям в физической теории и позволяет истолковать математический аппарат квантовой механики в соответствии с экспериментальными данными.

В концепции дополнительности противоречие между корпускулярными и волновыми понятиями, однако, не столько разрешается, сколько как бы застывает в виде противоположности двух взаимно исключающих экспериментальных установок, с которыми связаны «дополнительные» явления. Хотя Бор (в работе «Квантовая физика и философия») говорит о том, что описание атомных явлений имеет совершенно объективный характер, он все же не рассматривает сами атомные объекты со стороны присущих им одновременно корпускулярных и волновых свойств. Из этой основной слабости концепции дополнительности вытекает и тот ее минус, что в ней изложение соответствующих вопросов концентрируется на истолковании ограниченности старых основных классических понятий, а не на новых основных понятиях (к которым принадлежат относительность к средствам наблюдения, различие между потенциально возможным и осуществившимся, понятие вероятности как меры потенциально возможного).

Копенгагенская интерпретация квантовой теории не является позитивистской. Это явствует из ее содержания, и об этом имеются высказывания Гейзенберга и М. Борна — выдающихся ее представителей. Они же утверждают также, что копенгагенская интерпретация не является ни материалистической и ни идеалистической, хотя философский язык этой интерпретации, по словам Гейзенберга, «включает в себя элементы всех трех систем мышления» [9, стр. 16].

Нельзя согласиться с Гейзенбергом и Борном, будто копенгагенская интерпретация образует своего рода новую философию, стоящую якобы над материализмом и идеализмом, без их «односторонности» и т. п. Разбор этого вопроса далеко выходит за рамки доклада; здесь отметим лишь следующее. Понятие дополнительности в применении к биологии, например, ничего существенно нового не прояснило. Такое применение направлено против сводимости биологических явлений к явлениям физическим и химическим, а также против идеи «жизненной силы». Разумеется, такая направленность концепции дополнительности имеет положительное философское значение, но соответствующие проблемы давно разрабатываются на более глубокой основе диалектическим материализмом. То же еще в большей мере необходимо

сказать и о применении понятия дополнительности к анализу социальных явлений.

Идея дополнительности не создает в своем развитии никакой особой или новой философии. Она имеет философское значение в плане атомной физики, и об этом шла речь выше.

2. Идея единства корпускулярных и волновых свойств материи

В основе идей Бора лежит по сути дела признание двуединой корпускулярно-волновой природы микрообъектов. Мысль о фундаментальном значении для физики объединения корпускулярных и волновых идей уточнялась и развивалась многими исследователями [10]. Существуют еще другие интерпретации квантовой механики; каждая из них по-своему свидетельствует о том, что наиболее существенное в философском плане для квантовой теории заключается в том, как сочетать корпускулярную и волновую картины поведения микрообъектов (эти интерпретации мы оставим в стороне). Диалектическую позицию в этом вопросе отчетливо сформулировал С. И. Вавилов [11]. Материя, т. е. вещество и поле, согласно этой позиции,— не есть совокупность частиц или совокупность волн в смысле классической физики, не есть она также объединение корпускулярных и волновых свойств в некоторой классической модели. Корпускулярные и волновые свойства материи в своей противоположности едины, т. е. материи присущи одновременно свойства и частиц, и волн.

В свете этого понимания материи философски по-новому осмысливаются утверждения о том, что в квантовой физике фундаментально изменяется не только понятие частицы классической механики, но и понятие волны классической теории поля. Ограничение, которому подвергается в квантовой механике классическое понятие частицы (оно выражается в соотношении неопределенностей), не есть ограничение познания материи, а есть более точное познание ее корпускулярных свойств с учетом также ее волновой природы. В утверждении, что в квантовой теории система частиц математически описывается волнами в многомерном конфигурационном простран-

ве, выражается не идеалистический тезис о растворении наблюдаемого мира в математике, а выражается та истина, что совокупность частиц есть одновременно поле (а поле есть в то же время совокупность частиц).

В квантовой механике различие между частицей и волной становится относительным; эти понятия в квантовой механике теряют свою абстрактную противоположность, и, соответственно, понятие частицы изменяется и получает новое определение, поскольку в квантовой механике понятия частицы и волны имеют смысл только в своем взаимоотношении. Это отвечает тому факту, что ни в одном опыте свойства микрообъектов не проявляются в точности как свойства частицы или как свойства волны и только в предельных случаях в одних условиях наблюдения микрообъекты ведут себя подобно частицам, а в других — подобно волнам. Таким образом, при описании явлений атомного масштаба нельзя отвлекаться от условий (они фиксируются экспериментальными средствами), в которых эти явления наблюдаются. В этой относительности к экспериментальным средствам или средствам наблюдения, составляющей отличительную черту описания в квантовой механике, выражается истина о единстве противоположных корпускулярных и волновых свойств микрообъектов.

В соответствии с этим величины, применяемые в квантовой механике в так называемых соотношениях неопределенностей, отличаются коренным образом от своих классических аналогов. Они приобретают характер относительности к средствам наблюдения, что качественно отличает их от классических величин, которые безотносительны к средствам наблюдения.

Сказанное позволяет разрешить парадокс, о котором говорил Гейзенберг. В квантовой механике по существу дела идет речь не о классических координате и импульсе, которые, согласно доквантовой физике, имеют смысл безотносительно к средствам наблюдения. В соотношении неопределенностей раскрывается специфическое в понимании квантового состояния; это последнее (в отличие от понятия состояния в классической механике) таково, что в нем не существует одновременно определенного значения импульса и координаты (или символически $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$ где Δx — неопределенность в

координате, а Δp — неопределенность в импульсе). Понятия координаты, импульса, состояния частицы в квантовой механике не имеют смысла безотносительно к средствам наблюдения, подобно тому как эти понятия в классической механике не имеют смысла безотносительно к системе отсчета.

Согласно соотношению неопределенностей, чем больше неопределенность в координате, тем меньше неопределенность в импульсе (предельный случай — электрон находится в состоянии плоской волны де Бройля), и обратно: чем меньше неопределенность в координате, тем больше неопределенность в импульсе (предельный случай — электрон находится в состоянии узкого волнового пакета). Именно потому, что, скажем, электрону присущи нераздельные корпускулярно-волновые свойства, его координата и импульс не имеют одновременно определенного значения. Другими словами, сама природа микрообъекта служит основанием того, что его описание немыслимо вне применения понятий вероятности и потенциальной возможности. Понятие вероятности в квантовой механике, таким образом, отличается в принципе от понятия вероятности в классической физике, поскольку вероятности входят непосредственно в фундаментальные квантовые положения.

Итак, классические понятия выступают приближенно в квантовой механике; соотношение неопределенностей отмечает границы применимости классического способа описания и открывает перспективу более полному и точному описанию физических явлений. В этом выражается в квантовой теории диалектика познания движущейся материи и ее форм, ибо это познание не сводится к какому-либо одному универсальному способу описания природы, а представляет собой процесс, в котором создаются все более широкие и глубокие абстракции, понятия, принципы и т. д., охватывающие материальный мир.

3. Несколько замечаний о возможных поисковых путях современного развития квантовой теории поля

Зададимся вопросом: почему идея о единстве корпускулярных и волновых свойств материи служит лишь применительно к познанию явлений микромира, тогда как при исследовании процессов макромира нельзя

обойти жесткой антитезы: вещество (частица) и поле (волна)? Универсальная константа h , связывающая воедино корпускулярные и волновые величины и имеющая размерность действия, очень мала в сравнении с величинами размерности действия, характерными для явлений макромира. При исследовании этих явлений можно считать величину h практически бесконечно малой, т. е. рассматривать корпускулярные и волновые свойства материи вне их единства; в этом случае законы квантовой механики переходят в законы классической механики. Почему h имеет именно такое-то численное значение — вопрос, который стоит вне современной квантовой теории; в этой теории h является фундаментальной величиной и ее значение принимается эмпирически данным. Решение этого вопроса относится к компетенции более глубокой теории, нежели современная квантовая физика.

В литературе рассмотренный вопрос часто подменяется совершенно другим: в чем сущность единства корпускулярных и волновых свойств микрообъектов, или, как пишут, в чем сущность корпускулярно-волнового дуализма? Считается, что квантовая теория не раскрывает этой сущности, а какая-то будущая теория это сделает.

Вопрос этот не имеет смысла, подобно тому как для атомиста не имеет смысла вопрос о сущности и основании атома: ведь атом есть сущность и основание всего сущего и потому сам не имеет основания и сущности. Единство корпускулярных и волновых свойств материи есть принцип, раскрывающий сущность явлений микромира и лежащий в основании квантовой теории. Именно поэтому с точки зрения квантовой теории, отражающей микромир, не имеет смысла вопрос о сущности этого единства, хотя и необходимо разъяснение его проявления на основе анализа условий наблюдения.

Другое дело, что современная физика не является логически цельной системой теорий. Одни из них (например, квантовая механика) являются логически замкнутой системой понятий, другие (например, теория элементарных частиц) только строятся, отыскиваются логические мостики между такими теориями, как теория относительности и квантовая механика, и т. д. Однако тенденции современной физики к логически цельной системе теорий несомненны, и к такой системе — если речь

идет о философской стороне дела — приведет не «раскрытие сущности корпускулярно-волнового дуализма», а нечто совершенно другое.

В данном случае необходимо иметь в виду, что «единство корпускулярных и волновых свойств материи» есть адекватное выражение в современной физике принципа единства прерывности и непрерывности материи. В философии диалектического материализма этот последний принцип внутренне связан в одну логическую цепь с принципом единства пространства и времени, а также принципом единства мира и принципом развития. В современной физике до адекватного выражения всей этой интегральной связи еще далеко. Например, в квантовой механике синтез корпускулярных и волновых представлений о материи не относится к полям; в квантовой теории поля этот синтез становится более глубоким, сочетая в нечто единое понятие поля и понятие вещества. Однако в современной физике нет еще органического соединения квантовой теории и частной теории относительности (в которой принцип единства пространства и времени нашел более полное выражение, нежели в классической физике); начало этому синтезу, но только начало, положено релятивистской теорией электрона Дирака. Что касается общей теории относительности, связавшей в нечто единое пространственно-временной континуум и поле тяготения, то она пока что стоит в стороне от квантовой физики, если не считать тех или других идей и концепций отдельных авторов.

Таким образом, современная физика встала перед глубоким синтезом своих ведущих теорий. Этому будущему синтезу соответствует соединение философских принципов, указанных выше. Принципы эти в их интегральной связи открывают философскую перспективу современной физике в решении теоретических задач, поставленных ее развитием.

В плане этих соображений рассмотрим проблему причинности в нелокальной квантовой теории поля. Нас будет интересовать, разумеется, не столько физическая суть дела, сколько философский ее аспект.

Причинная связь — это объективно реальная генетическая связь двух (по меньшей мере) событий, совершающихся в разных местах; если определено, что в таких-то условиях событие *A* есть причина, а событие *B* —

действие, то значит событие B происходит позже события A . Классическая механика придерживается взгляда, что изменения системы, порожденные (кратковременным) внешним воздействием, образуют причинную цепь. Если учесть, что причинная связь — это необходимая связь во времени, то высказанное положение о причинности принимает следующую известную форму: сигнал можно передать не в прошлое, а только в будущее. Однако законы классической механики, поскольку в них находят свое выражение обратимые механические процессы, не содержат причинного положения, относящегося к сигналу. Оно является добавочным требованием к законам механики, и сами по себе эти последние не определяют направление времени.

Примерно такая же картина в теории относительности и в квантовой механике, которые также представляют собой причинные теории в указанном выше смысле, с тем, правда, существенным дополнением для теории относительности, что в ней скорость света в вакууме является предельной скоростью сигнала. Интересно в этой связи замечание Эйнштейна о событиях, связанных сверхсветовым сигналом ($W > c$, где W — скорость распространения некоторого действия, а c — скорость света), и о времени T , необходимом для переноса сигнала от A в B . Мы читаем: «Скорость v (т. е. скорость наблюдателя. — *М. О.*) может принимать любое значение, меньшее c . Если при этом $W > c$, как мы предположили, то v всегда можно выбрать так, что $T < 0$. Этот результат показывает, что мы вынуждены считать возможным механизм передачи сигнала, при использовании которого достигаемое действие предшествует причине. Хотя этот результат с чисто логической точки зрения и не содержит, помимо, в себе никаких противоречий, он все же настолько противоречит характеру всего нашего опыта, что невозможность предположения $W > c$ представляется в достаточной степени доказанной» [12, стр. 76].

Что касается вопроса о причинности в квантовой теории поля, то он, думается, должен рассматриваться в несколько другой плоскости, нежели в доквантовой физике и (нерелятивистской) квантовой механике.

Квантовая локальная теория поля, при так называемом аксиоматическом подходе к ее построению, опирается на принципы релятивистской инвариантности, унитар-

ности и локальности (некоторые другие важные требования мы оставим в стороне). Квантовые поля ассоциируются с элементарными частицами, а процесс взаимодействия элементарных частиц (очень высоких энергий) описывается посредством так называемой матрицы рассеяния, или S -матрицы, которая представляет собой оператор, переводящий волновую функцию (состояние) частицы до реакции (рассеяния) в состояние после реакции.

При описании посредством матрицы рассеяния очень важно — в этом исток нового подхода к проблеме причинности в квантовой теории поля по сравнению с классической — иметь в виду, что дело заключается не в выяснении деталей поведения частиц при их очень малых сближениях, а в вопросе о конечных после реакции состояниях и вероятностях их возникновения. С этой точки зрения в теории взаимодействия частиц высоких энергий (она должна быть еще создана) понятие деталей поведения частиц при малых сближениях не имеет смысла (принципиально ненаблюдаемо), а если это признать, то отсюда проистекают важные в принципиальном плане заключения.

То обстоятельство, что понятие деталей поведения частиц высоких энергий при их сближении не имеет смысла, открывает новые перспективы существенного характера нелокальной квантовой теории поля. Как известно, эта теория (в своей начальной форме) появилась незамедлительно после того, как в физике возникли парадоксы с расходимостями, присущими современной квантовой теории с ее постулатом локальности взаимодействия полей. В квантовой теории «обычного типа» постулат о локальности, или точечности, взаимодействий, собственно, заимствуется из классической теории точечных частиц. Он требует, чтобы взаимодействия полей относились к одной и той же точке пространства — времени. Это требование отвечает теории относительности, отрицающей размеры и «жесткую» структуру элементарных частиц, так как иначе приходится принимать, что сигнал может распространяться со скоростью, большей скорости света, и, следовательно, как было отмечено выше, событие-действие должно совершаться раньше события-причины.

Таким образом, постулат локальности имманентно связан с утверждением причинности, что событие-причина не может быть позже события-действия.

Нелокальная квантовая теория по своему замыслу должна освобождать от трудностей с расходимостями современную квантовую физику. Преследуя эту цель, она отказывается от постулата локальности взаимодействия полей и пытается это сделать различными путями; соответственно развиваются не одна форма и не один вариант нелокальной теории. Не будем останавливаться на этих формах и вариантах, как и на трудностях нелокальной теории (выясняется, кстати, что эти трудности не так уж фундаментальны) [13]. Нас интересует принципиальная суть нелокальной теории: действительно ли она перечеркивает принцип причинности и ведет к отказу от пространственных и временных представлений в применении их к миру элементарных частиц — как утверждают отдельные авторы? Или шире: как обстоит дело с причинностью и с пространством и временем на той ступени материи, которая называется элементарными частицами?

Напомним, что для материалистической диалектики причинность есть лишь малая частичка объективно реальной всемирной связи, лишь одно из определений последней. Метафизик гипертрофирует, возводит на Олимп догматизма причинность, которая, по словам Ленина, лишь односторонне, отрывочно и неполно выражает всесторонность и всеобъемлющий характер мировой связи [14, стр. 143]. Именно с этой позиции рассмотрим поставленные вопросы относительно нелокальной теории.

Прежде всего эта теория должна справиться, как говорят, с проблемой макропричинности, т. е. нелокальная теория не должна приводить к возможным экспериментальным следствиям, расходящимся с утверждением о причинности в макроскопических (включая и атомные) масштабах пространства и времени. По существу это означает, что нелокальная теория, будучи обобщена применительно к большим масштабам пространства и времени, переходит в локальную квантовую теорию (принцип соответствия).

В нелокальной теории фигурирует новая мировая постоянная размерности длины, или элементарная длина, которая как бы «отделяет» область ультрамалых масштабов от области пространства — времени, где действуют принцип причинности и законы «привычной» геометрии. Таким образом, к мировым постоянным $\hbar$ и c , на ко-

торых покоится квантовая теория поля, присоединяется константа, специфичная для физики высоких энергий, которая связывает близкоедействие и дальноедействие в нечто единое.

Введение элементарной длины при определенных предположениях ставит на почву физики вопрос о пересмотре «привычной» формы геометрии: метрическое пространство — время перестает существовать, понятия «ближе» и «дальше», «раньше» и «позже», «длины», «продолжительности» теряют макроскопический смысл в ультрамалом. Естественно, что должно также отпасть разделение явлений на события-причины и события-действия, и математический аппарат теории должен отражать эту последнюю ситуацию.

Означает ли все это, что нелокальная квантовая теория поля предполагает некую идеалистическую и теистическую линию в вопросе о причинности? Из сказанного выше о том, как материалистическая диалектика понимает причинную связь, ответ на поставленный вопрос ясен.

Формы связи и взаимозависимости не исчерпываются причинной связью. Развитие квантовой физики открывает новые формы связи явлений неживой природы, которые не укладываются в схемы существующих физических теорий. В этом, в частности, заключается новое подтверждение объективного характера мировой связи, ее неисчерпаемости, перехода одних ее форм в другие, более глубокие и общие. Причинность в обычном ее понимании не имеет смысла в области ультрамалого; здесь на передний план выступает такая более глубокая и общая форма связи, как взаимодействие. Последнее предстает, однако, не как постоянная смена причины и действия, а как их основание, как охватывающее и причину и действие целое.

Конечно, не запрещается взаимодействие толковать как причину, но тогда перед нами не причина в обычном понимании. Эта последняя есть отдельная причина, которая действует в отдельный момент времени и в отдельном месте, т. е. такая форма связи, которая в старых философских системах называется *causa efficiens* (действующая причина). Взаимодействие же как причина — это не *causa efficiens*, а скорее — если пользоваться старыми философскими понятиями — *causa finalis* (конечная

причина); в известном высказывании Спинозы: «substantia est causa sui», собственно, речь идет о «конечной причине».

Нет, однако, никакой необходимости виной современной науки вливать в старые философские мехи. Уже у Гегеля, как отметил еще Энгельс, снята противоположность между *causa efficiens* и *causa finalis* в категории взаимодействия [15, стр. 558].

В мире большого (включая атомные масштабы) правомерна абстракция отдельных явлений, вырванных из их всеобщей связи и рассматриваемых, следовательно, разделенно (в пространственном и временном отношении); принцип, или утверждение, причинности и предполагает — как явствует из сказанного выше — правомерность этой абстракции. В ультрамалом же мире, или в мире взаимодействующих, превращающихся друг в друга элементарных частиц высоких энергий, такая абстракция утрачивает кредит, а вместе с ней теряет кредит и утверждение причинности. Необходимы, таким образом, в принципе новые идеи в физике, и нелокальная квантовая теория поля, собственно, и ведет к этим новым основным понятиям и положениям.

Разумеется, окончательное слово в выяснении этих существеннейших для физики вопросов принадлежит опыту, но вместе с тем несомненно, что для их решения важнейшее значение имеет (примененная объективно) всесторонняя, универсальная гибкость понятий (о диалектическом требовании гибкости понятий [см. 14, стр. 99]). Опыт в последнем счете и удостоверяет, что гибкость понятий была применена объективно.

4. Абстрактное мышление и представление в физическом познании природы

В квантовой теории в очень рельефной форме решается на почве физики вопрос о взаимоотношении абстрактного мышления и представления в познании истины. Проблема эта в физике — если применять терминологию современных авторов — выступает в форме взаимоотношения абстрактно-логического (математического) и наглядного, или математического аппарата (формализма) теории и наблюдаемых в опыте данных (описываемых посредством нашего обычного языка).

Уже в классическом естествознании существовала названная проблема. Ньютон, который мыслил физическую теорию построенной по образу и подобию геометрии Эвклида, утверждал вместе с тем: «...Геометрия основывается на механической практике и есть не что иное, как та часть общей механики, в которой излагается и доказывается искусство точного измерения» [16, стр. 2].

Развитие геометрии — как свидетельствует ее история и прежде всего переломные годы этой истории, когда вопрос об отношении геометрической теории к объективной реальности приобретал сугубую остроту, — не замыкалось исключительно в сфере абстрактно-логического. И если Гауссу не удалось подтвердить измерениями идей неевклидовой геометрии, то это сделала по-своему и на более высоком уровне развития математики и физики теория Эйнштейна.

Самому Эйнштейну в аспекте рассматриваемой проблемы о взаимоотношении абстрактного и наглядного в познании объективной реальности принадлежит идея, имеющая для физики существенно философское значение. Она заключается в том, что само по себе абстрактно-логическое ничего еще не говорит об объективно реальном; абстрактно-логическое (математическое) лишь в связи с наглядным, т. е. единство логического (математического) и наглядного (а не каждое из них, взятое произвольно порознь), отражает объективно реальное и является предметом проверки на опыте [17, стр. 86]. Эта глубоко диалектическая идея отклоняет с самого начала конвенционалистскую и позитивистскую схему решения поставленной проблемы. Она получила дальнейшее обобщение в работах физиков по квантовой механике [18].

Вообще говоря, физическая теория в своей логически развитой, или замкнутой, форме охватывает свой объект как бы сразу в двух планах: представления и мышления. Экспериментальные средства — эти своего рода продолжения человеческих органов чувств — дают чувственно воспринимаемые данные об исследуемых явлениях, а с помощью математического аппарата теории эти данные поднимаются на уровень теоретических обобщений, которые отражают связи и законы исследуемых явлений. С этой точки зрения физические понятия предстают как результаты синтеза чувственного и абстрактного познания. Ни одна физическая теория, которая отражает (или

должна отражать) объективную реальность, не может обходить необходимость нахождения связи ее математического аппарата с показаниями экспериментальных средств: вне этой связи, т. е. без раскрытия физического смысла математических абстракций, не существует физической теории. Философское обоснование этого заключается в том, что природа, с которой имеет дело естествознание, есть движущаяся материя, а познание материи невозможно, если она не воздействует (прямо или косвенно, через экспериментальные средства) на человеческие органы чувств. Другими словами, не существует «объективного мира формул» без отношения к «наглядности»; в физической теории ее абстрактная (математическая) часть и ее, так сказать, наглядная часть необходимо связаны одна с другой. Борн, утверждая, что, по мнению материалистов, допустим «объективный мир формул без отношения к наглядности» [19, стр. 444], излагает неверно позицию материалистов.

В классической механике физические понятия обычно представляют непосредственные обобщения понятий, возникших в повседневном опыте (абстракции, так сказать, первого уровня). Они образуются таким путем, когда физик переходит от показаний экспериментальных средств к математическим понятиям, связывая эти показания и понятия между собой по определенным правилам.

Возможен и противоположный путь образования физических понятий, когда физик от математических абстракций в уравнениях теории переходит к воспринимаемым показаниям экспериментальных средств. Он встречается в классических теориях, когда исследуемые объекты или явления непосредственно не воспринимаются органами чувств; примером может служить понятие напряженности поля в теории электромагнетизма Максвелла. Но типичным этот путь является для неклассических теорий. Так, в квантовой механике сначала было сформулировано волновое уравнение с волновой функцией, а потом уже был найден физический смысл последней.

В каждой замкнутой физической теории (классической механике, классической теории электромагнетизма, теории относительности, например) существует свой математический аппарат, или формализм (в классическом формализме фигурируют числа и векторы, в формализ-

ме теории относительности — четырехмерные векторы и тензоры, в квантовом формализме — операторы определенного класса). Каждому формализму (каждой теории) отвечают свои специфические правила связи его математических понятий с показаниями экспериментальных средств. Эти правила должны входить в систему принципов определенной теории. Во всех этих различиях (математических аппаратов теорий и соответствующих им правил связи) выражаются качественные различия законов (область медленных движений, область быстрых движений и электромагнитных явлений, мир явлений атомного масштаба и т. д.).

При переходе от математических понятий в уравнениях классической механики к наблюдаемым данным не возникает и не может возникнуть никаких парадоксов (при условии, если уравнения рассматриваются в пределах их применимости). Это определяется тем, что наблюдаемые данные описываются посредством классических понятий, а уравнения классической механики были найдены после установления связи математических понятий с показаниями экспериментальных средств.

При переходе от математических понятий в уравнениях квантовой механики к наблюдаемым данным неизбежно появляются парадоксы. Источником их являются определенные обстоятельства. Во-первых, квантовая механика, как физическая теория, не может обойти классические понятия, ибо только посредством их описываются наблюдаемые в опыте данные (с которыми должны связываться понятия квантового формализма).

Во-вторых, квантовый формализм должен отразить свойства и поведение микрообъектов, которые по своей природе отличаются от «классических» частиц и «классических» волн, но это он может сделать только через классические понятия, выработанные на почве исследования макроскопического мира.

Развитие квантовой механики, как физической теории, позволило разрешить эти парадоксы. Логика такого решения представляет с точки зрения диалектики большой интерес. Разбор относящихся сюда вопросов сводится к анализу проблемы: каким образом возможно выразить физический смысл понятий квантового формализма, обращаясь к данным (или результатам) наблюдения, которые описываются посредством классических

понятий? Здесь физические понятия поднимаются на высший уровень абстракции по сравнению с понятиями классической физики.

5. Проблема элементарности частиц

Эту проблему коротко рассмотрим в настоящем последнем параграфе [20]. В доквантовой физике проблема элементарности частиц решалась, как известно, следующим образом: в фундаменте материи находятся стабильные, неделимые, обладающие способностью сколь угодно точной локализации в пространстве и времени частицы, которые образуют структуру более сложных форм материи. В химии в какой-то мере осуществилась эта идея; в ней так или иначе была реализована гипотеза Проута: химические элементы состоят из водорода, — только роль последнего играет заряд атомного ядра, определяющий число электронов в оболочке атома и место элемента в периодической системе Менделеева.

В связи с открытием современной физикой обилия элементарных частиц с их различного типа взаимодействиями и целым набором разнообразных квантовых свойств вновь возникла проблема элементарности. Может ли она быть решена так, как принято было решать эту проблему до открытия элементарных частиц, или же здесь необходимы новые подходы? Для уяснения ситуации следует учесть, что нельзя, например, рассматривать стабильные, без внешнего воздействия не распадающиеся частицы (к ним относятся протон, электрон, фотон и нейтрино) в качестве истинно элементарных, а все остальные элементарные частицы (метастабильные и резонансы), претерпевающие самопроизвольные распады, считать сложными. Так, нейтрон не состоит из протона, электрона и антинейтрино, хотя, будучи в свободном состоянии, нейтрон распадается на эти три частицы.

Представляется разумным проблему элементарности свести к наличию некоторой последовательности уровней материи, в которой каждый из них является «элементарной» ступенью для последующего высшего уровня и «сложной» ступенью для предшествующего глубокого уровня. Такого рода идея иерархии элементарности нашла одно из своих воплощений в ньютоновой концепции

материи как системы частиц последовательно увеличивающейся степени сложности и находит в определенной мере выражение также в современном понимании строения материи.

Действительно ли идея иерархической системы строения материи служит ключом к проблеме элементарности в современной физике?

Пусть последовательность уровней имеет начало с «элементарной» стороны. Тогда материя будет представляться как упорядоченная совокупность элементарных частиц и систем (частиц) различной степени сложности, состоящих в последнем счете из тех же элементарных частиц. Перед нами, таким образом, вариация классической атомистики. В современных концепциях элементарных частиц своеобразным выражением этой вариации может служить схема японского физика Саката трех фундаментальных частиц — протона, нейтрона и Λ -гиперона (к ним присоединяются еще их античастицы), из которых строятся все сильно взаимодействующие частицы. Следует, однако, иметь в виду, что в схеме Саката по существу речь идет не столько о трех частицах-кирпичиках, сколько о трех законах сохранения электрического заряда, барионного числа и странности, имеющих место в процессах сильного взаимодействия.

Не так давно Гелл-Манн и Цвейг вернулись вновь к представлению о трех фундаментальных частицах, изменив и уточнив схему Саката. Выяснилось, что квантовые числа этих частиц (они были названы «кварками») должны быть дробными. Понятно, что только эксперимент может решить вопрос о существовании кварков.

Пусть теперь последовательность уровней материи бесконечна (т. е. не имеет начала) с «элементарной» стороны, причем эта бесконечность представляет постоянно возвращающийся переход от сложного к элементарному и обратно. Согласно этому допущению, «элементарность» объектов есть нечто только относительное, объекты же сами по себе представляются чем-то сложным. Мы приходим к мысли, что не существует «элементарных» объектов как таковых, т. е. что материя не состоит из элементарных частиц.

Многие современные физики придерживаются так или иначе этого взгляда на материю. Так, Р. Хофштадтер, открывший структуру нуклона, полагает, что «поис-

ки все меньших и более фундаментальных частиц будут продолжаться до тех пор, пока человек сохранит жажду знания» [21, стр. 206].

Высказанные выше замечания об элементарном и сложном похожи по своей логической сути на вторую антиномию Канта: существует только простое или то, что сложено из простого (тезис); вообще в мире нет ничего простого (антитезис) [22, стр. 410—411]. Кант из своих рассуждений сделал агностические выводы. Диалектическая критика (Гегель, марксистская философия) исправила рассуждения Канта и привела к разрешению его антиномий. Нам думается, что принципы диалектики позволяют наметить подход к проблеме элементарности, который не допускает понятия чисто относительной элементарности и также исключает точку зрения классического атомизма. Этот подход полностью отвечает тенденциям развития физики элементарных частиц.

Бесконечная последовательность уровней материи представляет собой, как указал еще Энгельс, различные узловые пункты, обуславливающие различные качественные формы существования всеобщей материи. С этой точки зрения материя не есть только элементарные частицы и их соединения, а также не есть только субстанция, не состоящая из элементарных частиц; материя в целом обладает одновременно свойствами и элементарного, и сложного.

В классической физике имеются основания отвлекаться от единства элементарного и сложного и рассматривать их обособленно друг от друга (и такое понимание подтверждается опытом). В квантовой физике ситуация в принципе меняется. Коренится это в том обстоятельстве, что чем дальше проникает физика в глубь материи, тем сильнее должно сказаться в ее теории открытие взаимопревращаемости всех элементарных частиц. В современной атомистике выступает на переднее место понятие «превращения одного в другое», в плане которого проблема элементарности и сложности ставится и разрешается совершенно иначе, нежели в классической атомистике (в которой превращение понимается в конечном итоге как «соединение и разъединение некоторых неизменных частиц»).

Понятия элементарного и сложного в применении к элементарным частицам теряют свою абстрактную про-

тивоположность друг другу и тем самым свой буквальный смысл. Элементарные частицы не элементарны в классическом смысле; они похожи на классические сложные системы, но они не являются этими системами. В элементарных частицах сочетаются в едином противоположные свойства элементарного и сложного, т. е. элементарная частица одновременно и элементарная сущность и система.

Соответственно применительно к элементарным частицам изменяет свой смысл и понятие «состоять». Уже в ядерной физике понятие «состоять» испытывает некоторую метаморфозу.

Особенно бросается в глаза изменение понятия «состоять» в применении к частицам-резонансам. Например, частица Λ (1520) может распадаться либо на Σ и π , либо на N и π^- , и, наконец, на Λ и два π , но это совсем не означает, что частица Λ (1520) «состоит» в буквальном смысле из тех частиц, на которые она «распадается».

Этим примером подчеркивается, что «элементарность» и «сложность» присущи взаимодействующим элементарным частицам не самим по себе, безотносительно к условиям, в которых совершаются их превращения, а в органической связи с этими условиями.

Чтобы участвующая во взаимодействии частица могла распадаться, необходимо выполнение определенных законов сохранения, которые в данном случае выступают в качестве условий возможности распада. В сильных взаимодействиях, например, могут осуществиться только те распады, в которых исходная и образовавшаяся совокупности частиц обладают одинаковыми значениями всех сохраняющихся квантовых чисел. Для фактического осуществления возможности распада исходная частица должна иметь полную энергию (энергия покоя + кинетическая энергия), по крайней мере равную сумме полных энергий частиц, на которые она должна распасться, т. е. должен выполняться закон сохранения энергии.

Таким образом, взаимодействующую частицу нельзя считать элементарной или сложной без отсылки к полным энергиям всех участвующих в реакции частиц. В этом смысле понятия «элементарное» и «сложное» в применении к элементарным частицам представляют собой относительные понятия.

Это понимание элементарности не имеет ничего общего с пониманием элементарности в смысле чистой относительности. «Чисто относительная элементарность» немыслима без дополнительного утверждения: объект сам по себе сложен. С точки зрения, которая здесь развивается, дело обстоит, как мы видели, совсем по-другому. Относительность «элементарности» и «сложности» элементарных частиц аналогична относительности размеров тела и длительности процесса в теории Эйнштейна или относительности корпускулярных и волновых характеристик в квантовой механике, несмотря на различное содержание этих «относительностей». Без относительности в этом смысле нельзя было бы применять с необходимыми уточнениями классические понятия для описания тех явлений природы, которые не укладываются и которые вообще нельзя уложить в классические теории.

В заключение остановимся на понятии структуры в физике элементарных частиц.

Понятие структуры неотрывно от понятий множества и элемента, т. е. от понятия прерывности. Но, как доказано материалистической диалектикой, понятие прерывности едино со своим противоположным понятием — непрерывностью, т. е. противоположность этих понятий не абсолютна, как допускается метафизической философией. Квантовая теория пошла в этом принципиальном вопросе по пути диалектики: в квантовой механике корпускулярные (относящиеся к прерывности) и волновые (относящиеся к непрерывности) понятия рассматриваются в их внутренней связи.

Дух единства корпускулярных и волновых представлений, так сказать, сошел и на понятие структуры в квантовой физике. Специфически квантовые понятия виртуального процесса, виртуального состояния, виртуальной частицы имеют непосредственное отношение к проблеме структуры элементарных частиц.

В этой плоскости представляют большой интерес замечания В. Б. Берестецкого о композиции сильно взаимодействующих частиц. Он различает понятие «состоит» и понятие «составимо». Если, например, утверждается: «ядро состоит из нуклонов», то подразумевается, что, во-первых, ядро с квантовыми числами A и Z можно образовать из Z протонов и $(A - Z)$ нейтронов и, во-вторых, дефект массы ядра мал. Но есть системы, для кото-

рых выполняется первое положение, а второе — не выполняется. В этом случае, указывает В. Б. Берестецкий, вместо «состоит» будем говорить «может быть составлено», или «составимо»; например, нестранные мезоны *составимы* из нуклонов и антинуклонов [23, стр. 396].

В этой схеме те частицы, из которых составима система, являются виртуальными частицами. Для них, как говорят, закон сохранения энергии не имеет места, или, правильнее, вопрос о применимости к ним понятия сохранения энергии лишен смысла. С этой точки зрения элементарные частицы входят в другие элементарные частицы не в реальном виде, а в виртуальном состоянии; другими словами, элементарные частицы имеют виртуальную структуру.

Понятие виртуальной структуры частицы довольно давно выработано в квантовой теории. Начало его лежит в идее, что взаимодействующая частица есть источник поля, кванты которого переносят взаимодействие. При взаимодействии частицы обмениваются виртуальными квантами поля; нуклон, например, обладая барионным зарядом, порождает и поглощает виртуальные π -мезоны — кванты ядерного поля.

Можно показать, что в сильном взаимодействии вероятность порождения сразу двух и больше π -мезонов достаточно велика. В результате нуклон в среднем по времени оказывается в атмосфере из виртуальных π -мезонов. Эта атмосфера виртуальных мезонов (она имеет определенные размеры) и нуклон неотделимы друг от друга, и с этой точки зрения следует сказать, что нуклон имеет π -мезонную структуру.

Нуклон является источником, кроме π -мезонов, также K -мезонов. Соответствующие рассуждения приводят к выводу, что нуклон порождает K -мезоны с образованием гиперонов. Помимо π -мезонов и K -мезонов для нуклона возможно также порождение виртуальных нуклон-антинуклонных пар. Они также вносят свой вклад в общую виртуальную структуру нуклона.

Итак, нуклон обладает виртуальной структурой вследствие его взаимодействия с другими элементарными частицами. В нуклоне совершаются виртуальные процессы: нуклон часть времени пребывает в состоянии нуклона с π -мезонами, часть времени — в состоянии гиперона с K -мезонами, часть времени — в состоянии нуклона с па-

рами нуклон-антинуклон. Суперпозиция различного рода множеств виртуальных частиц (различных виртуальных структур) и дает общую структуру нуклонов, которую возможно наблюдать в опыте.

Структура нуклона наблюдалась впервые в опытах Хофштадтера по рассеянию быстрых электронов на протонах. Структура нуклона из виртуальной становится реальной благодаря передаче энергии нуклону движущимися электронами. В опытах доказано, что протон рассеивает электроны таким образом, как если бы его заряд распределялся в пространстве, а не так, как если бы протон был заряженной точечной частицей.

В свете этих идей о структуре элементарных частиц большой философский интерес вызывает так называемая гипотеза «зашнуровки» (bootstrap), высказанная Чу и Фраучи. По этой гипотезе каждая сильно взаимодействующая частица помогает создавать другие частицы, которые в свою очередь образуют ее самое. Таким образом, современный атомизм меньше всего требует, чтобы многообразие известных частиц было сведено к немногим элементарным сущностям или, наоборот, чтобы элементарные сущности вообще были изгнаны из научного обихода. Элементарные частицы, образуя глубочайший известный ныне уровень материи, сочетают воедино свойство прерывного (частиц) и непрерывного (полей). Виды элементарных частиц отличаются друг от друга, и вместе с тем они — одно; эта особенность уровня элементарных частиц делает его непохожим на более высокие уровни материи, при рассмотрении которых при определенных условиях можно отвлекаться от органического единства прерывного и непрерывного.

Подводя итог, необходимо еще раз подчеркнуть, что современная квантовая теория насыщена трудностями и парадоксами; физики еще не нашли конкретных научных подходов, которые привели бы к успеху, хотя эти поиски усиливаются и становятся все более разнообразными по идеям и методам. Нужны новые фундаментальные идеи и принципы, которые в их связи с эмпирическим материалом позволили бы отобразить мир элементарных частиц.

Неисчерпаемость элементарных частиц, их взаимопревращаемость, диковинность их свойств служат опорой диалектического материализма, который, в свою оче-

редь, даст современной физике и естествознанию в целом необходимую философскую основу для правильного понимания и разрешения возникающих трудностей и парадоксов.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Макс Планк». М., 1958.
2. Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., 1961.
3. W. Heisenberg. Physik und Philosophie. Stuttgart, 1959.
4. «Dialectica», 1958, № 7—8.
5. Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., 1961.
6. Д. И. Блохинцев. Основы квантовой механики. М.—Л., 1949, стр. 69.
7. В. А. Фок. Критика взглядов Бора на квантовую механику.— «Философские вопросы физики». М., 1958.
8. «УФН», т. LXVII, вып. 1, 1959.
9. «Niels Bohr and the development of physics». L., 1955.
10. См., например: Д. С. Рождественский. Анализ спектров и спектральный анализ.— «УФН», т. XVI, вып. 7, 1936; И. Е. Тамм. Новые принципы статистической механики Бозе—Эйнштейна.— «УФН», т. VI, вып. 2, 1926; Д. И. Блохинцев. Основы квантовой механики. М., 1949; В. А. Фок. Об интерпретации квантовой механики.— «Философские проблемы современного естествознания». М., 1959.
11. С. И. Вавилов. Микроструктура света. М., 1959; он же. Глаз и Солнце.— «Собр. соч.», т. III. М., 1956; и др.
12. А. Эйнштейн. О принципе относительности и его следствиях.— «Собр. научн. трудов», т. I. М., 1965.
13. Обо всем этом см.: Д. А. Киржниц. Нелокальная квантовая теория поля.— «УФН», т. 90, вып. 1, 1966.
14. В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, т. 29.
15. К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения, т. 20.
16. И. Ньютон. Математические начала натуральной философии. Пер. А. Н. Крылова. 1915.
17. См. А. Эйнштейн. Геометрия и опыт.— «Собр. научн. трудов», т. II. М., 1966.
18. См., например: Л. И. Мандельштам. Лекции по основам квантовой механики.— «Полн. собр. трудов», т. V, Л., 1950.
19. М. Борн. Физика в жизни моего поколения. М., 1963.
20. Более подробно об этом см.: М. Э. Омельяновский. Проблема элементарного и сложного в физике микромира.— «Вопросы философии», 1965, № 10; M. Omeljanowski und Rumer. Das Problem des elementaren Charakters der Teilchen.— «Physikalische Blätter», 1966, Н. 8.
21. R. Hofstadter. Struktur von Kerner und Nukleon.— «Physikalische Blätter», 1962, Н. 5.
22. И. Кант. Сочинения, т. III. М., 1964.
23. В. Б. Берестецкий. Динамические симметрии сильно взаимодействующих частиц.— «УФН», т. 85, вып. 3, 1965.

ЭВОЛЮЦИЯ ПОНЯТИЯ «ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛЬНОСТЬ»
В СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКЕ

В нашей литературе философами и физиками обстоятельно обсуждался ряд философских проблем, возникших после создания специальной теории относительности (СТО), общей теории относительности (ОТО), а затем квантовой механики: роль и значение этих теорий в эволюции современной физической картины мира, специфические методы построения и истолкования новых теорий, в частности роль математической гипотезы, содержание важнейших понятий физической науки и их эволюция и другие,— а также была дана обстоятельная критика идеалистических, в особенности неопозитивистских, извращений СТО, ОТО и квантовой механики (А. Д. Александров, Д. И. Блохинцев, С. И. Вавилов, А. Ф. Иоффе, И. В. Кузнецов, М. А. Марков, Г. И. Наан, М. Э. Омеляновский, Н. Ф. Овчинников, Ю. В. Сачков, В. И. Свидерский, Г. А. Свечников, С. Г. Суворов, В. А. Фок и др.). Однако, по мнению автора, нашими исследователями в области философских вопросов физики все еще не уделяется должного внимания анализу такого существенного философского аспекта содержания физики XX в., как ее *теоретико-познавательные проблемы*.

Как известно, сами создатели физических теорий XX в.— А. Эйнштейн, Н. Бор, Луи де Бройль, В. Гейзенберг, М. Борн, П. Дирак, В. Паули, Э. Шредингер и другие в своих высказываниях по философским вопросам современной физики или в публикациях по истории создания новой физики свое главное внимание акцентируют именно на анализе проблем гносеологического порядка, отмечая, что именно их формулировка и разрешение представляли наибольшие затруднения в процессе создания и истолкования новых физических идей и принципов. Из исследований наших ученых, специально посвященных анализу узловых теоретико-познавательных проблем (или тех или иных их аспектов) физики микромира, необходимо выделить работы М. А. Маркова [1], В. А. Фока [2] и М. Э. Омеляновского [3]. Интересные

разработки указанных проблем проводятся в последнее время также такими философами, как И. С. Алексеев, И. А. Акчурин, В. П. Бранский, В. П. Хютт, Ф. М. Канак, Н. М. Роженко, А. Р. Познер, В. С. Лукьянец и др. Рассмотрение гносеологической ситуации в физике XX в. в целом, анализ содержания ее важнейших исходных теоретико-познавательных положений — такова, по-видимому, центральная задача, поставленная перед философами в ходе непрерывной эволюции физического знания.

В настоящей статье рассматривается смысл и значение понятия «физическая реальность» в его историческом развитии от классической физики к релятивистской, а затем — к квантовой механике, которое является наиболее важной характеристикой новой гносеологической ситуации в физике XX века. Проблема реальности в физике возникает в самых разнообразных формах: реальны ли релятивистские эффекты, реальны ли силы инерции, реальны ли волны материи, какой физический смысл тех или иных абстрактно-математических выражений, вводимых методом математической гипотезы, как установить объективные значения терминов и утверждений физической теории и т. п. Особенно явственно эта проблема возникла в физике после сформулирования К. Максвеллом теории электромагнитных процессов, когда физики получили математические уравнения, но не могли сказать, какие физические объекты ими описываются (вспомним известный афоризм: «теория Максвелла — это уравнения Максвелла»). Еще более остро проблема реальности ставится перед физиками после создания СТО, а затем и ОТО. Привычная схема физиков — идти от эксперимента и физических понятий к математическим знакам и выражениям разрушается А. Эйнштейном в ОТО, когда создатель новой теории идет от математических абстракций (риманова геометрия) к истолкованию физического эксперимента, наделяя физическим смыслом эти математические абстракции. Физические явления (гравитация) и операции над ними выступают в качестве интерпретации определенной математической схемы, именуемой геометрией Римана [4] (вместо привычных физических терминов — «сила тяжести», «гравитационный потенциал» и т. д. в физике начинают фигурировать термины: «кривизна пространства», «компоненты

метрического тензора» и т. д.). Необычность ситуации, возникающей при этом, состоит в том, что не всякое математическое выражение можно интерпретировать с помощью действительных или мысленных физических экспериментов, т. е. оказывается, что не всякое утверждение принимаемой математической схемы имеет физический смысл (например, риманова геометрия оперирует n -мерным пространством, в то время как физик обрабатывает результаты эксперимента, опираясь лишь на четырехмерный «мир Минковского»; некоторые компоненты метрического тензора не могут быть идентифицированы с гравитационным потенциалом и т. д.). Так возникает проблема установления реального физического смысла геометрических соотношений, известная в ОТО под названием «проблемы поля — пространства — времени» (соотношение метрики и гравитации) [5]. Возникновение проблемы реальности в квантовой механике является логическим продолжением поставленной СТО и ОТО задачи интерпретации математической схемы на физическом материале.

Окончательное решение вопроса о физической природе реальности, возникающего в той или иной форме, возможно только с помощью эксперимента, практики; однако это решение невозможно без предварительного обсуждения проблемы реальности в гносеологическом плане, без установления тех теоретических предпосылок, при которых эта проблема вообще имеет физический смысл. К числу таких предварительных обсуждений относится и выяснение содержания применяемых фундаментальных понятий, и анализ логических средств оперирования этими понятиями. Эти обсуждения, несомненно, проводятся (независимо от того, осознается это или нет) исследователями с привлечением философских средств и методов.

Приступая к рассмотрению содержания такого фундаментального понятия физики XX в., как «физическая реальность», следует сделать несколько предварительных замечаний, прежде всего о физической теории вообще и о конкретных фундаментальных теориях в частности. Под физической теорией понимается не только система знаний об определенной совокупности физических объектов (их объяснение), но также и логические средства (описание способов) получения этих знаний и описание

методов установления истинности утверждений теории. Соответственно, термины «специальная теория относительности» (СТО), «общая теория относительности» (ОТО) и «квантовая механика» употребляются здесь в том смысле, какой был придан им самими создателями этих фундаментальных теорий и принят сейчас в физике. СТО рассматривает физические явления в инерциальных системах отсчета; ОТО — это теория гравитационных полей, построенная на основе идей физического релятивизма. Квантовая механика — это физическая теория, созданная копенгагенской школой физиков во главе с гениальным датским физиком Нильсом Бором; это — теория физических явлений атомного масштаба, явно учитывающая существенное (и неотделимое) влияние средств исследования на изучаемые физические явления.

Квантовая механика объясняет данные наблюдений микроявлений с помощью макроприборов, описываемых классической физикой, и предсказывает новые физические эффекты, опираясь на концепцию дополнительности, которую применительно к соотношению квантовомеханических представлений и обработки данных эксперимента Н. Бор характеризует следующим образом: *«Как бы далеко ни выходили явления за рамки классического физического объяснения, все опытные данные должны описываться при помощи классических понятий»* [6, стр. 60]. Иногда даже говорят, что квантовая механика «с некоторой точки зрения представляет собой теорию особого класса *макроскопических* явлений, связанных с микромиром взаимодействием» [7, стр. 170]. Возможны, разумеется, и другие теоретические представления, построения и интерпретации явлений микромира, кроме указанной выше «кopenhагенской интерпретации», однако их возможность и целесообразность здесь не рассматривается. **Формулирование** квантовой механики опирается на концепцию дополнительности Бора, являющуюся выражением логико-гносеологической специфики развития современного физического знания. Эта концепция является одной из важнейших предпосылок квантовомеханического (дополнительного) способа описания физических явлений. Как известно, понятия «исходные принципы (предпосылки) описания» и «способы описания» (классический, релятивистский, квантовомеханический) были

введены в методологию физики Нильсом Бором [6]. Фундаментальный анализ этих понятий, дальнейшее развитие идей Н. Бора содержатся в трудах выдающегося советского физика В. А. Фока [8]. Квантовая механика, сформулированная копенгагенской группой физиков, является, как известно, последовательной и «замкнутой» с логической точки зрения теорией и подтверждена необозримой массой экспериментальных данных; следовательно, ее необходимо рассматривать в теоретико-познавательном плане как нормально функционирующую физическую теорию, независимо от предположений о возможностях создания каких-либо других теорий микромира.

Далее. По существу содержание понятия «физическая реальность» может рассматриваться исключительно в плане его функционирования в физическом познании, т. е. нет никаких оснований оперировать им вне анализа теоретико-познавательного процесса в физике, как, например, бессмысленно оперировать понятием «системы отсчета» вне анализа взаимосвязей познающего субъекта (исследователя) с физическими объектами.

Термин «реальность» издавна используется в философии и имеет много значений; под «реальностью» понимается и нечто существующее вне и независимо от сознания человека (и человечества); и нечто существующее независимо от субъекта; и нечто существенное, необходимое в вещах и процессах по сравнению с второстепенным, несущественным, случайным; и действительные формы бытия по сравнению с возможными, вероятными формами; и любое явление, которое может получить материальную форму, и т. д. Так, например, говорят об «объективной реальности», о «реальных взаимодействиях», о «реальных вещах», о «реальном мире» и т. п.; затем говорят о «реальном смысле» утверждений теории, о «реальных элементах» физической картины мира, о «реальном истолковании» идеальных объектов знания и т. п.; говорят и о «реальности наших ощущений и мыслей», о реальности показаний приборов и т. п.; говорят о «непосредственной (эмпирической) реальности», с которой имеет дело та или иная наука (например, для формальной логики язык является «реальностью») и т. п. Эта многоплановость термина «реальность» может служить источником недоразумений и даже ошибок при оценке принципиального содержания физических теорий.

Конечно, лучше всего не употреблять такие термины, значение которых неоднозначно; но в науке в процессе становления нового содержания оно зачастую втискивается в имеющиеся «под рукой», уже установившиеся термины; только время от времени стараются напоминать (во избежание недоразумений), что под старым термином скрывается вполне определенное новое содержание. Термин «физическая реальность» вряд ли можно признать удачным (учитывая многозначность «реальности»), однако остается фактом, что им оперируют в современной физике. Поэтому не остается ничего другого, как совершенно определенно установить, каково содержание термина «физическая реальность» в современной физике и для решения каких задач этот термин может быть использован и фактически используется.

Учитывая многозначность термина «реальность», необходимо отличать его от содержания важнейшей категории диалектико-материалистической философии — материи (материального мира), или «объективной реальности», существующей независимо от человеческого сознания и отображаемой им [9, стр. 276]. В данном случае термин «независимо» понимается, конечно, не в том смысле, что не существует взаимосвязи между познающим субъектом и объективной реальностью, материей в познавательном процессе (ведь материализм не только исходит из существования материи, но и настаивает на ее познаваемости, отвергая непознаваемую кантовскую «вещь в себе»; процесс же познания немыслим вне разнообразных форм взаимодействия субъекта с объективной реальностью), а в том смысле, что познающий субъект возникает исторически лишь на определенном этапе развития движущейся материи, что само сознание есть отражение в мозгу человека этой движущейся материи (в условиях существования человеческого общества). Задача методологического анализа заключается, в частности, и в том, чтобы указать на отличие понятия «физическая реальность» от категории материи, или объективной реальности.

Итак, поскольку задача заключается не в том, чтобы признать правомерность термина «физическая реальность» или, наоборот, отвергнуть его, а в том, чтобы выяснить смысл и значение понятия, фактически уже функционирующего в физической науке, обратимся прежде

всего к мнениям самих физиков о содержании данного понятия. Вот мнение А. Эйнштейна: «Когда физики предпочитают пути, проложенные Ньютоном,— писал он,— то доминирует следующее представление о физической реальности: реальность—это материя; материя испытывает только такие изменения, которые мы воспринимаем как движение в пространстве. Движение, пространство, время—это реальные формы» [10, стр. 255]. Согласно системе Ньютона (т. е. классической физике), подчеркивал в другой работе А. Эйнштейн, «физическая реальность» или «внешний мир» («вера в существование которого независимо от воспринимающего субъекта лежит в основе всего естествознания») «характеризуется понятиями пространства, времени, материальной точки, силы (или эквивалентным ей взаимодействием материальных точек)» [11, стр. 7]. Подводя итоги развития теории относительности и связывая завершение ее с созданием «единой теории поля», А. Эйнштейн писал: «Пространство, выведенное на свет при помощи телесного объекта, поднятое на уровень научной реальности Ньютоном, поглотило в последние десятилетия эфир и готовится поглотить поле и тела, так что оно останется единственным теоретическим представителем реальности» [12, стр. 21].

Итак, А. Эйнштейн подчеркивает «идентичность» понятий «физическая реальность» и «внешний мир»; «физическая реальность» может испытывать только такие изменения, которые воспринимаются как движение в пространстве.

Опираясь на эту концепцию, А. Эйнштейн указывает средства установления существования «физической реальности» (внешнего мира) в физической науке, оценивает квантовую механику и высказывает прогнозы о будущем развитии физики. В известной полемике с Н. Бором о теоретико-познавательных предпосылках квантовой механики, А. Эйнштейн (1935 г.) подчеркивал: «...Если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью (т. е. вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой величине» [13, стр. 440—441]. И позже (1949 г.) А. Эйнштейн отмечал: «Мне должно казаться ошибочным предположение, что теоретическое

описание следует ставить в прямую зависимость от актов эмпирического наблюдения, что, как мне кажется, непременно имеет место в принципе дополнительности Бора» [14, стр. 233]. Соответственно А. Эйнштейн считал, что квантовая механика является важной, но все-таки лишь промежуточной ступенью на пути создания фундаментальной теории явлений микромира. «Некоторые физики, в том числе и я сам, не могут поверить, что мы раз и навсегда должны отказаться от идеи прямого изображения физической реальности в пространстве и времени или что мы должны согласиться с мнением, будто явления в природе подобны игре случая» [10, стр. 76]. Квантовая механика в существующей форме дает «неполное и не прямое описание реальности, которое позже будет заменено опять полным и прямым», — не устал повторять А. Эйнштейн [15, стр. 128].

Любопытно, однако, обратить внимание на то, как сам А. Эйнштейн отражал атаки тех критиков созданной им ОТО, которые считали, что, согласно этой теории, гравитационное поле — нечто чисто фиктивное, поскольку зависит от выбора наблюдателем системы отсчета (приводимые ниже рассуждения А. Эйнштейна являются прекрасной иллюстрацией того, насколько веские основания имел Н. Бор, когда в полемике против А. Эйнштейна ссылаясь на... СТО и ОТО): «... Мы четко различаем величины, принадлежащие физической системе (независимо от выбора координатной системы), и величины, которые зависят от координатной системы (А. Эйнштейн в ОТО не различает систему координат и систему отсчета. — П. Д.). Далее, следовало бы потребовать, чтобы физика вводила в свои законы лишь величины первого рода. На деле же выяснилось, что этот путь практически нереален, как ясно показало развитие классической механики... Обойтись без координатной системы оказалось невозможно, и необходимо было использовать значения координат, которые не свободны от определения измерения» [10, стр. 242]. Таким образом, теория относительности, опираясь на систему отсчета, использует как физические величины, принадлежащие исследуемой физической системе независимо от системы отсчета, так и те величины, которые зависят от системы отсчета. В ОТО «четыре координаты пространственно-временного континуума являются совершенно произвольно выбранными парамет-

рами, каждый из которых имеет самостоятельный физический смысл. Частично этот произвол переносится и на те величины (компоненты поля), с помощью которых описывается физическая реальность. Только некоторые, в общем довольно сложные выражения, образованные из компонент поля и координат, соответствуют величинам, измеряемым независимо от координатной системы (т. е. реальным величинам). Так, например, компонентам гравитационного поля в некоторой пространственно-временной точке вовсе не соответствует величина, не зависящая от выбора координат. Таким образом, «физическая реальность» соответствует вовсе не гравитационному полю, *взятому самому по себе*, но только этому же полю вместе с другими данными. Поэтому нельзя сказать ни того, что гравитационное поле само по себе есть нечто «реальное», ни того, что оно «чисто фиктивно» [10, стр. 242]. Таким образом, по мнению самого же Эйнштейна, в ОТО речь идет не о «физической реальности» гравитационного поля, а о «физической реальности» гравитационного поля вместе с определенными величинами, зависящими от системы отсчета.

А вот мнение о «физической реальности» копенгагенской школы физиков. Согласно Н. Бору, описание явлений природы до квантовой механики «покоится в конечном счете на предпосылке, что само наблюдение данного явления на последнее существенно не влияет... По квантовому постулату, однако, всякое наблюдение атомных явлений связано с таким взаимодействием последних со средствами наблюдения, которым нельзя пренебречь, и поэтому невозможно приписать самостоятельную физическую реальность в обычном смысле как феномену, так и средству наблюдения» [16, стр. 307]. И еще: «Понятие дополнительности ни в коем случае не предполагает отказа от нашего положения независимых наблюдателей природы; это понятие нужно рассматривать как логическое выражение нашей ситуации по отношению к объективному описанию в этой области опытного знания. Взаимодействие между измерительными приборами и исследуемыми физическими явлениями составляет неотъемлемую часть квантовых явлений. Признание этого факта... заставило нас, при упорядочении опыта, обращать должное внимание на условия наблюдения» [17, стр. 457]. В. Гейзенберг пишет о том, что «наблюдение играет

решающую роль в атомном событии и что реальность различается в зависимости от того, наблюдаем ли мы ее или нет» [18, стр. 31—32]. Представление о реальности в физическом мире на протяжении последнего столетия «стало несколько проблематичным...— замечает М. Борн.— Наивный подход к проблеме реальности, который был столь успешным в классический, или ньютоновский, период, оказался неудовлетворительным. Современные теории требуют новой формулировки». Дело в том, развивает эту мысль дальше М. Борн, что «наблюдение или измерение относится не к явлению природы как таковому, а только к аспекту, под которым оно рассматривается в системе отсчета, или к проекциям на систему отсчета, которая, само собой разумеется, создается всей применяемой обстановкой». Именно идея инвариантов (инварианты как индикаторы объективной реальности в каждой физической теории) «является ключом к рациональному понятию реальности, и не только в физике» [19, стр. 267, 269, 279, 276].

Как отмечает М. А. Марков, «физическая реальность» является «новым физическим понятием квантовой теории. Под физической реальностью понимается та форма реальности, в которой реальность проявляется в макropriборе» [7, стр. 163]. «Основной элемент», составляющий предмет квантовой механики,— это «результат взаимодействия атомного объекта с классически описываемым прибором»; «за основу описания явлений» в квантовой механике принимается «акт взаимодействия объекта с прибором», подчеркивает В. А. Фок [20, стр. 11, 13].

Какие же предварительные выводы можно сделать из приведенных выше высказываний? Во-первых, понятие «физическая реальность» (термины варьируются — «физическая реальность», «реальность», «результат взаимодействия объекта с прибором» и т. п.) выступает одним из основных понятий физики XX в. Говоря точнее, это понятие органически связано с таким важнейшим элементом физического знания, как теория (а не, допустим, картиной мира). Во-вторых, в квантовой механике (по сравнению с предшествующими физическими теориями) существенным образом меняется содержание понятия «физическая реальность» (причем, например, А. Эйнштейн считает это явление временным, преходящим). Наконец, содержание термина «физическая реальность» связано,

с одной стороны, с категорией материального мира, или объективной реальности, и, с другой стороны, с категориями объекта и субъекта познания (с характеристиками исходного познавательного процесса). Остановимся на последнем замечании более подробно. Рассмотрим сначала первую часть указанного замечания (ибо вторая часть — предмет всего последующего изложения).

Введение понятия «физическая реальность» вовсе не связано однозначным образом ни с отрицанием существования внешнего физического мира независимо от сознания исследователя, ни с попытками «доказательства» бессодержательности понятия внешнего физического мира. Иными словами, введение понятия «физическая реальность» нисколько не изменяет важнейшей предпосылки физического знания — признания существования внешнего физического мира независимо от сознания исследователя¹; больше того, само определение этого понятия опирается на эту предпосылку. У Эйнштейна это следует как нечто само собой разумеющееся. «Физика есть стремление осознать сущее как что-то такое, что мыслится независимым от восприятия. В этом смысле, — пишет он, — говорят о «физически реальном» [10, стр. 161—162]. У физиков же копенгагенской школы понятие «физическая реальность» уже отделено от исходной предпосылки физического знания (последняя, естественно, шире, нежели понятие «физическая реальность»). Мнение Н. Бора о том, что квантовая механика «ни в коем случае не предполагает отказа от нашего положения независимых наблюдателей», выше уже приводилось. В другом месте Н. Бор обращает внимание на то, что ни в теории относительности, ни в квантовой механике «расширение рамок наших понятий не предполагает какой-либо ссылки на наблюдающий субъект (эта ссылка была бы препятствием для однозначной передачи опытных факторов» [6, стр. 147].

Аналогичные мысли высказывают В. Гейзенберг, М. Борн и другие. В. Гейзенберг неоднократно отмечает,

В дальнейшем речь идет исключительно о соотношении исходной предпосылки любого физического знания (признание существования внешнего физического мира независимо от сознания наблюдателя) и понятия физической реальности в новых физических теориях XX в. Вопрос о философских и общественно-политических взглядах упоминаемых физиков здесь не рассматривается.

что «физик должен постулировать в своей науке, что он изучает мир, который не он изготовил и который существовал бы без значительных перемен, если бы этого физика вообще не было» [21, стр. 89]; «безусловно, квантовая теория не содержит действительно никаких субъективных черт, и она вовсе не рассматривает сознание физика как часть атомного события»; «нашей задачей не может являться высказывание пожеланий относительно того, какими должны быть, собственно говоря, атомные явления. Нашей задачей может быть только понимание их». И далее: «В экспериментах с атомными процессами мы имеем дело с вещами и фактами, которые столь же реальны, сколь реальны любые явления повседневной жизни» [18, стр. 34, 103, 158]. «Решающим фактором» развития всего естественнонаучного знания, в том числе и физического, как утверждает М. Борн, является «необходимость признания человеком внешнего реального мира, устойчивого и существующего независимо от человека, и его способность идти вразрез со своими ощущениями там, где это нужно для сохранения данного убеждения»; естествоиспытатель «должен быть реалистом, он должен видеть в своих чувственных впечатлениях нечто большее, чем галлюцинации, а именно информацию, идущую от реального внешнего мира»; «все великие открытия в экспериментальной физике обязаны интуиции людей, откровенно использовавших модели, которые для них были не продуктом их фантазии, а представителями реальных вещей» [19, стр. 33—34, 207].

Итак, и А. Эйнштейн, и копенгагенская школа физиков сходятся в том, что применяют термин «физическая реальность», однако расходятся в отношении понимания этого термина. Это расхождение не обусловлено различием в решении основного вопроса философии (применительно к физике), ибо и А. Эйнштейн, и копенгагенская школа физиков сходятся в материалистическом ответе на указанный вопрос (в рамках физики). Вообще говоря, здесь уместно привести слова французской ученой М. А. Тоннела о том, что сейчас «объективность внешнего мира, независимо от нашего сознания, является постулатом, принимаемым каждым физиком. Разумеется, такое понимание не должно обязательно связываться с реалистической онтологией, оно значит, что физика, по определению, есть наука о внешнем мире, постижимом

нами»² [22, стр. 195]. Поскольку исходной предпосылкой (постулатом) физического знания является материалистическое решение основного вопроса философии, то, следовательно, и смысл одного из элементов физического знания — понятия «физическая реальность» предполагает существование физического мира независимо от сознания наблюдателя. Этим, разумеется, лишь устанавливается в общем соотношение между постулатом о существовании внешнего мира и термином «физическая реальность», но еще не раскрывается содержание этого термина.

Опираясь на высказывания создателей современных физических теорий и принципиальные результаты этих теорий, проведем методологический анализ содержания понятия «физическая реальность» в свете диалектико-материалистической гносеологии, в первую очередь сквозь призму категорий объекта и субъекта познания. Такой анализ (здесь излагаются его конечные результаты) приводит к выводу, что понятие «физическая реальность» выступает в современной физике в качестве характеристики познавательного процесса (поэтому недопустимо смешивать такие понятия, как «материя», «физический мир» и «физическая реальность») и что в основе расхождений между А. Эйнштейном и копенгагенской школой физиков лежат принципиальные различия в оценке гносеологической ситуации в физике XX в.

Применительно к физическому знанию можно сформулировать следующую исходную модель познавательного процесса: взаимосвязь объектов физической науки, условий познания и исследователя [24]. Под объектами физической науки подразумеваются какие-либо фрагменты материального физического мира и их связи или же их идеальные образы, на которые направлена либо материально-практическая, либо теоретическая деятельность исследователя. Объекты физической науки рассматриваются на уровне эксперимента (исходное гносеологическое отношение) и на уровне теории, теоретического знания (производное гносеологическое отношение). Будем различать также эмпирические и теоретические объекты производного гносеологического

Любопытно замечание одного из участников Женевской конференции по физике высоких энергий (Йоста): «Каждый физик, естественно, знает о существовании частиц, зачем это нужно доказывать?» [23, стр. 746].

отношения: эмпирические объекты охватывают определенные стороны объектов физической науки на уровне эксперимента (или физических объектов) во всей их цельности и конкретности (событие, частица, волна), в то время как теоретические объекты характеризуют преимущественно общие, необходимые, существенные связи физических объектов (объектов на уровне эксперимента) и являются их логической реконструкцией (потенциал, интервал в СТО, ψ -функция). Разумеется, понятие «объект физической науки на уровне эксперимента» (физический объект) не идентично понятиям «тело», «вещь», «частица» и т. п.

Диалектико-материалистическое решение основного вопроса философии применительно к понятиям «объект физической науки» и «исследователь» («наблюдатель») заключается в том, что вне и независимо от сознания исследователя существует материальный физический мир, а сознание наблюдателя есть отражение в его мозгу этого мира; наблюдатель (исследователь) возникает, появляется лишь на определенном этапе развития материального мира; наконец, объект физической науки может быть лишь частью, аспектом физического мира, попавшего в поле зрения исследователя и им активно усваиваемого. Степень достоверности наших представлений об объектах физической науки (как эмпирических, так и теоретических) устанавливается на каждом этапе развития познания, в конечном счете, в процессе материально-практической и теоретической деятельности исследователя (проверка адекватности познания).

Активность исследователя (как субъекта познания) в современной физике может быть наиболее полно охарактеризована новым элементом модели теоретико-познавательного процесса, именуемым *«условиями познания»*. Под условиями познания на уровне эксперимента подразумеваются «фон» протекания исследуемых физических взаимодействий и средства их исследования, а именно системы отсчета и измерительные устройства, сконструированные на основе определенных теоретических предпосылок. Под условиями познания на уровне теории подразумеваются функционирующий в данной системе «язык наблюдений» (теоретическое представление условий познания на уровне эксперимента), а также условия и средства развертывания и функционирования

теоретических систем, а именно — исходное знание (необходимое для построения данной теории), включающее философские предпосылки, наглядные образы и модели, проверенные опытом базисные физические теории (механика Ньютона, СТО и т. п.), методологические принципы (принцип соответствия), фундаментальные понятия (координата, импульс и т. д.). Таким образом, условия познания выступают в физическом знании в качестве опосредствующих звеньев во взаимосвязи объектов физической науки и исследователя и, в конечном итоге, не могут быть целиком отнесены ни к определению объекта познания, ни к определению субъекта познания. Предлагаемая здесь исходная модель познавательного процесса характеризует специфику взаимосвязи объекта и субъекта познания в современной физике и опирается, естественно, на тезис К. Маркса о взаимодействии объекта и субъекта познания как исходной основе любого познавательного процесса.

Теперь можно сформулировать общее определение «физической реальности» в современной физике: *Под «физической реальностью» понимается процесс взаимодействия физических объектов и условий познания, а также его результат на уровне эксперимента (определенная форма данности объективной реальности), которые фиксируются, представляются, моделируются различным образом на различных уровнях познавательного процесса.* С этой точки зрения можно говорить о «физической реальности» не только на уровне эксперимента (например, движение частицы в камере Вильсона)³, но и на уровне теории. Последний уровень, в свою очередь, подразделяется на два уровня знания [25] — эмпирический (описание треков в камере Вильсона) и теоретический (формулирование теории строения атомного ядра и т. п.). На каждом из этих последних уровней физик имеет дело с различными представлениями «физической реальности»: на эмпирическом уровне «физическая реальность» представлена определенными обобщениями, систематизациями данных измерительных устройств, а на теоретическом уровне «физическая реальность» представлена логической реконструкцией

³ На уровне эксперимента «физическая реальность» — результат взаимодействия физических объектов с измерительными приборами, фиксируемый специальными регистрирующими устройствами и нашими органами чувств.

результатов взаимодействия физических объектов и условий познания (на уровне эксперимента) в форме целостной системы — теории. Таким образом, понятие «физическая реальность» характеризует различные степени приближения (подхода) исследователя к материальному физическому миру.

В физике до появления СТО считалось, что содержание понятий «материальный физический мир» и «физическая реальность» (коль скоро употреблялся последний термин) совпадают, иными словами, классическая физика постулировала независимость исследуемых явлений от условий познания. Но уже в СТО явно устанавливается зависимость исследуемого явления от выбора систем отсчета (некоторые характеристики явления зависят от различных систем отсчета), т. е. результат взаимодействия физических объектов и условий познания представлен различным образом на уровне эксперимента и теории. Принцип относительности как раз и определяет степень независимости наблюдений от систем отсчета (ориентации измерительных устройств). В квантовой механике еще в большей степени учитывается воздействие условий познания на исследуемые физические объекты (рассмотрение физических объектов по отношению уже к различным классам приборов и т. д.). Физики вынуждены были считаться с фактом гносеологической активности исследователя в процессе познания материального физического мира (отказ от созерцательного характера познавательного процесса): этот факт получил отражение в появлении такой характеристики познавательного процесса в физике, как «физическая реальность». И если понятие «материальный физический мир» характеризует исходную и конечную цель познания (нечто первичное по отношению к сознанию человека), то понятие «физическая реальность» характеризует форму данности исследователю этого мира при различных условиях познания с помощью различных языковых (в широком смысле) средств.

В истории развития физики XX в. имели место попытки сведения понятия материального «внешнего физического мира» к понятию «физическая реальность» на различных уровнях познания. Отождествление понятий материального «внешнего физического мира» и «физической реальности» на уровне эксперимента лежит в осно-

ве механистически-метафизических материалистических интерпретаций релятивистской и квантовой физики (исследуемые физические явления пытаются рассматривать «сами по себе», вне учета условий и средств наблюдения). Игнорирование активности субъекта познания с помощью выбора условий познания (при постулировании инвариантности физических законов) с неизбежностью приводит либо к попыткам «классической» интерпретации новых теорий, либо к попыткам отрицания научности этих теорий. Субъективные идеалисты, в том числе и неопозитивисты, сводят внешний физический мир к «физической реальности» на эмпирическом уровне знания (представление результата взаимодействия физических объектов и условий познания): показания измерительных приборов рассматриваются в качестве «конечной реальности» физиков, а систематизация этих показаний объявляется единственной задачей физической науки. Поскольку же результат взаимодействия физических объектов с измерительными устройствами зависит в определенной степени от выбора исследователем указанных устройств, то, следовательно, представляется возможность выдать «конечную реальность» за результат деятельности самих физиков. Наконец, сведение понятия «внешний физический мир» к понятию «физическая реальность» на теоретическом уровне лежит в основе объективно-идеалистических интерпретаций СТО, ОТО и квантовой механики. Поскольку «физическая реальность» здесь представлена как логическая реконструкция результатов взаимодействия физических объектов с условиями познания (выбор которых зависит от исследователя) на уровне эксперимента, то представляется возможность представить теоретическую деятельность исследователей как конструирование «внешнего физического мира».

Как явствует из вышеизложенного, все три концепции являются несостоятельными и вступают, естественно, в противоречие с подлинным ходом и результатами физических исследований. Цель физического познания — исследование закономерностей и свойств материального физического мира; но эта цель реализуется по-разному на различных уровнях познания, и степень адекватности познания зависит от условий познания. Представление об объективной реальности не исчерпывается на каком-то одном уровне знания, каждый из них обладает своими

достоинствами и недостатками, «несёт на себе печать» активности субъекта познания, стремящегося проникнуть в сущность явлений, снять результат своего воздействия на исследуемые физические объекты, получить абсолютную истину.

Несколько слов об «инвариантной концепции реальности» М. Борна [19, стр. 267 и сл.], которую более точно следовало бы назвать концепцией Планка — Эйнштейна — Борна. Суть этой концепции заключается, как известно, в том, что инварианты считаются «представителями реальности» в физической теории. С развиваемой здесь автором точки зрения инварианты являются характеристиками физических объектов «самих по себе» на теоретическом уровне знания («безотносительно» к условиям познания). Поскольку физическая теория формулируется для объяснения закономерностей и свойств совокупности физических объектов, то, следовательно, инвариантам и инвариантным соотношениям отдается определенное предпочтение по сравнению с относительными величинами. «Физическая реальность» характеризуется как инвариантами, так и неинвариантными величинами и соотношениями; последние являются такими же объективными характеристиками (в смысле указания материального источника наших знаний), как и инварианты. Следовательно, рациональный смысл «инвариантной концепции реальности» заключается в том, что именно инварианты воплощают в себе на теоретическом уровне знания идеал объективного описания классической физики — абстрагирование исследуемых объектов от условий познания. Фактически же, как свидетельствует принципиальное содержание современных физических теорий, теоретический уровень знания включает характеристики объектов познания, а также условия познания в их отношении к физическим объектам и исследователям.

В заключение остановимся на известной дискуссии А. Эйнштейна и Н. Бора, этих двух гигантов физической мысли XX в., о принципиальных основаниях квантовой механики. Одним из основных вопросов дискуссии и был вопрос о природе «физической реальности». В этой дискуссии А. Эйнштейн отстаивал концепцию классической физики об отождествлении «физической реальности» с внешним физическим миром, а также предположение о возможности получения исключительно «инвариантного»

знания в масштабах одной физической теории (наличие в квантовой механике характеристик, связанных с измерительными операциями, в первую очередь ψ -функции, А. Эйнштейн рассматривал как неполноту теории). Н. Бор же отстаивал понимание «физической реальности» как теоретико-познавательной характеристики результата взаимодействия физических объектов и условий познания, подчеркивая невозможность получения исключительно «инвариантного» знания в масштабах одной физической теории. При этом Н. Бор вполне резонно ссылался на гносеологические следствия, вытекающие из релятивистских теорий Эйнштейна, согласно которым «физическая реальность» относительна. Эти теории также похоронили надежды физиков получить исключительно «инвариантное» знание в рамках одной физической теории. Возможность же исчерпывающего «инвариантного» описания материального физического мира, в смысле совпадения объективности, абсолютности и объективности знания об этом мире, как свидетельствует опыт истории развития физики и учит диалектико-материалистическая теория познания, в принципе может быть осуществлена лишь непрерывно расширяющейся совокупностью физических теорий и физических картин мира, их определенным синтезом. Как видно, дискуссия А. Эйнштейна и Н. Бора по существу не связана с отказом копенгагенской школы физиков от основной предпосылки физического знания — признания существования материального физического мира и объективности физического знания в смысле признания источником его материального физического мира; эта дискуссия касалась теоретико-познавательных предпосылок современного физического знания и была обусловлена отказом этой школы физиков от гносеологических идеализаций классической физики (в первую очередь это касается положения о независимости описания исследуемых физических явлений от условий познания).

Создатели современных физических теорий, не используя сознательно диалектико-материалистическую философию, в значительной мере были вынуждены «переоткрывать» диалектику познавательного процесса, сформулированную классиками марксизма-ленинизма до появления указанных теорий. Это вовсе не означает, конечно, будто физика «сама себе философия», а лишь

свидетельствует об осуществлении ленинского прогноза, что современная физика «рожает диалектический материализм». Отход современной физики от гносеологических идеализаций классической физики, расширение и углубление теоретико-познавательных предпосылок релятивистских и квантовых теорий, опиравшихся на признание существования физического мира независимо от сознания исследователя, является крупным шагом вперед на пути абсолютного, исчерпывающего познания мира как движущейся материи, связанным с усовершенствованием средств познания современной науки и изменением образа мышления естествоиспытателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Марков. О природе физического знания.— «Вопросы философии», 1947, № 2; он же. О современной форме атомизма.— «Вопросы философии», 1960, № 3, 4.
2. В. А. Фок. Критика взглядов Бора на квантовую механику.— «УФН», т. XLV, вып. 1, 1951; он же. Замечания к статье Бора о его дискуссиях с Эйнштейном.— «УФН», т. LXVI, вып. 4, 1958; он же. Об интерпретации квантовой механики.— «Философские проблемы современного естествознания». М., 1959; он же. Квантовая физика и строение материи. Л., 1965.
3. М. Е. Омеляновский. Принцип спостережуваності у фізиці.— «Вісник АН УССР», 1947, № 4 (132); М. Э. Омеляновский. Проблема наглядности в физике.— «Вопросы философии», 1961, № 11; он же. Философская эволюция копенгагенской школы физиков.— «Вестник АН СССР», 1962, № 9.
4. См. А. А. Фридман. Мир как пространство и время. М., 1965.
5. См. «Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии». Киев, 1965; «Методологические проблемы теорий измерений». Киев, 1966.
6. Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., 1961.
7. М. А. Марков. О природе физического знания.— «Вопросы философии», 1947, № 2.
8. В. А. Фок. Об интерпретации квантовой механики.— «Философские проблемы современного естествознания». М., 1959; он же. Квантовая физика и строение материи. Л., 1965.
9. См. В. И. Ленин. Полное собрание сочинений, т. 18.
10. А. Эйнштейн. Физика и реальность. М., 1965.
11. А. Эйнштейн. Влияние Максвелла на развитие представлений о физической реальности.— «Эйнштейновский сборник». М., 1966.
12. А. Эйнштейн. Проблема пространства — поля эфира в физике.— «Русско-Германский вестник науки и техники». Москва — Берлин, 1930, № 1(3).
13. В. А. Фок, А. Эйнштейн, Б. Подольский, Н. Розен, Н. Бор. Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным? — «УФН», т. XVI, вып. 4, 1936.

14. А. Эйнштейн. Ответ на критику.— «Философские вопросы современной физики». М., 1959.
15. А. Эйнштейн. Квантовая механика и действительность.— «Вопросы философии», 1957, № 3.
16. Н. Бор. Квантовый постулат и новое развитие атомистики.— «УФН», т. VIII, вып. 3, 1928.
17. Н. Бор.— «УФН», т. XVI, вып. 4, 1936.
18. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
19. М. Борн. Физика в жизни моего поколения. М., 1963.
20. В. А. Фок. Квантовая физика и строение материи. Л., 1965.
21. В. Гейзенберг. Развитие интерпретации квантовой теории.— «Нильс Бор и развитие физики». М., 1958.
22. М. А. Тоннела. Обновление понятия относительности в физике Эйнштейна.— «Эйнштейновский сборник». М., 1966.
23. «УФН», т. 85, вып. 4, 1965.
24. Более подробно см.: П. С. Дышлезый. Объект, субъект и условия познания в физике.— «Методологические проблемы теории измерений». Киев, 1966; он же. Философское значение общей теории относительности и методов Эйнштейна.— «Пространство и время в современной физике». Киев, 1968.
25. А. А. Зиновьев. Два уровня в научном исследовании.— «Диалектика — теория познания. Проблемы научного метода», М., 1964; В. А. Смирнов. Уровни знания и этапы процесса познания.— «Проблемы логики научного познания». М., 1964.

Б. Я. Пахомов

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И ПОЗНАВАЕМОСТЬ ОБЪЕКТИВНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

1

Одной из центральных философских проблем квантовой теории (и в первоначальной, нерелятивистской, и в современной, релятивистской ее форме) является, как известно, проблема отражения в нашем знании объективной реальности. Эта проблема может быть сформулирована следующим образом: возможно ли в области квантовых процессов на основании информации, получить которую можно только в процессе наблюдения с применением приборов, построить теорию, позволяющую судить о поведении и свойствах объектов вне всякого наблюдения, вне взаимодействия с приборами или макроскопическими телами — аналогами приборов?

В рамках классической физики этот вопрос, как известно, имел положительное решение, в то время как в рамках квантовой теории широко распространен отрицательный ответ. Именно это обстоятельство явилось основой многолетних полемических выступлений А. Эйнштейна против так называемой копенгагенской интерпретации, основной лейтмотив которой В. Гейзенберг сформулировал следующим образом: «...Эта интерпретация все-таки не дает никакого описания того, что происходит на самом деле, независимо от наблюдений или между нашими наблюдениями. Что-нибудь должно ведь, однако, происходить — в этом мы можем не сомневаться» [1, стр. 116].

2

Концепция, согласно которой знать реальность вне наблюдения в области квантовых явлений невозможно, представляется логически весьма неоднородной, а потому и непоследовательной. Одни аргументы носят характер ссылок на особенности познающего субъекта, другие — на особенности микрочастиц, причем остается неясным, где причины и где следствия. (Эту двойственность аргументации можно проследить и у Н. Бора, и у В. Гейзенберга.) Должны ли мы считать, что, например, соотношение неопределенностей есть просто выражение на языке математики неизлечимой ограниченности мыслительных способностей познающего субъекта (необходимость применять раз и навсегда заданные — кем или чем? — понятия в той области, где они заведомо неприменимы), или этот закон все же выражает специфику поведения микрочастиц, или он несет на себе в определенном сочетании (каком именно?) и отпечаток особенностей объекта, и отпечаток особенностей субъекта?

В этой связи представляется важным четко различать два тесно связанных, но все же принципиально различных вопроса — вопрос о том, каким путем приобретаются наши знания об объективной реальности, и вопрос о том, имеют ли приобретенные знания объективное (т. е. независимое от субъекта и применяемого им способа получения этих знаний) содержание. На наш взгляд, в докладе П. С. Дышлевого второй вопрос оказался упущенным, а потому вся про-

блема получает одностороннее и в ряде пунктов весьма спорное освещение. Трудно согласиться с таким вариантом теории познания, в котором рассматривается только способ получения знания, но полученные результаты не оцениваются с точки зрения их объективной истинности, т. е. наличия такого содержания, которое не зависит ни от человека, ни от человечества, хотя и получено как результат деятельности познающего субъекта.

Конечно, истина есть процесс, но в этом процессе есть свои относительно завершённые результаты, относительно устойчивое знание, которому можно и нужно дать гносеологическую оценку, иначе получится своеобразный вариант «диалектического агностицизма» (процесс есть, а результатов нет).

Если говорить о способе получения знаний, то несомненно, что без субъекта процесса познания нет и быть не может. Без познающего субъекта квантовая теория возникнуть не могла (даже у человека она появляется не сразу — мы ведь отмечаем всего лишь 40-летие этой теории). Совершенно ясно, что здесь специфика квантовой теории ни при чем — это общее (и притом весьма тривиальное) положение теории познания. Доказывать это положение — значит ломиться в открытую дверь. Столь же ясным является и то, что познание микрочастиц невозможно без применения прибора — просто в силу того, что нашим органам чувств они недоступны.

Гораздо более сложным является второй вопрос — что же мы знаем в результате относительного завершения некоторого этапа процесса познания? Это уже вопрос не о способе получения исходных данных для построения научной теории, а о характере самой теории.

В гносеологическом плане утверждение, будто теория представляет собой описание поведения приборов по той якобы причине, что приборы служат единственным первоисточником наших знаний о микромире, является столь же ошибочным, как и утверждение, будто наши знания представляют собой лишь описания наших ощущений по той якобы причине, что ощущения служат единственным первоисточником всех наших знаний.

Полная несостоятельность такой плоско эмпирической теории познания была выяснена задолго до возникновения квантовой теории и — пусть не обвинят нас в догматизме — возникновение квантовой теории в этом

вопросе абсолютно ничего не меняет. Ощущения действительно являются первоисточником всех наших знаний, но наши знания отнюдь не являются описанием взаимной связи наших ощущений (они являются отображением объективной реальности). Приборы действительно являются единственным источником первичной информации о микромире, но отсюда никак не следует вывод, будто построенная на основе этой информации физическая теория именно по этой причине должна рассматриваться лишь как описание взаимной связи показаний приборов.

И в том, и в другом случае решающее значение имеет то фундаментальное для теории познания обстоятельство, что через посредство выдвижения и экспериментальной проверки создаваемых творческим мышлением гипотез научная теория неизбежно выходит за узкие рамки непосредственно данного человеку, позволяет получить объективно достоверную картину того, что происходит в мире независимо от наших ощущений и независимо от наших приборов. Невозможно отрицать, что именно такая творческая деятельность человеческого мышления, неизбежно выходящего за рамки непосредственно данного, создала и саму квантовую теорию, и ее последующие обобщения (только один из бесчисленного числа примеров — гипотеза кварков).

Разумеется, здесь сразу же возникает вопрос — а как это возможно? Разве действительность не дана нам в сугубо человеческих формах чувственности, разве не взаимодействуем мы с ней на основе сугубо человеческих форм деятельности и разве не строим мы творчески теорию на основе сугубо человеческих форм мыслительной деятельности, являющихся отражением наших человеческих форм чувственно-практической деятельности? Разве не следует отсюда, что природа может нам быть известна только субъективно, а не объективно, не так, как она есть сама по себе?

Вопрос этот вовсе не является новым, как не является новым словом в теории познания и решение его по формуле «мы знаем только человеческую истину».

В истории философии творческая активность субъекта была с особой силой подчеркнута Кантом, но подчеркнута столь односторонне, что субъективное и объективное оказались в абсолютном противопоставлении, были

разгорожены непроходимой стеной. В то же время и творческая активность субъекта была вскрыта не полностью, поскольку Кант:

а) игнорировал материально-практическую деятельность человека;

б) рассматривал формы познавательной деятельности как вечные и неизменные, игнорируя творческий процесс развития и совершенствования людьми своих форм познавательной деятельности.

Хорошо известно, что Гегель с позиции диалектики резко критиковал дуализм Канта, подчеркивая, что противоположность субъективного и объективного относительна и существует лишь на основе их глубокого единства, что диалектически развивающиеся формы субъективной логики совпадают с наиболее общими законами объективной действительности. Разумеется, гегелевский принцип тождества бытия и мышления является идеалистическим, но является несомненным историческим фактом, что мыслители, шедшие к материализму от Гегеля (Фейербах, Маркс — и «молодой», и «поздний», — Энгельс, Герцен), равно как и последователи Маркса (В. И. Ленин, Г. В. Плеханов), осмысливая этот принцип материалистически, рассматривали единство природы и человеческого общества, единство законов природы и законов материальной практической деятельности человека, единство наиболее общих законов природы и законов познавательной деятельности как важнейшее положение философии и, в частности, теории познания (принцип единства бытия и мышления, единства диалектики, логики и теории познания).

Верно, что мы можем отражать действительность только в сугубо человеческих формах отражения (эта истина просто тривиальна, так как человеку не могут быть присущи нечеловеческие формы отражения), но это ровно половина истины, и когда половину истины выдают за полное решение вопроса, то получается ложный ответ. Для полного решения вопроса необходимо в соответствии с принципами диалектики Маркса ответить на вопрос — как возникли и как развивались «сугубо человеческие» формы деятельности и формы отражения. Общественный человек не стоит вне природы, он есть часть природы, и он может успешно взаимодействовать с ней в своей практике лишь тогда, когда его деятельность

осуществляется в соответствии с объективными законами самой природы, а не вопреки им. Соответственно этому и формы познавательной деятельности, формы мышления, возникающие на основе практической деятельности и постоянно проверяемые ею, творчески создаются мыслящим человеком в поисках соответствия с объективными законами природы, а не произвольно. Законы логики суть осознанные законы бытия. «Сугубо человеческие» формы деятельности (практической и теоретической) суть отражение (разумеется, лишь приблизительно верное) объективных, независимо от человека и его деятельности существующих законов, распространяющихся и на деятельность самого человека, который есть не только субъект, но также и объект, материальное существо, из атомов, из элементарных частиц, в конечном счете из кварков (если они существуют) состоящее и потому подчиненное не только социальным (тоже объективным!), но и биологическим, химическим, физическим, квантовым закономерностям, и которое возникнуть могло лишь в силу действия всех этих закономерностей.

Взаимодействие субъекта с объектом может происходить лишь в соответствии с естественными свойствами этого объекта, а потому в принципе по тем же законам происходит взаимодействие объектов между собой в отсутствие человека. Сказанное позволяет сформулировать важный для гносеологии принцип инвариантности, который мы, в отличие от физических принципов инвариантности, могли бы называть принципом гносеологической инвариантности (или, может быть, гносеологически-онтологической инвариантности). Он состоит в том, что свойства объекта и законы его взаимодействия с другими объектами таковы же, как и его свойства и законы взаимодействия по отношению к субъекту и применяемым им орудиям труда и исследовательской деятельности (это можно рассматривать также как одно из следствий того, что субъект есть также и объект).

3

Правильный ответ на вопрос А. Эйнштейна: «что происходит с микрочастицей, когда нет наблюдения?» — таков: с ней происходит то же самое, что и в случае наблюдения. Оговоримся немедленно, что сказанное нуж-

но понимать в следующем смысле: если K -мезон распадается на два π -мезона в пузырьковой камере, то то же самое происходит с ним и вне ее; если K -мезон обнаруживает странность —1, вступая в сильное взаимодействие с протоном рабочего вещества пузырьковой камеры, то то же самое может с ним произойти при столкновении с протоном вне пузырьковой камеры. Другими словами, если микрочастица вне наблюдения вступает в такое же взаимодействие, как и в экспериментальной установке, с ней происходит в точности то же самое, что и в условиях наблюдения.

Это есть принцип теории познания, который в квантовой теории столь же верен, как и в классической физике, принцип, который на каждом шагу используется каждым физиком в его работе. Отказ от этого принципа немедленно превратил бы науку в занятие, лишенное всякого серьезного смысла. Во всяком случае, мы были бы лишены какой бы то ни было возможности применять науку ко всем тем явлениям природы, которые совершаются в тот момент, когда человек не присутствует или когда он просто обратил свой взгляд в другую сторону.

В свете указанного утверждение, будто квантовая теория (мы имеем в виду общепринятый ее вариант) относится только к описанию процесса наблюдения, должно быть расценено как ошибочное — и с философской точки зрения, и с точки зрения фактического положения вещей в практике физического исследования.

4

Однако утверждения об особой роли процесса измерения в квантовых явлениях имеют определенные основания — только не в принципах теории познания, а в особенностях микромира. Обратимся еще раз к приведенным выше примерам. Нейтральный K -мезон распадается на два π -мезона и под наблюдением, и без него, однако определенное значение комбинированной четности в общем случае не может быть приписано частице, пока распад фактически не произошел. Нейтральный K -мезон может обнаружить странность —1, вступив в сильное взаимодействие с протоном в экспериментальной установке и вне ее, но, пока он не вступил в сильное взаимо-

действие, ему не может быть в общем случае приписано определенное значение странности. То же самое придется сказать о значениях импульса и координаты, направлении спина и т. д.

Относительность к виду взаимодействия — вот философски правильное наименование той специфической особенности свойств микрочастиц, которую часто стараются изобразить как относительность к прибору или к процессу наблюдения. Суть дела не в наблюдении самом по себе, а в характере взаимодействия — будь то взаимодействие с частицами, входящими в структуру прибора, или такое же взаимодействие с такими же частицами в естественных условиях.

Относительность к виду взаимодействия является основанием и той специфической черты квантовых явлений, которая называется дополнительностью и которая состоит в том, что проявление одних свойств исключает проявление других, характерных для иного по своему характеру взаимодействия.

5

В таком случае вопрос Эйнштейна может быть поставлен в новой форме: что же происходит с микрочастицей в промежутке между взаимодействиями, в которых выявляются определенные значения тех или иных физических величин? Ведь что-то должно происходить, а следовательно, и найти отражение в теории?

Несомненно, что любая микрочастица *постоянно* находится во взаимодействии; в то же время квантовая теория утверждает, что, несмотря на это (а может быть, и именно благодаря этому), по крайней мере некоторые физические величины не имеют определенного значения до осуществления весьма специфического взаимодействия, которое в широко распространенной интерпретации квантовой теории принято называть измерением. Обычное воздействие внешних сил на систему, подчеркивает, например, П. Дирак, «следует отличать от возмущения, вносимого измерением, поскольку первое совместимо с причинным описанием системы и с уравнениями движения, а второе — нет» [2, стр. 158]. О необходимости признать в квантовой механике два принципиально различных типа взаимодействия (процесс типа 1 — прерывный,

скачкообразный, не подчиненный уравнению Шредингера, статистический, и процесс типа 2, подчиненный уравнению Шредингера) пишет И. фон Нейман [3, гл. V, VI]. И. фон Нейман считает при этом, что принципиальное различие двух типов процессов обусловлено не физическими причинами, а участием в процессе типа 1 субъекта-наблюдателя: все дело, по его мнению, в наличии процесса субъективного восприятия, который является необходимым заключительным элементом измерения, но который не поддается до конца физическому описанию.

В рамках диалектико-материалистической теории познания нет никаких оснований рассматривать квантовую теорию как неудачную попытку дать описание физическими понятиями психологических процессов человека. Не дает для этого никаких оснований и сложившаяся вполне успешная практика применения квантовой теории к описанию физических процессов, происходящих независимо от какого бы то ни было наблюдения.

Остается одно: признать, что принципиальное различие процесса типа 1 и процесса типа 2 имеет глубокие *физические* основания.

Взаимодействие типа 2, в рамках которого существенное значение имеют явления интерференции представленных в суперпозиции состояний, есть проявление волновой природы микрочастицы. Взаимодействие типа 1, при осуществлении которого прекращается интерференция представленных в суперпозиции состояний, а физические величины, не имевшие до того определенных значений, становятся определенными, есть проявление корпускулярной природы микрочастиц.

6

Различие двух типов взаимодействия не порождено вмешательством измерения, но тем не менее оно имеет принципиально важные следствия для теории измерения и для понимания квантовой теории вообще. Процессы типа 2 (т. е. волновые) принципиально ненаблюдаемы, приборами любого устройства регистрируются исключительно только процессы типа 1, т. е. проявление корпускулярных свойств. О процессах типа 2 (например, интерференционных явлениях) можно судить только кос-

венно, на основании анализа результатов процесса типа 1 (это можно отчетливо видеть в хорошо известном примере прохождения частиц через экран с двумя щелями).

Если мыслить последовательно, то в данной ситуации есть две возможности. Первая состоит в том, чтобы в соответствии с довольно распространенной концепцией философского характера не признавать процессы типа 2 физически реальными. И действительно, такая точка зрения широко распространена в следующей форме: волны в квантовой теории не являются волнами какого-либо физически реального поля, это абстрактные волны вероятности, позволяющие лишь предсказывать результаты измерений (т. е. процессов типа 1). Едва ли, однако, можно назвать кого-либо из ученых, кто придерживался бы такого понимания строго последовательно. Все дело в том, что интерференционные, дифракционные, резонансные эффекты играют слишком большую роль в поведении микрочастиц, чтобы можно было полностью отрицать их физическую реальность и рассматривать их лишь как интерференцию наших мыслей.

В таком случае остается вторая возможность — признать физическую реальность волновых явлений, несмотря на их принципиальную ненаблюдаемость, но только быть при этом последовательным до конца и отказаться от утверждения, что волны — это только абстрактные, волны вероятности (это не обязательно означает, что ψ -функция есть прямое и непосредственное изображение этих волн, она может быть и косвенным их отображением).

Это приводит нас к признанию реального существования в микромире двух типов взаимодействия и соответственно двух типов объективной физической реальности, один из которых принципиально ненаблюдаем (повидимому, это верно для каждого из трех известных видов взаимодействия — электромагнитного, сильного и слабого).

Уместно сослаться в качестве прецедента на то важное обстоятельство, что поле и вещество также являются двумя такими же типами физической реальности: поле в отличие от вещества и от квантов поля принципиально ненаблюдаемо, о его наличии и характеристиках можно судить исключительно косвенно, по наблюдению над поведением частиц вещества (пробных тел).

Оба случая могут оказаться разными формами проявления одного и того же, если допустить, что волновые свойства микрочастиц суть особый случай проявления полевых свойств материи.

7

В обычной трактовке смысла волновой функции не содержится четкого указания на то, отражает ли волновая функция реальный процесс эволюции состояния микрочастицы до осуществления процесса типа 1 (измерения в обычном способе выражения) или относится исключительно только к результатам этого последнего процесса. Иначе: является ли задание волновой функции полностью эквивалентным заданию вероятностного распределения значений физических величин, которые частица проявит при измерении (или процессе типа 1), или задание волновой функции означает нечто большее, чем только это? Суждения на этот счет разноречивы.

С точки зрения первого понимания уравнение Шредингера никакого реального физического процесса не описывает, это лишь математическая процедура, позволяющая рассчитать вероятности проявления тех или иных значений физических величин в результате осуществления некоторого реального процесса, который, однако, уже не подчиняется этому уравнению.

С точки зрения второго понимания оно описывает реальный (но принципиально ненаблюдаемый) физический процесс типа 2, оказывающий реальное физическое влияние на результаты последующего осуществления процесса типа 1 (т. е. описывает реальную физическую эволюцию системы до измерения).

Имплицитно оба понимания содержатся в обычном понимании волновой функции и выявляются в зависимости от того, будут ли подчеркнуты слова «волновая функция характеризует объективные возможности» или слова «волновая функция характеризует совокупность вероятностей».

С точки зрения материалистической диалектики категория возможности обозначает не что-то, лишенное в настоящий момент реальности, а нечто реально существующее, действительное, но являющееся сверх того пред-

посылкой, источником некоторого другого будущего процесса, в настоящий момент еще не существующего.

Опираясь на довольно прочную традицию, укоренившуюся в практике физических исследований и на принципы материалистической теории познания, можно прийти к следующему пониманию.

Волновая функция имеет двойственный физический смысл. Она не только определяет статистику проявления определенных значений физических величин при взаимодействии типа 1 (измерении), для чего требуется осуществление большого числа актов такого взаимодействия, но характеризует также объективно реальное состояние единичной частицы до осуществления такого взаимодействия и происходящие с ней процессы волнового характера (типа 2), например интерференцию частицы самой с собой.

8

Когда физик говорит, что соотношение неопределенностей порождено ограниченностью наших познавательных возможностей, то он несомненно рассуждает философски, хотя и не обязательно истинно. Когда философ в поисках истины хочет доказать, что соотношение неопределенностей и вообще специфика квантовой теории проистекают не из особенностей субъекта, а из специфических особенностей самих микрочастиц, создается впечатление, что он рассуждает совсем не философски. Однако может оказаться, что именно в этом направлении и лежит путь к истине в сложном вопросе материалистической философской интерпретации квантовой теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
2. П. Дирак. Принципы квантовой механики. М., 1960.
3. И. фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М., 1964.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ НЕОБХОДИМОСТЬ
В ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОНЯТИЯ
«ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛЬНОСТЬ»?

Мне кажется, что понятие «физическая реальность» не нужно. Оно вносит только путаницу при философской интерпретации квантовой механики.

Известно, что о физической реальности стали говорить после опубликования известной полемики между Бором и Эйнштейном с сотрудниками [1, стр. 436]. В этой полемике Бор заявил примерно следующее: квантовая механика, по его мнению, заставляет пересмотреть понятие физической реальности. Если раньше под физической реальностью понимали сам исследуемый объект, то в квантовой механике под физической реальностью следует понимать лишь сведения, или, точнее, максимально полные сведения о нем, которые будут различными в зависимости от применяемых для получения этих сведений измерительных установок.

Таким образом, не сам объект, не сама объективная реальность является физической реальностью, а лишь ее образ, причем заведомо не охватывающий всех сторон этого объекта.

Если предполагать, что за такой «физической реальностью» больше ничего не скрывается, что она не является отражением объективной реальности, то это будет самый обычный идеализм. Так многие и поняли мнение Бора. Если же предположить, что «физическая реальность» является лишь образом объекта, то ее можно рассматривать как модель его. И этот термин — «модель», с нашей точки зрения, гораздо более удачный, нежели двусмысленный термин «физическая реальность».

Изучая какой-либо материальный объект, физик никогда не может сразу исследовать, учесть все его свойства; а часто в этом и нет необходимости. Физик сознательно или несознательно, по незнанию, учитывает лишь часть его свойств и строит образ этого объекта более простым, чем он является в действительности. Этот образ является моделью объекта, и с этой моделью, собственно говоря, физик и имеет дело при расчетах, при по-

строении теории. В дальнейшем, конечно, в результате получения новой информации об объекте ученый изменяет его модель, совершенствует ее.

Но если в прошлое время, в период классической физики, полагали, что модель физического объекта может отражать все основные свойства этого объекта и в процессе дальнейшего развития науки эта модель постепенно становится точной копией его, точной копией объективной реальности, то в квантовой механике, как известно, дело обстоит иначе.

В квантовой механике нельзя построить одной модели объекта, которая отражала бы все основные, уже известные свойства его. В квантовой механике для одного и того же объекта приходится применять различные, да еще взаимоисключающие друг друга модели в зависимости от того, какие экспериментальные установки используются для его обнаружения или исследования.

Вот эти различные модели одного и того же объекта Бор, собственно говоря, и называет «физическими реальностями», если конечно считать, что он в данном вопросе не исходил из позиций субъективного идеализма во время полемики с Эйнштейном.

Физики уже сравнительно давно привыкли к тому, что в квантовой механике, ядерной физике для одного и того же объекта приходится применять разные модели. Так, для частицы приходится применять различные модели для ее различных состояний. В ядерной физике для описания атомного ядра применяются различные модели, например капельная модель, оболочечная модель.

Такое положение в современной физике не вносит никакой философской путаницы. Оно показывает, что наши макроскопические характеристики, макроскопические понятия и представления не вполне соответствуют объективным особенностям микромира.

Применение понятия модели гораздо лучше и при анализе парадокса, рассмотренного Эйнштейном в его полемике с Бором. Действительно, применяя к одной из двух частиц после их взаимодействия два различных класса установок, мы будем иметь не разные «физические реальности» для другой частицы, а ее различные образы, различные модели соответственно разным образам или моделям первой частицы.

Между прочим, следует отметить, что наряду с употреблением термина «физическая реальность» вполне уместно было бы ввести и термин «химическая реальность», понимая под этим термином образ объекта, рассматриваемый с точки зрения его химических свойств. И тогда один и тот же объект, например гальванический элемент, нам представлялся бы и как «физическая реальность», и как «химическая реальность». Далее, очевидно, можно было бы ввести понятие «биологической реальности» и многих других «реальностей».

Итак, еще раз — нужен ли термин «физическая реальность»? Мне кажется, что не нужен. Лучше пользоваться термином «модель». Этот термин не вносит никакой философской путаницы. Ничего двусмысленного нет в том, что для одного и того же объекта мы вынуждены применять при разных условиях разные модели. Но гораздо хуже, если мы будем говорить, что существует несколько «реальностей» для одного и того же объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. См. В. А. Фок, А. Эйнштейн, Б. Подольский, Н. Розен, Н. Бор. Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным? — «УФН», т. XVI, вып. 4, 1936.

А. М. Мостепаненко

«ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТЬ» В СМЫСЛЕ ПУАНКАРЕ И КВАНТОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Как известно, Анри Пуанкаре, исследуя проблему соотношения геометрии и физики, пришел к выводу об их своеобразной «дополнительности» [1]. С точки зрения Пуанкаре, всегда можно так изменить законы физики, чтобы в описании явлений не выходить за пределы любой произвольно избранной геометрии. Если, например, оказывается, что луч света от далекого небесного тела не удовлетворяет постулату Эвклида, мы можем либо принять, что свойства пространства в больших масштабах отклоняются от эвклидовых, либо предположить, что

пространство обладает эвклидовыми свойствами, но какая-то сила искривляет световые лучи. Выбор одного из этих двух способов описания зависит от определения, но связан с изменением физических законов. Пуанкаре приводит также пример модели, в которой все тела имеют одинаковый коэффициент расширения, меняющийся в зависимости от их положения в пространстве по определенному закону. В этой модели можно принять, либо что геометрия пространства неэвклидова, либо что геометрия эвклидова, но на все объекты воздействует некоторая универсальная физическая сила (в данном случае связанная с тепловым расширением). Таким образом, и в этом случае геометрия и физика как бы дополняют друг друга. Хотя Пуанкаре не высказывается столь явно, смысл его высказываний можно подытожить так (условно назовем последующее положение «принципом дополнительности» Пуанкаре): вообще говоря, любое пространство из набора концептуальных пространств может использоваться в физической геометрии, будучи дополнено соответствующими законами физики.

Эйнштейн характеризует концепцию Пуанкаре следующим образом: «Геометрия (Г) ничего не говорит о соотношении действительных предметов; и только геометрия вместе с совокупностью физических законов (Ф) описывают это соотношение. Выражаясь символически, мы можем сказать, что проверке опыта подлежит сумма $(Г) + (Ф)$. Таким образом, в действительности можно по произволу выбирать как (Г), так и отдельные части (Ф); все эти законы являются условными. Для избежания противоречий необходимо только оставшиеся части (Ф) выбрать таким образом, чтобы опыт оправдывал в общем (Г) и полное (Ф)». И далее Эйнштейн замечает: «Мне кажется, что с принципиальной точки зрения (*sub specie aeterni*) такое воззрение Пуанкаре совершенно правильно» [2, стр. 10].

Дальнейшее развитие физики показало, однако, что различные описания типа $(Г) + (Ф)$ фактически не являются эквивалентными. Например, в общей теории относительности используется риманова геометрия, и при этом из физики удаляется понятие универсальной силы и вводится общий принцип относительности. Напротив, теории гравитации и космологические гипотезы, сохраняющие эвклидово пространство, не выдерживают конку-

ренции с общей теорией относительности и релятивистской космологией. Более того, если рассмотреть множество концептуальных пространств с различной топологией, то сразу же выявляется ограниченность «принципа дополнительности» Пуанкаре. Оказывается, что применение концептуальных пространств с различной топологией к одной и той же области явлений может повлечь за собой допущение каузальных аномалий (нарушение принципа близкодействия, релятивистской причинности и т. д.) [3].

Вместе с тем в известном смысле верно, что физическая геометрия и остальная часть физики взаимно дополняют друг друга, причем «выбор» геометрия существенно влияет на физику, и наоборот. Отсюда следует, что в принципе возможны два пути развития физики: избрание наиболее простой и удобной геометрии и «приспособление» к ней законов физики («путь Пуанкаре») или логическое упрощение основ физики путем введения в нее новых пространственно-временных представлений («путь Эйнштейна»). Какой из этих двух путей окажется удачным, зависит, в частности, от того, присущи ли изучаемой области действительности специфические пространственно-временные отношения.

С учетом сказанного было бы интересно проанализировать квантовомеханическое описание. Каким путем строилась квантовая механика, «путем Эйнштейна» или «путем Пуанкаре»? По-видимому, здесь нельзя говорить ни о том, ни о другом пути в чистом виде. Чрезвычайная сложность квантовомеханических явлений обусловила то, что в квантовой механике по сути дела осуществился компромисс между этими двумя методами. Изменение пространственно-временных представлений здесь присутствует лишь в подтексте. Кроме того, в квантовой механике в неявном виде присутствуют две системы $(\Gamma) + (\Phi)$.

На вопрос о том, каковы эти системы, помогают ответить соотношения неопределенностей и принцип дополнительности Бора. Когда принцип дополнительности Бора трактуется в смысле дополнительности пространственно-временного и каузального описания [4, 5, стр. 51—53], имеется в виду, строго говоря, дополнительность пространственно-временного описания классической физики и детерминистического описания в смысле Лапласа.

Попытка рассматривать частицу как материальную точку, локализованную в трехмерном евклидовом пространстве, приводит к «индетерминистической» физике, а попытка сохранить «детерминистическую» физику приводит к необходимости допустить, что квантовые объекты не локализованы в трехмерном евклидовом пространстве. Сказанное можно проиллюстрировать с помощью следующей схемы:

- | | |
|--|-------------------------------|
| (1) Объект локализован в трехмерном евклидовом пространстве | «Индетерминистическая» физика |
| (2) Объект не локализован в трехмерном евклидовом пространстве | «Детерминистическая» физика |

Здесь слова «детерминистический» и «индетерминистический» означают наличие или отсутствие лапласовского детерминизма.

Таким образом, квантовая механика оказывается в определенном смысле двойственной, что, однако, не мешает ей давать блестящее статистическое описание явлений микромира.

Вспоминая то, что говорилось выше о каузальных аномалиях и топологии пространства и времени, можно видоизменить (2) следующим образом:

- | | |
|--|-----------------------------|
| (2) Объект существует в пространстве и времени со специфической топологией | «Детерминистическая» физика |
|--|-----------------------------|

Правда, остается неясным, какова эта специфическая топология пространства. Предполагается лишь, что она отлична от топологии трехмерного евклидова пространства (вспомним, что ψ -функция системы из n частиц описывается в $3n$ -мерном пространстве).

Все это свидетельствует о том, что аналогия между «принципом дополнительности» Пуанкаре и принципом дополнительности Бора более глубокая, чем может показаться на первый взгляд. Вместе с тем вполне вероятно, что «путь Эйнштейна» еще сможет быть последовательно применен к исследованию квантовомеханических явлений, если будут введены соответствующие представления о топологии пространства и времени в малых масштабах.

Сказанное не означает, что введение новых пространственно-временных представлений в квантовомеханиче-

ское описание позволит вновь возвратиться к классическому детерминизму. Речь, по-видимому, может идти о дальнейшем уточнении существующих представлений о квантовомеханической форме причинности.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Пуанкаре. Наука и гипотеза. М., 1904; он же. Наука и метод. СПб., 1910; он же. Ценность науки. М., 1906.
2. А. Эйнштейн. Геометрия и опыт. Пг., 1922.
3. Н. Reichenbach. The philosophy of space and time. N. Y., 1958.
4. Н. Бор. Квантовый постулат и новое развитие атомистики.— «УФН», т. VIII, вып. 3, 1928.
5. В. Гейзенберг. Физические принципы квантовой теории. Л.— М., 1932.

П. С. Исаев

ЕЩЕ РАЗ ОБ ОБЪЕКТИВНОЙ РЕАЛЬНОСТИ И ПРИЧИННОСТИ

У меня несколько замечаний по докладам Я. Г. Дорфмана, П. С. Дышлевого, М. Э. Омеляновского и Б. Я. Пахомова.

В докладе Я. Г. Дорфмана слишком категорично отрицается случайность в развитии физики.

Нельзя думать, что в эволюции физики существует лишь строгая, непреодолимая детерминированность. Ясно, что то или иное открытие в физике рано или поздно было бы сделано. Однако время и место открытия, личность ученого, обстоятельства, предшествовавшие открытию, часто являются случайными.

Мне кажется, что М. Э. Омеляновский без достаточных оснований критикует принцип причинности. В наше время всякая теория имеет право на существование только в том случае, если принцип причинности выполняется, или, иначе, если в теории предполагается, что взаимодействие распространяется в причинном световом конусе. Теории, в которых микропричинность не выполняется, остаются пока лишь гипотетическими.

В докладе П. С. Дышлевого определение физической реальности ведет к агностицизму. Действительно, автор

доклада считает физической реальностью: 1) измерения, полученные с помощью прибора, плюс 2) теоретическое осмысление экспериментальных данных. У автора вне измерений нет физической реальности. Апеллируя к технике современного эксперимента, автор считает, что микрообъект и прибор неотделимы, что вмешательство прибора в познание микромира является столь решающим, что микромир не предстает перед нами в своем истинном, независимом виде и что поэтому микромир сам по себе остается непознанным, а физики имеют дело лишь с набором некоторых данных, которые затем интерпретируются некоторым модельным образом. Очевидно, что здесь присутствуют и субъективизм, и сужение физической реальности до набора измерений.

У автора доклада здесь явное смешение понятий процесса познания и физической реальности. Физическая реальность существует, конечно, вне прибора и действительно познается с помощью прибора. Процесс познания состоит в выработке понятий об этой реальности в отрыве от прибора, или, иначе, в изучении свойств самой реальности. Так шел процесс развития представлений об атомах, электронах, элементарных частицах и т. д. Таким был процесс познания в классической физике, таким остается и теперь. В процессе познания есть физическая реальность, твердо установленная (например, электрон имеет заряд e и массу $9 \cdot 10^{-28}$ г), и вещи или явления физической реальности, в которых физики сомневаются (такими были флогистон, эфир, а сейчас гравитоны и т. д.). Ученые очень осторожны в утверждении существования еще непознанной физической реальности и приходят к этому путем трудного процесса познания.

И последнее замечание — по докладу Б. Я. Пахомова. Положив в основу тезис о поле как объективной, физической реальности, Б. Я. Пахомов сделал ряд интересных парадоксальных замечаний. Но понятие «поле», вообще говоря, есть лишь физический символ, используемый для описания реальных частиц, и не является материальной субстанцией (например, спинорное ψ -поле). А поэтому и замечания Б. Я. Пахомова остаются лишь на уровне мыслимых, а не реально существующих парадоксов.

Раздел второй

ДЕТЕРМИНИЗМ И ВЕРОЯТНОСТЬ В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Ю. В. Сачков

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И ПРИРОДА ВЕРОЯТНОСТИ

Фундаментальный характер идеи вероятности в квантовой физике общепризнан. Если в случае классической физики вероятность еще могла трактоваться как второстепенный, инородный элемент структуры физической теории, нарушающий ее внутреннее совершенство, то в квантовой механике вероятность с самого начала рассматривается как одно из важнейших оснований самой структуры физической теории. На базе вероятности произошел пересмотр роли представлений о траектории микрообъекта при отображении его глубинных свойств, синтез корпускулярных и волновых свойств микрообъектов при исследованиях их структуры и поведения, раскрыта органическая взаимообусловленность свойств микрообъекта и окружающих его макроусловий.

Однако признание фундаментальной роли вероятности в самой структуре теории зачастую исходит из интуиции, основанной на практике непосредственных исследований микропроцессов. Все еще нет, на наш взгляд, достаточной ясности в разработке логических и общетеоретических оснований вероятности. Проведенный анализ вероятностной природы квантовомеханических закономерностей на основе представлений о случайности и необходимости, потенциальной возможности и действительности имеет существенное значение, но вряд ли его можно признать достаточным. Этот анализ способствовал выявлению более широких основ вероятностных идей и методов, и прежде всего — отрыву в понимании этих основ

от узких и жестких рамок классической механики и тех образов и представлений, которые она навевала. Тем не менее на базе использования любой пары категорий диалектики, как бы ни значительно это было само по себе, нельзя глубоко обосновать новые идеи и методы естествознания, тем более те, которые имеют фундаментальное значение. Последовательное обоснование фундаментально нового в науке возможно лишь в системе философских представлений, что делается на базе соотношения нового с общими представлениями о структурной организации материи (атомизм) и природе познания. Основная причина того, что идея вероятности еще недостаточно ассимилирована нашим мировоззрением, в том числе и естественнонаучным, лежит в том, что раскрытие ее природы слабо связывают с современным развитием общих представлений о структурной организации материи.

Важнейшим направлением развития современных идей о структурной организации материи, развития современного атомизма является становление и разработка общих представлений о сложных управляющих системах. Сложными управляющими системами называются системы с относительно независимым, автономным поведением подсистем (элементов) при высокой внутренней активности и избирательности, целенаправленности функционирования (поведения) систем в целом. Сложные системы являются открытыми, находящимися в непрерывном взаимодействии с окружением (средой) и принципиально способны решать весьма разнообразные классы задач¹. Представления о сложных управляющих системах являются гораздо более общими представлениями о структурных единицах материи в сравнении с представлениями классического атомизма: последние могут рассматриваться как частный случай первых. Основные идеи в разработке общего учения о сложных системах поставляют биология, кибернетика и математика.

К рассматриваемой постановке вопроса можно подойти и с несколько иной стороны. В настоящее время широко известен факт интенсивного взаимодействия физики и биологии, обеспечивший колоссальный прогресс последней. Вместе с тем при рассмотрении этого

Определение характерных исходных черт структуры сложных управляющих систем см., например, [1, стр. 14 и сл.].

взаимодействия биология обычно рассматривается исключительно как пассивная сторона, жадно воспринимающая физические идеи и методы, но практически ничего не дающая взамен физике. Однако так ли это, нет ли во взаимодействии этих наук глубинных обратных связей?

В последнее время все чаще можно слышать, что разработка новых понятий и представлений в физике неизбежно привлечет внимание исследователей к принципиальным вопросам явлений жизни, что последние будут стимулировать развитие первых. В явлениях жизни последствия новых понятий могут быть выражены яснее и четче, чем в собственно физических явлениях. В указанной связи следует вспомнить, что В. И. Вернадский связывал вхождение в физику идеи вероятности, как и идей необратимости, симметрии и ряда других, с проникновением в эту науку духа биологии [2]. Биология может оказать указанное воздействие на физику лишь на основе разработки своей общей теории, т. е. учения о принципиальных вопросах строения и эволюции биологических систем, чему и служит и в наши дни разработка общих представлений о сложных управляющих системах.

В настоящее время, конечно, еще нельзя говорить о достаточно сложившемся общем учении о сложных управляющих системах. Соответствующие представления и методы исследований находятся в процессе интенсивного становления. Вместе с тем в развитии этих исследований получены и такие позитивные результаты, которые имеют крайне существенное общетеоретическое значение. К одному из важнейших позитивных результатов развития представлений о сложных управляющих системах относится становление и разработка идеи о наличии качественно различных и относительно автономных уровней структурной организации этих систем, уровней управления, регуляции и детерминации в сложных системах. Эта идея играет все возрастающую роль во всем комплексе современных наук, начиная от физики элементарных частиц с ее попытками «схватить» внутреннюю структуру этих «кирпичиков мироздания» и кончая анализом принципов организации и функционирования развитого социалистического народного хозяйства.

Соответственно этому принципы структурной организации сложных систем отражают собою и наличие определенных жестких глубинных связей между элементами, и их отрицание — существенную независимость (автономность). Лишь на основе внутреннего «сочетания» жестких связей и автономности возможно высокоизбирательное и целенаправленное функционирование систем в целом. Раскрытие структуры систем говорит о том, что связи (зависимости) не есть нечто такое, что может просто быть или не быть. Связи в системах имеют существенные внутренние традиции, обладают большей или меньшей «степенью наличности», а раскрытие диалектики взаимосвязей реального мира включает в себя анализ взаимопроникновения предельных (взаимоисключающих) случаев.

В разработке идеи об уровнях в строении и детерминации материальных систем существенное значение приобретает выработка весьма абстрактных, обобщенных понятий, позволяющих отображать более глубокую сущность, более глубокие уровни в строении объектов исследования. Соответственно этому в рамках единой теории понятия стали «распадаться» на классы по степени их общности и особое внимание начало обращаться на вопросы их внутренней субординации. Наличие субординации между понятиями в общем плане всегда признавалось, однако практически в рамках тех или иных теорий формы этой субординации исследовались слабо, и зависимости между специфическими понятиями в рамках одной теории рассматривались преимущественно в плане координации. В случаях систем с наличием нескольких уровней внутреннего строения в теорию включаются параметры, в логическом отношении выступающие как обобщенные, интегральные характеристики параметров, выражающих исходный уровень: первые не просто добавляются ко вторым, а характеризуют наличие определенной упорядоченности в параметрах исходного уровня, и благодаря наличию этой упорядоченности они обычно и вводятся в теорию. В качестве прообраза таких понятий могут служить, например, понятия центра масс и момента инерции, которые вводятся в механику твердого тела. Эти понятия, несомненно, являются обобщением характеристик, присущих исходным элементам соответствующих систем, их первичному

уровню. Однако здесь еще нет той необходимой доли независимости обобщенных параметров, что характерно для сложных систем.

Соответственно сказанному для понимания природы вероятности прежде всего существенно то, что она представляет собою исторически первую (а потому простейшую) строго математическую форму синтеза жесткого и автономного начал во внутренней «организации» материального мира. Анализу принципов структурной организации материи уделял значительное внимание Н. Винер в своих работах по философскому обоснованию кибернетики и ее методов, работах, посвященных фактически анализу воздействия точки зрения Гиббса — точки зрения вероятности — на развитие наших представлений об устройстве мира. «...С точки зрения кибернетики, — писал Н. Винер, — мир представляет собой некий организм, закрепленный не настолько жестко, чтобы незначительное изменение в какой-либо его части сразу же лишало его присущих ему особенностей, и не настолько свободный, чтобы всякое событие могло произойти столь же легко и просто, как и любое другое. Это мир, которому одинаково чужда окостенелость ньютоновой физики и аморфная податливость состояния максимальной энтропии или тепловой смерти, когда уже не может произойти ничего по-настоящему нового. Это мир Процесса...» [3, стр. 314].

Представления о гибком мире образуют основу вероятностного стиля мышления. Что же придает идее вероятности указанную «гибкость», проявляющуюся в соответствующих теоретических концепциях? Ответ на этот вопрос связан с анализом специфических понятий и представлений теории вероятностей.

Центральным понятием теории вероятностей является понятие вероятностного распределения или просто распределения. Именно на базе этого понятия происходят столь успешные «приложения» этой теории. На основе понятия распределения объединяются другие ее понятия, имеющие принципиальное значение для понимания всей теории. Распределение означает, что, несмотря на случайные изменения значений ряда характеристик от явления к явлению, относительное число элементов с определенным значением этих характеристик довольно устойчиво. Эта устойчивость и есть выражение

вероятности. Другими словами, задание распределения некоторой случайной величины есть задание возможных значений, которые может принимать эта величина, и соответствующих им вероятностей.

Распределения выражают внутреннюю упорядоченность в соответствующем массовом явлении. Вместе с тем наиболее глубокий смысл и значение вероятностных распределений стали выясняться по мере того, как распределения начали становиться предметом самостоятельного исследования, т. е. когда заинтересовались разнообразием самих распределений, когда были выдвинуты представления о видах (типах) распределений и поставлен вопрос о причинах этого разнообразия. Многие из видов распределений образуют обширный предмет специальных исследований. Таковыми являются, например, нормальное распределение (распределение Гаусса), распределение Пуассона и др.

Когда скоро введены представления о типах, видах распределений, то, естественно, встает вопрос о способах их непосредственной, прямой характеристики, позволяющей определять и сравнивать эти виды распределений. Речь идет о том, чтобы определять вид распределения, его изменение во времени независимо от наблюдения и обработки исходного массового материала, без непосредственного анализа самих случайных (в смысле теории вероятностей) событий. В большинстве случаев виды распределений характеризуются чисто описательным образом, но в наиболее развитых случаях применения теории вероятностей открываются иные возможности. И прежде всего на наличие новых возможностей указывают квантовые теории. Предварительно следует отметить, что вероятностный язык в квантовых теориях используется своеобразным образом. Формулировка квантовых задач дается не непосредственно на языке вероятностных распределений, а прежде всего с помощью так называемых волновых функций. Однако последние являются весьма абстрактными характеристиками распределений: квадрат модуля волновой функции в некотором представлении определяет собою вероятность соответствующей физической величины, и эта связь волновых функций с вероятностью вообще является оправданием их употребления в квантовой теории.

При характеристике микрочастиц посредством волно-

вых функций в квантовую теорию вошло представление о виде (характере, типе) волновых функций, соответствующему чему волновая функция может быть скаляром, вектором, спинором, псевдоскаляром, псевдовектором и т. д. Вид волновых функций достаточно однозначным образом определяется так называемыми квантовыми свойствами элементарных частиц — спином и четностью, которые с самого начала в теорию вводятся как характеристики волновых функций в целом. Другими словами, используемые в квантовой теории величины (за исключением ряда постоянных величин, не имеющих объяснения в теории и берущихся непосредственно из опыта) делятся на два класса: первый класс составляют так называемые «наблюдаемые» (например, такие величины, как координаты и импульс), на базе которых и возникают представления о вероятностных распределениях; второй класс образуют квантовые числа как характеристики волновых функций (вероятностных распределений) в целом, их параметры².

Различие между этими классами понятий заключается прежде всего в «степени близости» к непосредственно данному в физическом опыте. Первые выражают более внешние характеристики микрообъектов, вторые — более глубокие, внутренние характеристики. Первые позволяют более индивидуализировать квантовые процессы, вторые носят более обобщенный характер. Первые во многом тяготеют по своему характеру к классическим понятиям, вторые прежде всего выражают специфичность квантовых явлений. Первые более связаны с явлением, вторые — с сущностью, хотя и несомненно, что сущность является, а явление существенно. Естественно, что полнота теоретического выражения квантовых процессов достигается, когда используются понятия обоих классов, относящиеся к различным логическим уровням. Распределения и представляют форму связи этих двух классов величин с учетом их различной природы.

Подобная ситуация вообще является типичной для всех случаев использования теории вероятностей для познания и выражения свойств и закономерностей мате-

² В последнее время на принципиальное значение деления языка квантовой физики на два существенно различных типа понятий, относящихся к различным логическим уровням, было обращено внимание в статье [4].

риального мира. Во всех этих случаях характеристики (параметры) объекта исследования делятся на два класса, относящиеся по существу к различным структурным уровням его организации. Характеристики первого, «исходного» уровня — это те, которые постоянно и независимо образом изменяют свои значения при переходе от одного элемента к другому в исследуемом массовом явлении и, соответственно, каждое из значений которых рассматривается как случайное событие. Характеристики более глубокого уровня связаны с наличием определенных закономерностей, регулярностей в массе случайных событий и выражают эту регулярность. При этом весьма существенно, — и это связано с сутью вероятностного духа исследования, — что характеристики обоих уровней относительно автономны, независимы друг от друга: характеристики второго уровня, определяя вид распределения, не определяют собою каждое конкретное случайное событие. Другими словами, характеристики более глубокого уровня лишь обобщенным, интегральным образом определяют собою характеристики исходного «непосредственно данного» уровня. В то же время связи между характеристиками более глубокого уровня носят вполне определенный, «жесткий» характер. Возможность подобного «сочетания» различных классов характеристик при отображении свойств объекта исследования достигается тем, что соответствующие закономерности формулируются на языке распределений, как зависимости между ними и их свойствами.

Обобщенная природа характеристик более глубокого уровня делает весьма гибкой их связь с характеристиками исходного уровня: одним и тем же значениям первых может соответствовать весьма обширный спектр значений вторых. На такой основе оказывается возможным вскрыть и отобразить различную «степень» изменчивости и подвижности отдельных уровней, «срезов» в структурной организации мира и его «частей»: более устойчивые уровни отображаются на языке более обобщенных характеристик, более изменчивые и подвижные — на языке первичных, исходных характеристик.

Наличие указанных различных свойств у материальных объектов и систем существенным образом видоизменяет способы их характеристики. Полнота отображения соответствующих объектов исследования, повторим,

достигается в том случае, когда в рассмотрение включены все свойства — и исходные, и их обобщающие. Однако при характеристике состояний этих объектов основной упор делается на определении и зависимостях более обобщенных характеристик. Именно с этим связано то, что состояния квантовых объектов определяются на языке волновых функций. Вместе с тем определение состояний объектов через более обобщенные характеристики приводит к тому, что исходные более внешние характеристики не могут быть определены однозначным, единственным образом. При рассмотрении движения таких объектов однозначные соответствия, законы изменения определяются прежде всего на уровне обобщенных характеристик, которые определяют весь спектр возможных изменений на уровне первичных характеристик.

Вопрос о смысле, статусе характеристик, относящихся к различным уровням выражения свойств объектов исследования, можно рассматривать на языке категорий возможности и действительности. Существенным для понимания природы квантовой теории является то, что здесь вероятностные методы используются для выражения свойств и закономерностей поведения отдельных, индивидуальных микрообъектов. И по мере развития истолкования этого факта все в большей и большей степени стали использоваться категории возможности и действительности. Различные «варианты» поведения микрообъекта, оцениваемые в теории на вероятностном языке, стали рассматриваться как внутренне ему присущие потенциальные возможности поведения, но в каждом конкретном случае (взаимодействии, наблюдении) реализуется одна из этих возможностей. Соответственно этому и появились утверждения, что квантовая механика есть наука о потенциальных возможностях в микромире. «...Я полагаю,— пишет В. Гейзенберг,— что язык, употребляемый физиками, когда они говорят об атомных процессах, вызывает в их мышлении такие же представления, что и понятие «потенция». Так физики постепенно действительно привыкают рассматривать траектории электрона и подобные понятия не как реальность, а скорее как разновидность «потенций». Язык, по крайней мере в определенной степени, уже приспособился к действительному положению вещей... Этот

язык вызывает в нашем мышлении образы, а одновременно с ними и чувство, что эти образы обладают недостаточно отчетливой связью с реальностью, что они отображают только тенденции развития реальности» [5, стр. 153]. В нашей литературе вопрос о роли потенциально возможного в структуре физической теории рассматривается в работах В. А. Фока [6].

Включение представлений о потенциальных возможностях в язык квантовой теории является неизбежным, коль скоро признается, что в теорию введены новые по своей природе величины — обобщающие, которые отображают более глубокую сущность исследуемых материальных объектов. Однако сказать, что квантовая механика рассматривает просто возможности, еще не значит выразить всю истину. При рассмотрении спектра возможностей поведения микрообъектов квантовая механика позволяет отобразить наличие определенных упорядоченностей, регулярностей в «массе» этих возможностей, и на факте наличия таких упорядоченностей по существу и основываются ее основные положения. При этом оказывается, что сами закономерности в спектре возможностей обусловлены более глубинными свойствами микрообъектов и о них прежде всего и идет речь в квантовой теории. Чем более глубокие свойства определяются, тем шире и богаче соответствующее поле возможностей. Реализация той или иной возможности обуславливается внутренним состоянием соответствующего объекта и условиями его внешнего бытия. Переход от возможности к действительности в общем случае содержит и определенные черты иррациональности, в известной степени наподобие тому, как и переход между двумя точками на числовой оси. Язык, непосредственно описывающий сами возможности, представляет собою исходный уровень «кодирования» свойств микрообъектов; понятия же, выражающие наличие упорядоченностей в мире возможностей, имеют уже обобщающую природу. Переход от возможности к действительности включает в себя переход от обобщающих характеристик к исходным, непосредственно описывающим явления, и в силу этого отображение реального материального процесса включает в себя и неоднозначность, неопределенность в связях (на уровне явлений), и вполне однозначные зависимости (на уровне сущности).

Сказанное о содержании теории вероятностей и природе обобщающих характеристик позволяет, на наш взгляд, понять значение и смысл вероятностных идей в науке. Именно тот факт, что методы теории вероятностей дают строгие теоретические средства анализа и выражения закономерностей объектов исследования с двумя относительно выделенными и автономными уровнями внутреннего строения и организации, и объясняет секрет успеха идеи вероятности в познании реального мира. Представления о гибком мире лежат в основе обоснования вероятности. Вместе с тем не менее существенны обратные связи: реальные успехи науки, основанные на приложениях теории вероятностей, ведут к развитию, углублению самого понимания вероятности, и в последнем отношении пристального внимания заслуживает квантовая механика.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Гельфанд, М. Л. Цетлин. О математическом моделировании механизмов центральной нервной системы.— «Модели структурно-функциональной организации некоторых биологических систем». М., 1966.
2. В. И. Вернадский. Изучение явлений жизни и новая физика.— «Биогеохимические очерки». М.— Л., 1940.
3. Н. Винер. Я — математик. М., 1964.
4. И. П. Стаханов. Некоторые особенности квантовомеханического описания.— «Вопросы философии», 1966, № 9.
5. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
6. В. А. Фок. Квантовая физика и строение материи.— «Структура и формы материи». М., 1967.

В. И. Купцов

О ХАРАКТЕРЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В ФИЗИКЕ

Квантовая механика явилась величайшим достижением XX века, которое оказало и продолжает оказывать большое влияние на современное мировоззрение. Удивительные противоречивые свойства микрообъектов были уложены в стройную систему новых понятий, в результате чего человеческому взору открылась картина мик-

ромира не менее гармоничная, чем те, что рисовались средствами классической физики. Однако эта гармония была достигнута ценою отказа от многих, ставших уже достоянием здравого смысла, понятий, сформировавшихся на основании изучения макроскопических объектов. Вместе с тем квантовая механика обратила внимание на такие черты классической физики, которые раньше оставались в тени. И здесь прежде всего следует отметить вероятностные представления. Вероятность столь фундаментальным образом вошла в квантовую механику, что ее стали называть великой идеей физики XX века.

Первые шаги на пути осознания вероятностного характера законов, управляющих поведением микрообъектов, были сделаны еще в 1924 г., когда Н. Бор, Х. Крамерс и Дж. Слэтер, пытаясь объединить корпускулярные и волновые представления о микрочастицах, ввели понятие волны вероятности. Но эта работа, содержащая в себе по существу статистическую трактовку даже законов сохранения, оказалась ошибочной. В 1926 г., когда уже была создана квантовая механика, М. Борн вновь обращается к идее волны вероятности и дает современную вероятностную трактовку ψ -функции. Начиная с этого времени вероятностная интерпретация квантовой механики становится общепринятой.

Открытие вероятностного характера простейших закономерностей микромира вызвало большое количество работ философского характера, которые были направлены на осмысление этой, как казалось, невиданной прежде ситуации. Анализ проблем, связанных с выяснением сущности вероятностных представлений в квантовой механике, далеко не завершен и в настоящее время. Эта задача оказалась чрезвычайно многоплановой, захватившей в свое русло огромное число вопросов.

Одним из вопросов такого рода является выяснение содержания вероятностных представлений, используемых в классической физике. Важность его решения в отношении к квантовой механике определяется несколькими взаимосвязанными моментами. С одной стороны, это оказывается необходимым для понимания сущности вероятностных представлений самой квантовой механики, поскольку для выяснения их специфики необходимо установление как единства, так и различия вероятностных представлений квантовой механики и классической физики.

С другой стороны, в настоящее время в самых различных направлениях ведутся поиски выхода за пределы квантовой механики. При этом для многих такого рода концепций ориентиром служит история вероятностных теорий классической физики, их соотношение с теориями, не содержащими вероятностных элементов. В классической физике ищут себе опору самые различные авторы, придерживающиеся часто диаметрально противоположных точек зрения на сущность и перспективы развития квантовой механики. Правильное истолкование классической физики, следовательно, имеет большое значение как для выяснения сущности квантовой механики, так и для плодотворного выхода за рамки ее понятий.

Наконец, решение этого довольно сложного вопроса существенным образом затрагивает наши самые общие представления о мире. Осознание фундаментальной роли вероятности в квантовой механике, а также широкое использование вероятностных концепций для объяснения самых разнообразных явлений в рамках почти всех развитых наук привело к представлению о принципиально вероятностном характере всех явлений в мире. Для подобных утверждений имелись определенные основания. Сейчас мы можем сказать, что, пожалуй, не существует сколько-нибудь значительной области действительности, где вероятностно-статистический подход к ее познанию не дал бы интересных результатов. «В царстве органической природы и в области человеческих отношений,— пишет видный американский экономист Ф. Миллс,— современный объем наших полезных знаний опирается главным образом на статистические концепции» [1, стр. 7]. Выдающийся немецкий физик М. Борн свидетельствует: «... Сегодня можно сказать, что современная физика полностью опирается на статистическую основу» [2, стр. 58].

Да, по-видимому, развитие познания явно свидетельствует в пользу существования вероятностного элемента в картине мира, даваемой нам современной наукой. Но какова природа вероятности? Какова природа вероятностных закономерностей? Имеют ли место в действительности однозначные необходимые отношения? Если да, то каково соотношение между теми и другими? В наше время, которое характеризуется освобождением от деспотизма в самых различных сферах человеческой деятельности, идея вероятности глубоко созвучна про-

грессивным настроениям людей. Однако образ мира, представляемого в виде бога, играющего в кости, хотя и заманчив, но все же слишком однообразен. Не маловато ли у бога привязанностей? И кроме того, всегда актуален вопрос: а не приписываем ли мы богу часть своих собственных пороков? Во всяком случае, история познания довольно внушительно предостерегает нас от абсолютизации любых достижений науки.

Перейдем теперь к анализу содержания вероятностных представлений в классической физике. Вероятность вошла в физику в середине XIX в. Попытки построить теорию тепловых явлений, основываясь на молекулярно-кинетических представлениях, впервые осуществленные Джоулем, Кренигом и Клаузиусом, невольно привели ученых к необходимости воспользоваться услугами понятия вероятности, которое к тому времени уже плодотворно использовалось для анализа социальных явлений. Основатели молекулярно-кинетической теории теплоты вначале очень неуверенно использовали вероятностные представления, всячески их избегая, часто применяя не вполне осознанно. Однако, по мере решения конкретных задач, Клаузиус, а затем Максвелл и Больцман используют все более и более сложные понятия из арсенала теории вероятностей, и постепенно в их сознании формируется убеждение о большом принципиальном значении использования вероятностных идей в физике.

В связи с проблемой обоснования статистической механики перед физиками встают фундаментальные вопросы о природе вероятности, о сущности статистических закономерностей и их соотношении с динамическими, о теоретико-познавательных функциях статистических методов в физике. Попытки обосновать статистическую механику не привели, однако, к полному решению этой задачи, и вопрос о природе вероятности в классической физике остался в значительной степени неисследованным. Именно на этой почве возникло по существу никем серьезно не обоснованное, но распространенное толкование вероятности в классической физике как обусловленное незнанием или игнорированием.

«В макром мире (и классической физике), — пишет К. Форд, — появление вероятности обусловлено игнорированием чего-либо, в микромире вероятность присуща самим законам природы» [3, стр. 76]. Аналогичную точку

зрения высказывает В. Гейзенберг: «В математике или статистической механике волна вероятности означает суждение о степени нашего знания фактической ситуации. Бросая кость, мы не можем проследить детали движения руки, определяющие выпадение кости, и поэтому говорим, что вероятность выпадения отдельного номера равна одной шестой, поскольку кость имеет шесть граней» [4, стр. 21—22]. Можно привести много высказываний подобного рода, принадлежащих часто и таким видным ученым, как Бор, Нейман, де Бройль, Розенфельд. Итак, вероятность есть мера нашего знания. Следует отметить, что многие авторы относят такое понимание вероятности и к квантовой механике. При этом различие вероятностных представлений в квантовой механике и в классической физике видят в том, что вероятностное знание в первой принципиально неустранимо в процессе познания, поскольку оказывается невозможным более детальное исследование явлений микромира, чем то, какое дается квантовой механикой.

Рассматриваемую нами концепцию относительно места вероятности в классической физике можно резюмировать следующим образом. В классической физике все законы природы носят однозначный характер. Вероятность, к которой приходится обращаться в ряде задач, входит в физику в результате нашего незнания или игнорирования деталей явлений. Она, являясь характеристикой не самой объективной реальности, а лишь наших приближенных представлений о ней, будет целиком устранена из физической картины мира в процессе познания.

Как мне представляется, можно указать три источника, из которых черпает силу эта концепция. Первым следует считать наличие логического аспекта понятия вероятности. Вторым — существование в действительности таких областей приложимости вероятностно-статистических методов, которые сами объективно не содержат вероятностных отношений. Третьим источником является преимущественно феноменологический, описательный характер использования вероятностно-статистических методов исследования в различных науках за пределами физики, например в биологии и социологии. В данной работе мы ограничимся анализом первых двух источников.

Рассмотрим первый из них. Многообразие отношений, в которых используется понятие вероятности, может быть

разделено на два довольно различных и вместе с тем взаимосвязанных класса. Существует довольно обширная область устойчивых частот, применяя к которой понятие вероятности, мы говорим о вероятности как о частоте. Здесь понятие вероятности характеризует массовые явления. Однако существует и другое применение понятия вероятности, вероятности логического характера. В этом случае вероятность выражает отношение между высказываниями, характеризуя степень подтверждения определенной гипотезы известными фактами.

Оба эти аспекта вероятности можно найти еще у Лапласа, у которого они находятся в нерасчлененном виде. В концепции лапласовского детерминизма, согласно которой «все явления, даже те, которые по своей незначительности как будто не зависят от великих законов природы, суть следствия столь же неизбежные этих законов, как обращение солнца» [5, стр. 8], казалось, не оставалось места для вероятности. Однако, делая акцент на логическом аспекте понятия вероятности, Лаплас, связывая понятие вероятности с неполным знанием, смог совместить его с концепцией однозначного, определенного законами механики, детерминизма.

Смешение этих двух аспектов или сведение какого-либо одного из них к другому совершенно недопустимо. Для того чтобы сделать ясным их принципиальное различие, разберем один из примеров применения вероятностных представлений, приводимый Лапласом [5, стр. 60].

Пусть у нас имеется правильная монета. Вероятность выпадения монеты на «орел» равна $\frac{1}{2}$, а вероятность выпадения «орла» два раза подряд равна $\frac{1}{4}$, поскольку у нас нет основания предпочитать одну сторону другой. То же самое можно сказать относительно выпадения монеты на «решку». Представим теперь, что мы имеем дело с монетой, у которой смещен центр тяжести к одной из плоскостей, причем нам неизвестно, выпадению какой стороны монеты это будет благоприятствовать. В этом случае вероятность выпадения монеты на «орел» остается равной $\frac{1}{2}$, поскольку, как рассуждает Лаплас, у нас имеются совершенно одинаковые основания считать, что неправильность монеты будет благоприятствовать как выпадению «орла», так и «решки». Однако если монета выпала первый раз на «орел», то мы получаем основание считать, что несимметрия монеты благоприятствует вы-

падению «орла», а поэтому вероятность вторичного его выпадения оказывается больше $\frac{1}{2}$ и, следовательно, вероятность выпадения двух «орлов» подряд будет больше $\frac{1}{4}$. Вероятность выпадения «решки» один раз будет соответственно равна $\frac{1}{2}$, а ее выпадение во второй раз оказывается более вероятным, поскольку факт первого выпадения монеты на «решку» дает основание считать, что монета должна выпадать на эту сторону более часто. Следовательно, вероятность выпадения монеты на «решку» два раза подряд будет также больше $\frac{1}{4}$. Если же мы рассмотрим, каковы будут вероятности результатов «орел» — «решка» и «решка» — «орел», то оказывается, что они будут равными друг другу и меньшими $\frac{1}{4}$. В самом деле, если монета выпала на «орел», то вероятность ее выпадения на «решку», в силу высказанных выше соображений будет меньше $\frac{1}{4}$. Аналогичным образом, если монета выпала первый раз на «решку», то вероятность ее выпадения на «орел» оказывается меньше $\frac{1}{2}$. В сумме все вероятности, как это и полагается, дают единицу.

Приведенный пример ясно показывает, что логическая трактовка вероятности, приводя в некоторых случаях (в нашем примере, когда рассматривался случай симметричной монеты) к одинаковым результатам с ее частотной трактовкой, в целом глубоко отлична от нее. В случае с неправильной монетой, исходя из логической трактовки вероятности, мы получаем распределение вероятностей, явно несовпадающее с распределением частот выпадений сторон. Распределение вероятностей оказывается здесь симметричным относительно выпадения «орла» — «решки», в полном соответствии с симметрией наших знаний о монете, в то время как частоты выпадений монеты, отражая реальную ее неправильность, дают несимметричное распределение. Логический аспект вероятности имеет отношения к нашим суждениям о действительности и не связан непосредственно с объективно существующими частотами.

Рассмотрим теперь второй источник толкования вероятности в классической физике как связанной с незнанием: существование таких областей приложимости вероятностно-статистических методов, которые сами не содержат вероятностных отношений. И здесь мы можем опереться на Лапласа. «Явления природы,— пишет Лап-

лас,—сопровождаются по большей части столькими посторонними обстоятельствами, влияние многочисленных возмущающих причин настолько к ним примешивается, что становится очень трудным познавать их.

Достигнуть этого можно только повторным наблюдением и опытом, чтобы посторонние влияния взаимно уничтожались и средние результаты сделали бы очевидными эти явления и их различные элементы» [5, стр. 75]. Здесь-то и необходимо применение вероятностных представлений, которые помогут оценить необходимое количество измерений и их возможную ошибку. Формулы, «служащие этой цели, составляют истинное усовершенствование научного метода и его важное добавление» [5, стр.75].

Положение дела в рассматриваемых задачах таково, что исследователь сталкивается здесь с вероятностью по существу только в методе, а не в самой изучаемой действительности. Эта ситуация особенно наглядно проявляется себя при применении сравнительно недавно разработанного метода Монте-Карло, который с успехом позволяет рассчитывать довольно сложные задачи посредством вероятностно-случайного моделирования. Вероятность, которая из метода естественно переходит на результат, здесь связана не с сущностью самого объекта, а с особенностями метода познания. Приближенное вычисление какого-либо определенного интеграла методом Монте-Карло совсем не означает, что у этого интеграла нет точного значения. Ясно, что такого рода неопределенность устраняется в процессе познания, когда объект подвергается всестороннему изучению, и не только с помощью вероятностно-статистических методов. По-видимому, неопределенность в ее вероятностной форме может быть связана с методом познания и не носит объективного характера. При этом не имеет значения, однозначные или неоднозначные отношения являются предметом рассмотрения.

Иллюзия временного характера существования вероятности в классической физике поддерживается также и тем обстоятельством, что во многих задачах, решаемых с использованием вероятностных представлений, заведомо имеется принципиальная возможность знания не только вероятностного, но и детального поведения объекта. Эта ситуация толкуется таким образом, что сначала мы можем иметь лишь вероятностное или

неполное знание, а затем в принципе, устраняя неопределенность в знании условий, в которых протекает процесс, можем получить знание о действительном положении дела.

Однако такое толкование является ошибочным. Оно оказалось бы верным лишь в том случае, если бы вероятность в физике всюду была обязана своим происхождением используемому в ней вероятностно-статистическим методам исследования. Эта концепция безусловно привлекательна своим монизмом в оценке природы вероятностных представлений, однако она не может в целом дать верную картину, и поэтому ее нельзя принять. Повидимому, в мире существуют объективные вероятностные отношения, которые мы способны постигать посредством вероятностно-статистических методов исследования. Знание вероятностных характеристик процесса нельзя рассматривать как знание неполное, мотивируя это тем, что здесь мы еще не знаем деталей изучаемого процесса. Такое заключение основано на предположении, что знание о всех деталях процесса содержит в себе и знание о вероятностных его характеристиках. Но это предположение явно ошибочно. Утверждение о вероятности есть высказывание об устойчивой частоте, отдельные компоненты которой носят иррегулярный характер. Существование такой частоты не может быть выведено из сколь угодно точных и подробных сведений о детальном протекании процесса. Отсюда следует, что как из знания о вероятностных характеристиках нельзя вывести деталей какого-либо процесса, так и из сведений о его детальном протекании нельзя заключить о вероятностных его свойствах. Детальные и вероятностные характеристики процесса проявляются в разных отношениях и несводимы друг к другу, хотя и находятся в определенной связи. Конечно, знание о вероятности может быть неточным в том же смысле, в каком может быть неточным и любое другое знание.

Утверждение о существовании объективных вероятностных отношений, изучаемых классической физикой, находит себе поддержку при анализе проблемы обоснования классической статистической механики. Согласно почти общепринятому мнению, статистическая механика занимается изучением сложных механических систем, характеризующихся огромным числом степеней свобо-

ды. В принципе, как это можно прочитать во многих монографиях по статистической физике, посредством составления уравнений движения для каждой степени свободы и решения их, можно совершенно полно описать поведение такого рода систем. Правда, как обычно подчеркивают, если бы даже и удалось проинтегрировать эти уравнения в общем виде, то, по-видимому, совершенно непреодолимым препятствием на пути предсказания поведения системы встала бы необходимость введения в общее решение начальных условий. Поскольку же оказывается невозможным практически решить эту задачу, приходится вводить вероятностные представления, которые в сущности не имеют объективной обусловленности, а вызываются определенным подходом к изучению действительности. Так, Л. Ландау и Е. Лифшиц в книге «Статистическая физика» пишут: «Следует, однако, подчеркнуть, что вероятностный характер результатов классической статистики сам по себе отнюдь не лежит в самой природе рассматриваемых ею объектов, а связан лишь с тем, что эти результаты получаются на основании гораздо меньшего количества данных, чем это нужно было бы для полного механического описания (не требуются начальные значения всех координат и импульсов)» [6, стр. 17].

Однако рассмотрение статистической системы как чисто механической вряд ли оправдано. Уже у основателей молекулярно-кинетической теории можно встретить высказывания, выражающие сомнения в принципиальной возможности механического описания поведения такого рода систем. В этом же направлении высказывался еще в начале нашего века Э. Борель. Развитие этих идей можно найти в работах Я. Френкеля, М. Борна, Л. Бриллюэна, Д. Блохинцева, Н. Крылова. Хотя и не со всеми положениями, выдвигаемыми этими авторами, можно согласиться, все же общий вывод о невозможности механического представления статистических систем не вызывает сомнения. Классическая механика в качестве своего типичного объекта имеет системы, которые в существенных своих чертах ведут себя как изолированные. Если же рассматривается неизолрированная система, то в принципе всегда считается возможным учесть воздействие на систему посредством ее включения в более широкую, но уже изолированную в данном отношении си-

стему. Конечно, в действительности речь может идти лишь об относительной изолированности.

Рассмотрим теперь какую-либо типичную статистическую систему, скажем, граммолекулу газа, находящегося при нормальных условиях и заключенного в некоторый сосуд. Оказывается, что если даже учесть полностью взаимодействие газа со стенками сосуда, то и тогда данная система не может быть рассмотрена как изолированная механическая система за времена, характерные для термодинамических процессов. Это положение дел объясняется чрезвычайно сильной неустойчивостью системы, обуславливающей ее большую чувствительность по отношению к различного рода возмущениям, всегда существующим в действительности. В данном случае законы механики отнюдь не нарушаются, а просто оказываются неприменимыми, аналогично тому, как они оказываются неспособными описать, например, траекторию бегущей кошки. В отношении к данной статистической системе абстракция изолированности механического типа имеет место лишь за времена порядка времени свободного пробега. По отношению же к ее поведению за достаточно большие времена принципиально нельзя ввести такое рассмотрение, поскольку оно потребовало бы включения бесконечно большого числа факторов.

Но, теряя механическую изолированность за большие времена, статистическая система приобретает изолированность статистическую, которая находит свое выражение в существовании устойчивых частот, вероятностных распределений механических характеристик системы, а также в ее термодинамических свойствах. Рассматриваемые здесь термодинамические вероятности носят объективный характер и не могут быть устранены никаким более глубоким проникновением в сущность термодинамических явлений.

Отмеченная выше связь вероятности в классической физике с взаимодействием объекта со средой весьма интересна в том отношении, что она имеет, по-видимому, некоторый аналог и в микромире. Во всяком случае многие авторы отмечают, что микрообъекты постоянно находятся во взаимодействии со средой. Так, М. Бунге говорит, что «на квантовом уровне точности нет изолированных систем» [7, стр. 451]. «Необходимо обратить

внимание на то,— пишет В. Гейзенберг,— что система, которую следует рассматривать согласно методам квантовой механики, на самом деле является частью значительно большей системы, в конечном счете — всего мира» [4, стр. 150]. Во взаимодействии микросистем с макроокружением видят причину вероятностного характера законов микромира Д. Блохинцев, А. Тяпкин и др.

Следует особо подчеркнуть, что вероятность, привносимая в результат познания вместе с вероятностно-статистическими методами, также имеет объективную основу, но несколько иного рода. На чем основано в сущности статистическое требование производить достаточно большое число измерений? Оно непосредственно опирается на объективно существующие вероятностные свойства процедуры измерения, заключающиеся в том, что ошибки измерения носят вероятностно-случайный характер. Объективные вероятностные отношения лежат в основе любого вероятностно-статистического метода, в то время как эти методы могут быть направлены как на изучение вероятностных, так и любых иных отношений.

Здесь уместно будет заметить, что постоянное подчеркивание М. Борном, а также Л. Бриллюэном и некоторыми другими авторами невозможности однозначного предсказания из-за неточностей в наших знаниях о системе, великолепно может сочетаться и часто сочетается с трактовкой вероятности в классической физике как обусловленной нашим незнанием, правда, уже теперь незнанием, принципиально неустранимым в процессе познания. С моей точки зрения, вероятность, связанная с незнанием, в классической физике действительно имеет место, характеризуя степень наших ожиданий того или иного результата. Однако в классической физике имеется вероятность и другого рода, отражающая существование устойчивых частот. Эта вторая вероятность неустранима в процессе познания, поскольку она является отражением объективных свойств действительности.

В свое время М. Планк высказал мысль, что деление процессов на обратимые и необратимые является наиболее фундаментальным. В то же время он считал, что второе начало термодинамики, в котором находит свое выражение существование необратимых процессов, можно выразить в сущности как принцип элементарного беспорядка. По-видимому, отношения, имеющие место

в действительности и фиксируемые нами как явления беспорядка, занимают большое место в мире, что мы легко представляем практически, но с гораздо большей трудностью теоретически. Порядок и беспорядок — это две стороны действительности. И тот и другой находят свое отражение в самых различных теоретических концепциях. Беспорядок формируется на основании какого-то порядка. Это есть беспорядок порядка. С другой стороны, и порядок есть порядок беспорядка. Являясь беспорядком в отношении к данному порядку, беспорядок в другом отношении сам выступает как новая форма порядка. Вероятность, по-видимому, как раз и следует рассматривать как такое понятие, которое отражает в себе существование беспорядка в отношении к индивидуальным процессам и утверждение нового типа порядка, выражающегося в устойчивых и регулярно складывающихся частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Миллс. Статистические методы. М., 1958.
2. М. Борн. Физика в жизни моего поколения. М., 1963.
3. К. Форд. Мир элементарных частиц. М., 1965.
4. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
5. Лаплас. Опыт философии теории вероятностей. М., 1908.
6. Л. Ландау и Е. Лифшиц. Статистическая физика. М., 1964.
7. М. Бунге. Причинность. М., 1962.

В. С. Готт, А. Ф. Перетулин

О НЕКОТОРЫХ ФИЛОСОФСКИХ ПРЕДПОСЫЛКАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО СМЫСЛА ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ

Вопрос о физическом смысле понятий физики и обозначающих их математических символов имеет два взаимосвязанных аспекта: онтологический и гносеологический.

Первый аспект этого вопроса — это вопрос о наличии у этих понятий каких-то аналогов в природе, отражением которых они являются.

Второй же аспект данного вопроса заключается в выяснении той роли, которую данные понятия физики играют в структуре и развитии физической теории и в ее отношении к эксперименту.

История физики показывает, что во многих случаях необходимым предварительным условием для разумного ответа на вопрос о природном аналоге у того или иного понятия физики является выяснение его роли и значения в структуре и развитии данной физической теории.

Подтверждением сказанного служит неудача попыток, предпринятых Э. Шредингером, де Бройлем, Маделунгом и др., на заре развития квантовой механики, без предварительного гносеологического анализа выяснить онтологический смысл, т. е. найти природный аналог, у такого физического понятия, как волновая функция.

1. О значении гносеологического аспекта анализа физического смысла волновой функции

Существо анализа гносеологического аспекта смысла физических понятий состоит прежде всего в установлении их необходимых связей с другими понятиями физики, а также и философии. Только лишь таким путем можно определить роль этих понятий в структуре и развитии данной физической теории. Анализ гносеологического аспекта смысла волновой функции, введенной в квантовую механику Э. Шредингером в 1926 г., был начат Н. Бором и М. Борном. Названные ученые открыли существующую связь между понятиями волновой функции и вероятности, причем М. Борн отчетливо высказал и идею о вероятностном характере квантовомеханического закона движения микрочастиц, описываемого уравнением Э. Шредингера.

Таким образом, именно М. Борн заложил основы вероятностной трактовки физического смысла волновой функции. Согласно этой трактовке она описывает вероятности нахождения микрочастиц в различных их состояниях, как пространственно-временных, так и импульсно-энергетических, а также и вероятности перехода микрочастиц из одних состояний в другие.

По мнению М. Борна, понятие волновой функции менее общее, чем понятие амплитуды вероятности. Вероятность нахождения микрочастиц в каких-то состояниях представляет собой не нечто неизменное, а процесс, испытывающий колебания в пределах самых различных интервалов. Величину этих интервалов можно рассматривать как амплитуду вероятности. Одним из выражений амплитуды вероятности и является волновая функция в квантовой механике [1, стр. 29].

Более всесторонний анализ гносеологического аспекта смысла волновой функции в дальнейшем дали Н. Бор и ряд его учеников.

Н. Бор связал понятие волновой функции с принципом неопределенности Гейзенберга, корпускулярно-волновым дуализмом в свойствах микрочастиц и с относительностью свойств микрочастиц к средствам их наблюдения.

На основе этих связей Н. Бором было установлено, что вероятностный смысл волновой функции и ее место в структуре квантовой механики можно определить только на основе следующих положений, характеризующих гносеологические основы квантовой механики¹.

Во-первых, непосредственными объектами изучения в квантовой механике служат не микрочастицы сами по себе, а микрочастицы в их взаимодействии с нашими приборами, т. е. системы типа «микрообъект — прибор». Отсюда и следует, что свойства микрообъектов являются относительными к нашим средствам наблюдения, а само наблюдение должно рассматриваться и со своей физической стороны, поскольку оно осуществляется при помощи определенных физических процессов, происходящих в наших приборах. Так, одним из очень важных средств наблюдения являются различные виды фотографирования, а они, бесспорно, относятся к физическим процессам. Вообще здесь нужно сказать, что наблюдение объектов микромира происходит только в процессе нашего (при помощи приборов) воздействия на них, как-то меняющего их состояние, что также свидетельствует

Особенности нашего познания микромира нами излагаются по работам Д. И. Блохинцева, В. А. Фока, А. Д. Александрова, М. Э. Омеляновского, Б. Я. Пахомова, Г. А. Свечникова и др., т. е. в форме, освобожденной от позитивистских наслоений.

о физическом характере наблюдений явлений микромира².

Во-вторых, в зависимости от характера физических процессов, в которых участвуют микрообъекты, т. е. от тех взаимодействий, в которые они вступают, в том числе и в наших приборах, у них проявляются или корпускулярные, или волновые свойства.

Так, если для изучения микрочастиц используется физический процесс ионизации, как, например, в камере Вильсона, то данные эксперимента свидетельствуют об их (частиц) корпускулярных свойствах. Если же для изучения микрочастиц используется их рассеяние от решетки кристаллов, то в эксперименте обнаруживаются их (частиц) волновые свойства. Проявление микрочастицами в определенных взаимодействиях или волновых, или корпускулярных свойств зависит не только от их взаимодействий, но и от их собственных параметров. Чем больше, например, импульс частицы, тем явственнее выступают ее корпускулярные свойства, и, наоборот, чем меньше ее импульс, тем ярче выступают ее волновые свойства.

Очевидно, что и волны, в силу известных соотношений между корпускулярными и волновыми параметрами ($v = \frac{e}{h}, \lambda = \frac{h}{p}$), могут в определенных взаимодействиях проявлять свойства, близкие к корпускулярным. Так, например, очень короткие электромагнитные волны (рентгеновские лучи) имеют много общего с потоком электронов (частиц). Из сказанного следует, что микрочастицы и микроволны (волны с очень высокой частотой) во многих отношениях тождественны друг другу (симметричны) и различие между ними возникает и проявляется лишь в соответствующих процессах и в определенных взаимодействиях.

Тождественность корпускулярных и волновых движений, в определенных отношениях и на определенном уровне существующая у микрообъектов, означает, что

² С позиции теории познания диалектического материализма вопрос о роли приборов в познании микромира есть часть более общего вопроса о роли практики в познании. Наиболее глубокие знания о явлениях природы мы получаем не в процессе их созерцания, а в процессе их изменения, в процессе практического действия на них.

последние обладают корпускулярными и волновыми свойствами только, по терминологии В. А. Фока, в форме потенциальных возможностей.

Переход же этих возможностей в действительность осуществляется как в зависимости от тех взаимодействий, в которых участвуют микрообъекты, так и в зависимости от их собственных параметров.

Общим законом превращения одной из нескольких возможностей в действительность является исключение других возможностей. Так, в отношениях порядка между величинами (a) и (b) существует три возможности: $a=b$, $a>b$ и $a<b$, и если в действительность перешла первая возможность, то две другие уничтожаются.

Осуществление возможности проявления корпускулярных свойств ликвидирует возможность проявления волновых свойств, и наоборот. Наличие тождества, слияния волновых и корпускулярных свойств микрообъектов в форме возможности (симметрия этих свойств) и их взаимоисключение в процессе перехода из формы возможности в форму действительности (асимметрия этих свойств) объединено Н. Бором в сформулированном им принципе дополнительности³.

Односторонне раздувая в системе микрообъект — прибор роль прибора, Н. Бор пришел и к односторонней трактовке открытого им принципа, как постулата о необходимости применения при изучении микромира приборов двух типов: пространственно-временных и импульсно-энергетических, — показания которых взаимно дополняют друг друга.

Очевидно, что хотя в этой трактовке имеется доля истины, она все же затушевывает глубокое содержание принципа дополнительности, заключающееся во взаимосвязи симметрии и асимметрии волновых и корпускулярных свойств микрообъектов.

В-третьих, существенной особенностью познания микромира является все более нарастающая необходимость в последовательном ограничении лапласовского детерминизма, а тем самым и методов мышления классической физики. Как известно, глубокой критике лапласов-

³ Видимо, принцип дополнительности Н. Бора в качестве своей основы имеет взаимосвязь симметрии и асимметрии волновых и корпускулярных свойств микрообъектов.

ский детерминизм был подвергнут еще Ф. Энгельсом во второй половине XIX века. Но во времена Ф. Энгельса лапласовская форма детерминизма, имея глубокие корни в основных принципах классической физики, конечно, не могла быть преодолена, ибо она в основном подтверждалась классической физикой, хотя и в последней были уже тенденции к ее ограничению. Но все же критика лапласовского детерминизма Ф. Энгельсом имеет огромное методологическое значение и для нашего времени. Поэтому не лишне напомнить основные положения энгельсовской критики лапласовского детерминизма.

Ф. Энгельс ограниченность лапласовского детерминизма видел прежде всего в том, что в этой форме детерминизма признается проявление необходимости только через неизбежность и отрицается ее проявление через случайность и возможность. Отсюда — узость и ограниченность, присущие этой форме детерминизма.

Лапласовский, или, как говорил Ф. Энгельс, механистический, детерминизм опирается на отрицание объективного существования случайности, для него объективная реальность существует только в сфере необходимости. Отсюда и его несовместимость с признанием объективного существования статистических закономерностей. В лапласовском детерминизме, отмечал Энгельс, необходимость, в итоге, превращается в предопределенность, в какой-то рок, т. е. становится в противоречие с научным познанием явлений природы и их практическим использованием.

Ограниченность лапласовской формы детерминизма, отмеченная Ф. Энгельсом, ярко проявилась в свете открытий квантовой механики, а позднее и кибернетики. Квантовая механика дала всесторонние основания для преодоления лапласовской формы детерминизма в физике и углубления ее философской критики. В свете открытий квантовой механики стало ясным, что такое требование лапласовского детерминизма, как требование однозначной определенности последующих состояний частиц их предыдущими состояниями, в микромире не выполняется. На материале квантовой механики стала ясной необоснованность и такого требования лапласовского детерминизма, когда рассматривают любую неопределенность в параметрах явлений микромира как результат неточности наших знаний, наших измерений.

Квантовая механика открыла существование объективной неопределенности в явлениях микромира, которую ни при какой точности измерений устранить нельзя⁴.

Признание существования объективной неопределенности в явлениях микромира непосредственно связано с признанием проявления необходимости не только через неизбежность, но и через случайность и возможность. Со времени появления квантовой механики в природе стали систематически изучаться не только действительные и необходимые состояния ее явлений, но и их случайные и возможные состояния, а также и взаимные переходы первых во вторые и обратно. Также стали изучаться не только определенности явлений природы, но и их неопределенности, причем не в их изолированности, а в их взаимных переходах.

Объективная диалектика природы значительно глубже обнаружена квантовой механикой и основанными на ней отраслями новой физики (квантовая электродинамика, физика элементарных частиц, квантовая физика твердых тел и т. д.), чем классической физикой. Отсюда и огромное значение квантовой механики не только для развития физики, но и для развития философии диалектического материализма. Таковы основные особенности нашего познания микромира, без учета которых нельзя правильно определить философские позиции при ответе на вопрос о физическом смысле волновой функции.

2. Об основных направлениях в определении физического смысла волновой функции

Все известные интерпретации физического смысла волновой функции можно отнести к двум основным направлениям: онтологическому и гносеологическому.

Об объективной неопределенности параметров явлений микромира говорит С. Т. Мелюхин, отмечая, что «основные свойства микрообъектов являются статистически средними во времени. Это значит, что если непрерывно уменьшать интервал времени, то каждый раз будут получаться различные значения свойств, а может быть, и разные микрообъекты» [2, стр. 139]. Существование объективной неопределенности отмечает и Б. Я. Пахомов, называя ее «истинной неопределенностью». В процессе рождения резонансов, пишет он, экспериментально обнаруживается «истинная неопределенность», принципиально отличная по своему смыслу и происхождению от неточности измерений [3, стр. 120].

Сторонники первого направления стремятся, в первую очередь, указать на природный аналог волновой функции, понимая под ним или особые материальные образования (волновой пакет Шредингера), или особые виды взаимодействия (взаимодействие частиц с особым волновым полем — Д. Бом).

Не давая характеристики всем видам таких попыток определить природный аналог волновой функции [4, стр. 453—463; 5, стр. 29—39], коротко отметим только следующее. Во-первых, общей основой этих попыток является недооценка как особенности микромира, так и особенностей его познания, а также стремление в той или иной форме истолковать понятия квантовой механики в духе классической физики, в частности с позиций лапласовского детерминизма. Во-вторых, бесспорно положительным во взглядах сторонников данного направления является их убежденность, которую разделяют большинство физиков, в том, что волновая функция имеет объективное содержание, т. е. отражает какую-то физическую реальность, а также и то, что они резко выступают против всех попыток индетерминистски истолковать квантовую механику. Так что во взглядах сторонников первого направления имеются и отрицательные, и положительные стороны.

Что же касается сторонников второго направления (гносеологического), то нужно отметить, что их взгляды весьма разнородные. Среди них встречаются и такие, которые начисто отрицают объективное содержание в понятии волновой функции и рассматривают это понятие просто как математический символ, а волны де Бройля — как «волны нашего знания». Но среди них имеются и приверженцы взглядов, основанных на позициях диалектического материализма, направленных против попыток дать индетерминистское и субъективистское истолкование квантовой механики (Д. М. Блохинцев, В. А. Фок, А. Д. Александров).

У сторонников гносеологического подхода к определению волновой функции имеется то общее, что все они признают борновскую трактовку волновой функции (как выражение амплитуды вероятностей) и ее статистическую или вероятностную сущность. А это значит, что борновская интерпретация волновой функции может быть интерпретирована с самых различных позиций. Види-

мо, все дело в том, как отметил А. Д. Александров, что вкладывать в понимание существа физических величин, их измерения и вероятности [6].

Очевидно, что сторонники диалектического материализма, раскрывая гносеологический аспект вопроса о смысле волновой функции, в силу его переплетения с онтологическим аспектом и признания объективного содержания в понятии волновой функции, приходят и к некоторым выводам об ее природном аналоге.

В плане нашей темы большой интерес представляет сравнение взглядов на волновую функцию Д. И. Блохинцева и В. А. Фока, так как каждый из них с одинаковых философских, но различных физических позиций отмечает важные стороны в физическом смысле волновой функции.

Прежде всего отметим то общее, что имеется в их взглядах на волновую функцию. Как Д. И. Блохинцев, так и В. А. Фок признают объективное содержание в понятии волновой функции и резко отмежевываются от ее идеалистических интерпретаций. При анализе смысла и значения волновой функции они опираются на особенности микромира и его познания, причем одинаково считают, что предметом квантовой механики являются системы: микрочастица — приборы. Отсюда, правда, различными путями, они приходят к одинаковому по существу выводу о том, что свойства микрообъектов являются относительными к средствам наблюдения, понимая под последними те взаимодействия, которые используются в наших приборах.

Различие же между взглядами Д. И. Блохинцева и В. А. Фока на существо волновой функции следующее.

Д. И. Блохинцев в качестве исходного понятия для характеристики волновой функции рассматривает понятие о квантовомеханических ансамблях, представляющих собой объективные совокупности состояний как многих частиц, так и одной частицы.

Поскольку состояния как одной частицы, так и многих частиц не могут быть установлены в единичном акте измерения (единичном опыте), постольку необходимо иметь дело с наборами измерений, которые также представляют собой квантовомеханические ансамбли. Таким образом, квантовые ансамбли существуют в двух формах: в форме объективной реальности, как совокуп-

ности состояний частиц или частицы, и в форме отражения этой реальности в нашем познании, как набор измерений этих состояний.

В понятии квантовомеханических ансамблей Д. И. Блохинцеву, на наш взгляд, удалось правильно решить вопрос о сочетании объективных и субъективных моментов в квантовой механике на основе марксистско-ленинской теории отражения. Субъективные моменты, т. е. моменты, связанные с деятельностью наблюдателя, в понятиях квантовой механики представляют собой не что иное, как отражение объективных состояний микрообъектов в их принадлежности к квантовомеханическим ансамблям.

Основываясь на понятии о квантовомеханических ансамблях, Д. И. Блохинцев состояние микрочастиц определяет как их принадлежность к тому или иному ансамблю, т. е. отдельно рассматривает только лишь в той связи, которая ведет к общему. Отсюда волновую функцию он определяет как статистическое описание состояний частиц в их принадлежности к квантовомеханическим ансамблям. Но в каждом отдельном всегда существует общее, поэтому в каждом состоянии частицы выражается и ее принадлежность к какому-то ансамблю, объективной характеристикой которого также является волновая функция [7, стр. 45, 54].

С точки зрения Д. И. Блохинцева, главное в волновой функции заключается в том, что она выражает не индивидуальные свойства состояний частицы, а общие свойства ее состояний, через принадлежность состояний частицы к какому-то квантовомеханическому ансамблю [8, стр. 64].

Данное положение Д. И. Блохинцева тесно связано с учетом такой объективной особенности микромира, как стирание в нем индивидуальных различий между его объектами, в частности тождественность одинаковых частиц. В его трактовке волновая функция глубоко связана с принципом тождественности одинаковых частиц.

Теперь перейдем к характеристике взглядов на волновую функцию В. А. Фока. В качестве исходного понятия для определения волновой функции он принимает понятие об объективно существующих потенциальных возможностях взаимодействия микрочастиц с условиями их существования — средой, в том числе и с приборами.

Причем, по его мнению, в квантовой физике между микрообъектами и приборами нельзя провести резкой грани, так же как нельзя провести резкую грань между организмом и его средой в биологии [9, стр. 234].

По существу это то же положение, что и положение Д. И. Блохинцева о неотделимости частицы от ее макроскопической обстановки, «диктующей ей условия движения» [8, стр. 64].

Далее, В. А. Фок вероятности изменения микрочастиц рассматривает как отражение объективных потенциальных возможностей, взаимодействия частиц с приборами и, таким образом признает в вероятностях объективное содержание. Волновая функция, по мнению В. А. Фока, это не статистическое понятие, как у Д. И. Блохинцева, а вероятностное понятие, отражающее потенциальные возможности взаимодействия микрообъектов с приборами [10, стр. 58, 65].

В связи с данным определением волновой функции естественно возникает вопрос, что же нужно понимать под потенциальными возможностями? Насколько нам известно, В. А. Фок ограничивается тем, что подчеркивает их объективное существование в природе как основы вероятностного характера всех процессов микромира.

Полностью соглашаясь с этим положением, нам представляется необходимым добавить следующее.

В природе имеются возможности двоякого рода: во-первых, возможности, уже существующие в данных состояниях микрообъектов и при данных условиях, и, во-вторых, возможности, возникающие при изменении данных состояний и условий. Видимо, под потенциальными возможностями В. А. Фок понимает именно эти становящиеся возможности, которые возникают и исчезают в процессах изменения состояний объектов и условий их существования. Признавая существование потенциальных возможностей, необходимо также признать историчность и множественность⁵ объективных возможностей, их вытеснение друг другом, а тем самым и существование объективной неопределенности при переходах возможностей в действительность. Это означает, что установление уже существующих возможностей в данном

⁵ «В каждой материальной системе,— пишет С. Т. Мелюхин,— существует во много раз больше возможностей, чем может реализоваться» [11, стр. 31].

состоянии микрообъекта еще не дает оснований для однозначной характеристики его последующих состояний, даже в пределах установленных возможностей, так как в процессе изменения данного состояния возникнут какие-то новые возможности и исчезнут какие-то имевшиеся возможности. Отсюда следует, что в процессе взаимодействия частицы с прибором может происходить не только реализация уже имеющихся в ее состоянии до этого взаимодействия возможностей, но и возникновение новых возможностей и именно их переход в новое действительное состояние частицы.

Как Д. И. Блохинцев, так и В. А. Фок, на наш взгляд, раскрыли весьма важные различные стороны смысла и значения волновой функции и наметили правильный путь к определению ее объективного аналога в природе, через раскрытие ее связей с другими понятиями и принципами квантовой механики. Для того чтобы определить природный аналог волновой функции, именно необходимы дальнейшие исследования ее связей с основными понятиями и принципами квантовой механики: в первую очередь с особенностями законов сохранения в микромире, с принципом квантовой суперпозиции, с принципом единства симметрии и асимметрии, принципом Паули, с постоянной Планка и т. д. Но для обоснованного ответа на вопрос о природном аналоге волновой функции необходим и философский анализ, в особенности следующих вопросов: о существовании диалектического понимания детерминизма, об основах вероятностной характеристики законов микромира, о соотношении возможности, случайности, необходимости и действительности и ряда других.

Ответы на данные вопросы необходимо связаны с дальнейшим развитием категорий диалектического материализма. В этом деле большая роль принадлежит тем выводам, к которым пришла квантовая механика в отношении особенностей нашего познания микромира и особенностей его закономерностей. Но до сих пор еще недостаточно осознано, что квантовая механика закладывает основы «нового физического мировоззрения» [12, стр. 402] и тем самым дает огромный материал для философских обобщений, в частности и в плане развития категорий диалектического материализма.

3. Что дает квантовая механика для развития категорий диалектического материализма?

Для ответа на поставленные выше вопросы о сущности диалектического детерминизма, о вероятностной характеристике законов микромира и о соотношении возможности, случайности, необходимости и действительности целесообразно, обобщая некоторые весьма важные выводы квантовой механики, ввести в понятийный аппарат диалектического материализма такие категории, как неопределенность и определенность, отображающие особые формы существования явлений мира.

Как уже отмечалось выше, квантовая механика изучает не только определенности явлений микромира, но их неопределенности, обладающие, как и первые, объективным существованием. Открытие в области квантовых процессов объективной неопределенности явлений природы обусловило острое противоречие между фактическим материалом квантовой механики и лапласовской формой детерминизма.

Наличие этого противоречия вполне понятно, так как в лапласовской форме детерминизма признается только определенность параметров, характеризующих явления природы, и целиком отрицается их неопределенность.

Наука потому наука, провозглашает лапласовский детерминизм, что она всюду и везде изгоняет неопределенность и имеет дело только с определенностью. Именно с позиции лапласовского детерминизма имели и имеют место попытки изгнать неопределенности из квантовой механики. Действительный глубокий смысл таких интерпретаций квантовой механики, как интерпретации Бома, Яноши и др., заключается именно в том, чтобы построить квантовую механику без каких-либо неопределенностей, на базе лапласовского детерминизма. Эти попытки свидетельствуют о большой устойчивости в нашем сознании лапласовского детерминизма. В чем же причины устойчивого влияния лапласовского детерминизма на строй научного мышления?

Во-первых, в том, что лапласовский детерминизм представляет собой не сплошное заблуждение, а относительную истину, применимую в порядке первого приближения в довольно широких областях мира.

Во-вторых, причиной устойчивого влияния лапласовского детерминизма является недостаточно широкое и глубокое философское обобщение открытий квантовой механики, что привело к тому, что лапласовскому пониманию детерминизма не было широко противопоставлено более глубокое, основанное на фактическом материале современной науки, диалектико-материалистическое понимание детерминизма. В отличие от лапласовского детерминизма, который признает лишь определенности явлений мира, диалектический детерминизм опирается на диалектику соотношения определенности и неопределенности в процессах взаимодействия и превращений явлений мира.

В целях большей ясности изложения коротко напомним некоторые положения квантовой механики, из которых вытекает наличие в природе объективной неопределенности в явлениях микромира.

С объективной неопределенностью в процессах микромира физика столкнулась еще в боровской модели атома, в связи с ее постулатом, устанавливающим следующее соотношение между энергетическими уровнями электрона в атоме и частотой его излучения или поглощения электромагнитных волн:

$$\frac{E_2 - E_1}{h} = \nu \quad \text{где } E_2 \text{ и } E_1$$

— энергетические уровни, h — постоянная Планка, ν — частота излученного или поглощенного света.

Как видно из данного соотношения, частота излучения электрона зависит не только от того уровня, с которого он переходит, но и от того уровня, на который он переходит. Перейти же электрон может с данного уровня на ряд возможных уровней, так что налицо оказывается явная неопределенность.

Неопределенность здесь связана с наличием нескольких возможностей для перехода электрона с одних энергетических уровней на другие. Таким образом, мы здесь имеем дело не с достоверностью перехода электрона именно на данный уровень, а с некоторой вероятностью именно этого перехода. Очевидно, что неопределенность здесь выражается через возможности и вероятности.

Вообще нужно отметить, что там, где существует множество возможностей, а они возникают и исчезают, там имеет место и объективная неопределенность. В истории физики известны попытки истолковать неопреде-

ленности, имеющие место в атомных переходах электронов с одних уровней на другие, как наличие у электронов «свободы воли», т. е. как полную индетерминированность их поведения.

Признание «свободы воли» у электронов есть прямое следствие ограниченности лапласовского детерминизма, отрицающего существование объективной неопределенности, являющейся основой вероятностного характера законов микромира.

Наличие объективной неопределенности в явлениях микромира глубоко и непосредственно выражается принципом неопределенности Гейзенберга. Этот принцип отражает объективную неопределенность, существующую между пространственно-временными и импульсно-энергетическими состояниями микрочастиц в их зависимости друг от друга, которая состоит в том, что определенность одних состояний порождает неопределенность других состояний. Частным случаем этой зависимости является то обстоятельство, что такая определенность пространственно-временного состояния микрочастиц, как наличие у частиц определенных координат, возможна лишь при существовании неопределенности в их импульсах.

Принцип неопределенности Гейзенберга показывает, что определенность и неопределенность явлений микромира нельзя рассматривать изолированно друг от друга, а только в их взаимной связи и в их взаимных переходах.

Эта сторона содержания данного принципа является одной из основ диалектического понимания детерминизма в явлениях мира. Еще более глубоким выражением диалектики определенности и неопределенности в явлениях микромира является присущий им корпускулярно-волновой дуализм. Как уже говорилось выше, корпускулярные и волновые свойства частиц в их потенциально возможных состояниях сливаются друг с другом, так что частицы в отношении этих свойств полностью неопределенны — определенность частицы относительно этих свойств возникает при переходе имеющихся у них возможностей в действительность. Из сказанного понятно, что такой принцип квантовой механики, как принцип относительности к средствам наблюдения (понимаемый в вышеуказанном смысле), основывается на объективных процессах перехода возможностей в действительность и

объективной неопределенности явлений микромира — в их определенность.

Объективная неопределенность явлений микромира выражается и в принципе квантовой суперпозиции. В квантовой механике, в отличие от классической физики, происходит наложение не только действительных состояний на действительные же состояния, но и возможных состояний на возможные и действительные состояния. А вместе с возможностями и их множеством в квантовую суперпозицию входит и неопределенность. В квантовой механике допускается, что частица может находиться частично в одном возможном состоянии, а частично в другом возможном состоянии.

Так, например, фотон можно представлять находящимся частично в состоянии поляризации, параллельной оптической оси кристалла, а частично в состоянии поляризации, перпендикулярной к той же оси. Какое же из этих состояний фотона станет действительным состоянием, объективно является неопределенным до перехода одного из них из состояния возможности в состояние действительности.

«В классическом смысле,— пишет П. Дирак,— нельзя представить себе, что система находится частично в одном состоянии, а частично в другом состоянии и что эквивалентно тому, что система находится в некотором третьем состоянии. Здесь вводится совершенно новая идея» [13, стр. 29].

Этой новой идеей и является признание объективной неопределенности в процессах микромира.

Неопределенность в квантовую механику вводится и посредством корреляционных связей, имеющих в ней большое значение.

Корреляционными связями, как известно, называют статистическую или вероятностную зависимость событий или величин друг от друга, не имеющую строго функционального характера.

Корреляционная зависимость двух величин возникает тогда, когда одна из них зависит не только от второй величины, но также от ряда изменяющихся условий. Примером корреляционной зависимости может служить зависимость интенсивности полярных сияний от интенсивности солнечного корпускулярного излучения; так как между первой и второй интенсивностью нет строгой

функциональной зависимости, поскольку первая зависит и от таких изменяющихся условий, как состояние ионосферы и т. д.

Но не является ли введение понятия об объективной неопределенности чем-то чуждым содержанию других категорий материалистической диалектики? Отрицательный ответ на этот вопрос будет ясен из нижеследующего.

Признание существования объективных неопределенностей содержится уже в диалектическом понимании движения как нахождения движущегося тела и «здесь», и «не здесь». Движение по самой своей сущности есть явная неопределенность, и сущность движения выражается известной диалектической формулой «и да, и нет». Эта формула выражает общей формой существование объективной неопределенности в явлениях.

Кстати говоря, одна из ограниченностей формальной логики состоит именно в том, что она имеет дело только с определенностью и отвлекается от неопределенности. Отсюда и формула формальной логики «или да, или нет».

Очень ярко проявляется объективная неопределенность в существе случайных явлений, что было отмечено еще Ф. Энгельсом. Одно из распространенных определений случайных явлений, а они объективно существуют, гласит: случайное явление — это явление, которое может быть, а может и не быть. Очевидно, что это определение случайных явлений основано на признании объективной неопределенности явлений мира.

Признание существования объективной неопределенности вытекает из признания принципа всеобщей связи и зависимости явлений мира. Поскольку эти связи бесконечны и к тому же то возникают, то исчезают, — в любом свойстве явлений, обусловленном этими связями, существует неустранимая объективная неопределенность, что и проявляется в неизбежных неточностях при их измерении.

Неточности в наших измерениях имеют своим источником не только несовершенство наших приборов, но и объективную неопределенность, присущую явлениям мира. А это значит, что неточности измерения должны органически входить в научную теорию, как один из моментов правильного отражения ею объективной действительности. Можно показать, что все категории материа-

листической диалектики так или иначе включают в себя неопределенность в том или ином ее выражении. Поэтому включение понятия о неопределенности в систему понятий материалистической диалектики диктуется не только тем, что это понятие органически вошло в понятийный аппарат современной науки (квантовая физика, кибернетика), но и потребностью в уточнении и развитии системы понятий диалектического материализма.

Однако главное состоит не в том, чтобы ввести в систему понятий материалистической диалектики категории определенности и неопределенности, а в том, чтобы выяснить связь между ними. А для этого необходимо, хотя бы в предварительном виде, дать характеристику этим категориям.

Неопределенность как одну из форм объективного существования явлений мира можно охарактеризовать при помощи следующих признаков: это, во-первых, отсутствие резких граней между свойствами и состояниями явлений природы, например между протонами и нейтронами в ядрах атомов; во-вторых, это преобладание зависимости свойств, состояний явлений друг от друга над их относительной независимостью.

В-третьих, это проявление необходимости не как неизбежности, а как возможности и случайности, например в радиоактивном распаде атомов.

Определенность — это форма объективного существования явлений мира, обладающая следующими признаками. Это, во-первых, наличие резко выраженных граней между состояниями явлений природы, например резкое отличие между протонами и нейтронами в электромагнитных взаимодействиях или в их свободных состояниях. Во-вторых, это относительная независимость свойств, состояний явлений друг от друга. Например, независимость массы от скорости при небольших величинах последней.

В-третьих, это выражение необходимости через неизбежность, однозначность переходов возможности в действительность и существование невозможности⁶ каких-то

⁶ Рассматривая неопределенность саму по себе, можно допустить, что возможны любые изменения, так как возможность каких-то изменений в силу бесконечных связей явлений мира ничем не ограничивается, поэтому в «чистой» неопределенности стирается различие между возможностью и действительностью.

состояний. Здесь же отметим, что существование объективной невозможности каких-то состояний, переходов, преобразований является одним из главных признаков, характеризующих определенность явлений природы.

Между неопределенностью и определенностью явлений мира существует глубокая взаимосвязь и взаимообусловленность. Определенность явлений природы существует только на основе их неопределенности, возникает из нее и является ее стороной. Неопределенность же — это определенность в ее становлении.

Долгое время явления природы изучались лишь со стороны их определенности, присущая же им неопределенность оставалась в тени, и о ней шла речь только в связи с неточностями наших измерений и подсчетом вероятности случайных явлений.

Неопределенность явлений природы стала объектом научного познания со времени возникновения квантовой механики. Причем для квантовой физики особое значение имеет изучение процессов становления неопределенности в определенность и обратно: например, переходы частиц и полей из виртуальных (неопределенных) состояний в действительные (определенные) состояния; или переходы неопределенных, бестраекторных состояний движения частиц в определенные траекторные состояния их движения.

Наличие определенности в неопределенности, как ее стороны, ярко проявляется в многообразных превращениях элементарных частиц. Причем определенности в этих превращениях выступают в присущих им законах сохранения. Законы же сохранения выражают наличие в этих превращениях ряда физических невозможностей, обуславливающих становление определенности в превращениях элементарных частиц.

Более общим положением, характеризующим возникновение определенностей из неопределенностей, является превращение возможностей в действительность.

Изучение переходов возможностей в действительность — одна из важнейших сторон квантовой механики. Частным примером перехода возможности в действительность является редукция «волновых пакетов», которую Д. И. Блохинцев справедливо считает объективным физическим процессом, в отличие, например, от В. Гейзенберга, рассматривающего ее как переход возможно-

сти в действительность, путем скачка, в процессе наблюдения.

Вообще В. Гейзенберг считает, что «переход от возможности к действительности совершается в процессе наблюдения» [14, стр. 34]. С точки зрения В. Гейзенберга, неопределенность, присущая возможным состояниям, переходит в определенность действительных состояний лишь в процессе наблюдения, т. е. благодаря вмешательству познающего субъекта.

Возможность и действительность, по его мнению, существуют в самой природе, а переход возможности в действительность — только в нашем познании. «Функция вероятностей,— пишет он,— объединяет объективные и субъективные элементы», причем к объективным элементам относятся возможность и действительность, а к субъективным — переход возможности в действительность⁷ [14, стр. 32].

Редукция «волнового пакета», на наш взгляд, как объективный физический процесс, получает простую интерпретацию на основе закона сохранения вероятности, принадлежащего к наиболее общим физическим законам сохранения. Этот закон лежит в основе принципа унитарности. Его существо заключается в том, что он устанавливает, что сумма вероятностей осуществления всех возможных событий равняется единице; единице же равна и вероятность достоверного, т. е. фактически осуществившегося, события.

Теперь представим, что вероятности попадания движущегося электрона в какую-то точку на фотопластинке, после прохождения им какого-то отверстия из многих имеющихся на промежуточном экране, равны между собой и налицо, следовательно, полная неопределенность. Но после того как электрон попал в какую-то точку на фотопластинке, т. е. реализовалась одна какая-то возможность, вероятности всех других возможностей стали равными нулю, а вероятность осуществившегося события стала равной единице, сумма же всех вероятностей осталась равной единице. В предлагаемом аспекте редукция «волнового пакета» отображает объективный

⁷ В этом новом положении В. Гейзенберг явно объединяет материализм и субъективный идеализм, что свидетельствует о непоследовательности, эклектичности его философского мышления.

процесс перехода одной из нескольких возможностей в действительность, одной из нескольких вероятностей в достоверность.

Большой интерес представляет выяснение связи волновой функции как характеристики состояний с такой характеристикой состояний, как энергия. Основой этой связи часто считают известное сопоставление волновых свойств движения с такими его параметрами, как энергия, импульс, действие. Энергии, как известно, сопоставляется частота волны, а импульсу — длина волны. Это сопоставление принадлежит к числу фундаментальных положений квантовой механики, и оно же послужило одной из основ для трактовки волн вероятности как волн такого же типа, как, например, электромагнитные волны. Несостоятельность такой трактовки давно уже обнаружена, но остается неясным вопрос: имеет ли сопоставление частоты и энергии всеобщее значение, или же оно ограничено? Известно также, что для того, чтобы спасти всеобщность сопоставления энергии и частоты, т. е. соотношения $E=h\nu$, волны вероятности стали интерпретировать как волны нашего знания, т. е. отрицать их объективное существование. Но в решении этого вопроса есть и другая возможность: признать объективное существование волн вероятности и ограничить общность сопоставления частоты и энергии. При выборе этой последней возможности, очевидно, нельзя связывать с каждой волной перенос энергии и массы и рассматривать волну любого типа как поток энергии. Видимо, необходимо более общее определение волны, как функции от некоторых параметров, выражающей общие структурные черты волн любого типа.

Сравнение волновой функции с энергией лучше, на наш взгляд, провести на основе более общей связи энергии с возможностью и вероятностью. Связь энергии, как меры превращаемости форм движения материи, и вероятности, как меры превращения возможности в действительность, основывается прежде всего на том обстоятельстве, что любой процесс превращения включает в себя реализацию одних возможностей и уничтожение других возможностей. Возможности, как отмечалось уже выше, имеют исторический характер, они возникают и исчезают, поэтому любое превращение имеет вероятностную сторону. Вероятность входит в содержание любо-

го процесса превращения. Кинетическая энергия, как известно, может превратиться в тепловую, электрическую, потенциальную и другие виды энергии. Причем возможности этих превращений непрестанно меняются, меняются и условия их превращения в действительность. Поэтому переход одних видов энергии именно в данные ее виды, а не вообще, совершается с какой-то вероятностью, а не с полной достоверностью. Конкретным превращениям энергии, следовательно, свойственна объективная неопределенность. Объективная неопределенность свойственна и значениям энергии, что ярко проявляется в виртуальных состояниях элементарных частиц. Итак, между энергией и вероятностью и вероятностью существует глубокая объективная связь.

Но связь энергии и вероятности осуществляется и опосредованным образом, в частности через энтропию. Связь между энергией и энтропией, по мнению М. Планка, имеет очень глубокий характер, а поэтому, поскольку энтропия связана с вероятностью, с вероятностью связана и энергия. Такой, например, вид энергии, как свободная энергия, «может быть понят по существу только в зависимости от вероятности» [16, стр. 113].

Итак, энергия и вероятность глубоко между собой связаны, и нет ничего удивительного в том, что вероятности состояний определяются энергией, а значения энергии — вероятностью состояний. Отсюда и связь волновой функции с энергией; колебания волновой функции не несут энергию, но зависят от энергии, в свою очередь волновая функция выражает общие волновые свойства в процессах передачи и превращения энергии и их вероятностную сторону. Нам представляется, что изучение связей волновой функции с энергией, импульсом, моментом импульса и другими параметрами физических взаимодействий во многом бы помогло более глубокому определению онтологического аспекта физического смысла волновой функции.

Однако нельзя забывать и о такой общей философской основе раскрытия смысла волновой функции, как ее связь с категориями неопределенности и определенности.

В самом общем виде волновую функцию можно представить как характеристику объективных переходов микрочастиц из обладающих неопределенностью возможных

состояний в имеющие определенность действительные состояния, и наоборот.

Это определение волновой функции подчеркивает и то весьма важное обстоятельство, что волновая функция ни в коем случае не может быть правильно интерпретирована на основе лапласовской формы детерминизма, а только на основе диалектико-материалистического понимания детерминизма, развитие которого в свою очередь невозможно без философского обобщения выводов квантовой механики.

Поэтому анализ философских предпосылок раскрытия физического смысла волновой функции имеет большое значение и в плане углубления диалектико-материалистической трактовки детерминизма явлений природы.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Борн. Физика в жизни моего поколения. М., 1963.
2. «Философские проблемы физики элементарных частиц». М., 1963.
3. Б. Я. Пахомов. Соотношение неопределенности и законы сохранения.— Вопросы философии, 1967, № 2.
4. М. Бунге. Причинность. М., 1962.
5. «Нильс Бор и развитие физики». М., 1958.
6. А. Д. Александров. О смысле волновой функции.— «Доклады АН СССР», т. 85, № 2, 1952.
7. Д. И. Блохинцев. Основы квантовой механики. М., 1961.
8. Д. И. Блохинцев. Принципиальные вопросы квантовой механики. М., 1966.
9. Методологические проблемы науки. М., 1964, стр. 234.
10. «Философские вопросы современной физики», вып. 2. М., 1966.
11. «Проблема возможности и действительности». М., 1964.
12. Л. И. Мандельштам. Полн. собр. трудов, т. 5. М., 1950.
13. П. Дирак. Принципы квантовой механики. М., 1960.
14. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
15. М. Планк. Единство физической картины мира. М., 1966.

Б. М. Барбашов

ФЕЙНМАНОВСКИЙ КОНТИНУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

Квантовая механика при своем создании формулировалась двумя математически различными способами: при помощи дифференциального уравнения Шредингера, с

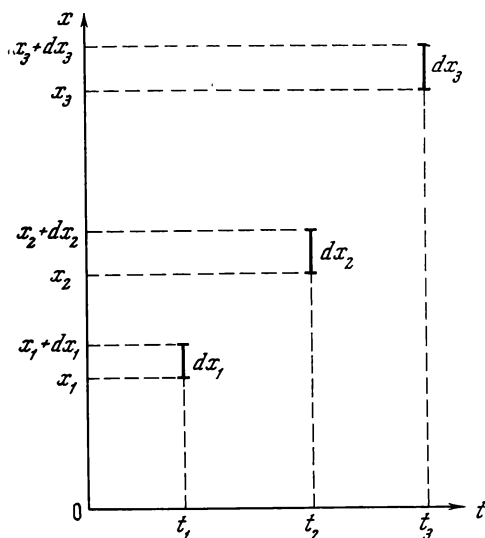


Рис. 1

одной стороны, и матричной алгебры Гейзенберга — с другой. В дальнейшем Дирак, создав теорию представлений, показал, что эти две точки зрения являются математически эквивалентными.

Подход, предложенный Фейнманом, представляет собой по существу третью формулировку квантовой теории. Он был подсказан автору некоторыми замечаниями Дирака относительно роли классической функции действия в квантовой механике. Из этой формулировки также следуют первые две, но она дает возможность взглянуть на квантовую теорию с новой точки зрения. С одной стороны, эта новая формулировка наглядно показывает, в каком пункте квантовая теория примыкает к классической, с другой стороны, отчетливо видны принципиальные различия этих подходов к явлениям в микромире. Для того чтобы это показать, мы начнем с рассмотрения континуального подхода Винера к теории броуновского движения частиц.

В 1923 г. Н. Винер [1] предложил интересную формулировку теории броуновского движения, которая привела к понятию функционального, или континуального, интеграла. Исходной точкой служил вывод Эйнштейна [2] и

Смолуховского о том, что вероятность попадания свободной броуновской частицы из точки $x=0$ в промежуток x_1+dx_1 (рис. 1) за время t_1 есть

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi t_1 m^{-1}}} e^{-\frac{mx_1^2}{2t_1}} dx_1 = dP(0, 0 | x_1, t_1).$$

Коэффициент диффузии D принят равным $D=2/m$.

Далее, вероятность попадания за время $t_2 - t_1$ из области x_1+dx_1 в область x_2+dx_2 равна

$$dP(x_1, t_1 | x_2, t_2) = \frac{e^{-\frac{m(x_2 - x_1)^2}{2(t_2 - t_1)}}}{\sqrt{2\pi(t_2 - t_1)m^{-1}}} dx_2;$$

она не зависит от предыдущей вероятности попадания в x_1+dx_1 и т. д. Если рассматривать конечный интервал $\alpha_1 - \beta_1$, то вероятность задается интегралом (будем ее обозначать через P).

$$P_{01}(0, 0 | \alpha_1 - \beta_1, t_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t_1 m^{-1}}} \int_{\beta_1}^{\alpha_1} e^{-\frac{mx_1^2}{2t_1}} dx_1;$$

$$P_{12}(x_1, t_1 | \alpha_2 - \beta_2, t_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(t_2 - t_1)m^{-1}}} \int_{\beta_2}^{\alpha_2} e^{-\frac{m(x_2 - x_1)^2}{2(t_2 - t_1)}} dx_2.$$

Итак, вероятность попадания частицы в $\alpha_2 - \beta_2$ при прохождении через $\alpha_1 - \beta_1$ есть произведение

$$P_{02} = P_{01} \cdot P_{12} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi t_1 m^{-1}} 2\pi(t_2 - t_1)m^{-1}} \int_{\beta_1}^{\alpha_1} e^{-\frac{x_1^2 m}{2t_1}} \int_{\beta_2}^{\alpha_2} e^{-\frac{(x_2 - x_1)^2 m}{2(t_2 - t_1)}} dx_1 dx_2.$$

Если мы разобьем время движения на бесконечно много интервалов $t_1, t_2, \dots, t_n$ (рис. 2) так, что $t_{k+1} - t_k = dt$, и будем рассматривать последовательное прохождение броуновской частицы через пространственные интервалы $x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, \dots, x_n + dx_n$, то, учитывая, что

$$\lim_{t_{k+1} - t_k \rightarrow 0} \frac{(x_{k+1} - x_k)^2 m}{2(t_{k+1} - t_k)} = \varepsilon \frac{\dot{x}^2(t_k) m}{2},$$

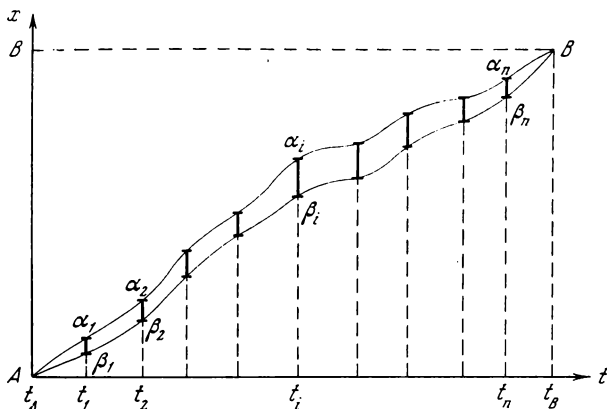


Рис. 2

получим

$$P_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2^n \pi^n \varepsilon^n m^{-n}}} \int_{\beta_1}^{\alpha_1} dx_1 \int_{\beta_2}^{\alpha_2} dx_2 \dots \int_{\beta_n}^{\alpha_n} dx_n e^{-\sum_{i=1}^n \frac{m \dot{x}^2(t)}{2} \varepsilon}.$$

При стремлении $\varepsilon \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$ мы получаем вероятность того, что частица прошла из A в B так, что ее траектория лежит между траекториями $\beta(t) \leq x(t) \leq \alpha(t)$. При этом предел многократного интеграла P_{AB} при $\varepsilon \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$ должен рассматриваться как функциональный, или континуальный,

интеграл от функционала $e^{-\int_0^{t_B} \frac{m}{2} \dot{x}^2(t) dt}$ по функции $x(t)$.

Обратимся теперь к квантовой механике. Будем исходить из воображаемого опыта. Представим себе (рис. 3) источник электронов α , экран 1 с двумя щелями в нем A и B и затем счетчик электронов β , перемещающийся вдоль экрана 2 . Хорошо известно, что когда закрыта щель B , то картина распределения интенсивности падающих электронов на экране 2 имеет вид, изображенный на рис. 3 (а). Когда закрыта щель A , то мы имеем картину рис. 3 (б). Когда же открыты обе щели, то на экране 2 мы имеем интерференционную картину рис. 3 (в), которая не есть сумма распределений (а) и (б), хотя каждый

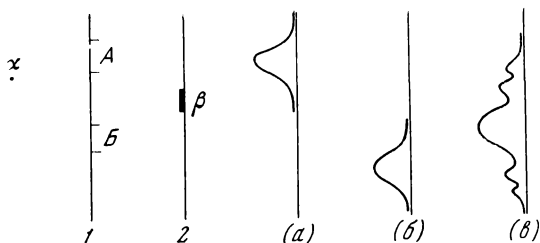


Рис. 3

индивидуальный электрон проходит только через одну щель. В терминах теории вероятности имеем:

$$P(A + B) \neq P(A) + P(B).$$

Из этих наблюдений мы вынуждены сделать следующие заключения.

Во-первых, движение электронов должно описываться некоторым вероятностным законом, поскольку начальным условиям мы можем сопоставить лишь некоторое распределение точек попадания электрона, а не точное значение места попадания.

Во-вторых, правила, управляющие «сложением» вероятностей для взаимно исключающих способов движения, отличаются от правил в обычной теории вероятности.

Оказалось, что движение электронов можно описать, вводя понятие «амплитуды вероятности» φ . Правило сложения амплитуд для двух взаимно исключающих путей состоит в обычном сложении. Таким образом, общая амплитуда вероятности для электрона, проходящего от источника к счетчику, при обоих открытых щелях равна

$$\varphi(A + B) = \varphi(A) + \varphi(B).$$

Далее постулируется, что вероятность события равна квадрату модуля амплитуды

$$P(A + B) = |\varphi(A + B)|^2 = |\varphi(A) + \varphi(B)|^2 = |\varphi(A)|^2 + |\varphi(B)|^2 + 2\operatorname{Re}\varphi(A)\varphi(B) = P(A) + P(B) + 2\operatorname{Re}\varphi(A)\varphi(B).$$

Последнее слагаемое отличает квантовый закон сложения вероятностей от классического.

Логическая ошибка, допускаемая при утверждении, что в микромире также должно выполняться $P(A+B) = P(A) + P(B)$, состоит в предположении, что электрон, для того чтобы попасть из α в β , должен пройти через определенное положение A или B . Если мы проверяем, через какое отверстие (A или B) прошел электрон, то мы, так сказать, заглядываем в эксперимент и тем самым меняем его конечный результат. При этом получаем другую картину распределения интенсивности, в которой интерференционные эффекты исчезают. Точнее, равенство $P(A+B) = P(A) + P(B)$ становится правильным, если только пущен в ход прибор, измеряющий прохождение электрона через A или B . Как бы осторожно мы не поступили, попытка измерить прохождение через A или B должна исказить состояние электрона настолько, чтобы изменить выводы из формулы

$$P(A+B) = |\varphi(A) + \varphi(B)|^2.$$

Это утверждение впервые ясно высказано Гейзенбергом в его принципе неопределенности.

Формула для перемножения амплитуд вероятности

$$\varphi_{ab} = \sum_c \varphi_{ac} \varphi_{cb}$$

является основной в формулировке квантовой механики по Фейнману [3]. Как в случае броуновского движения (по Винеру) можно определить вероятность пути, так же в случае движения квантовой частицы можно определить амплитуду вероятности пути в пространстве—времени по Фейнману. Постулат Фейнмана состоит в том, что амплитуда вероятности данной траектории $x(t)$ пропорциональна выражению $\varphi(x(t)) \sim \sim e^{i/\hbar S(x(t))}$, где $S(x(t))$ —действие вдоль траектории $S = \int_{t_1}^{t_2} L(\dot{x}, x) dt$, L —классическая функция Лагранжа (для

свободного движения $L = \frac{m\dot{x}^2(t)}{2}$, m —масса). Интеграл берется от начального до конечного момента времени. Мысленно мы можем построить траекторию частицы, если обобщим наш воображаемый эксперимент. Допустим, что мы поставили очень много экранов между источником и счетчиком электронов и в каждом экране сделали несколько щелей. Заме-

тив последовательность щелей x_i , через которые проходит электрон, и моменты времени t_i каждого прохождения, мы получим приближенное описание его траектории. Тогда функция действия складывается из $S = \sum_i S(x_{i+1}, x_i)$, а амплитуда вероятности получается как произведение амплитуд для каждого перехода из x_i в x_{i+1} , т. е.

$$\varphi = e^{i/\hbar \sum_k S(x_{k+1}, x_k)} \frac{dx_1}{c} \frac{dx_2}{c} \dots \frac{dx_n}{c}, \quad (1)$$

где c — нормировочный множитель.

Если щели имеют конечный размер (i -я щель β_i — α_i , см. рис. 2), а количество экранов n и, следовательно, число дроблений пути мы стремим к ∞ , заполняя экранами все пространство, то мы получаем из (1) выражение для амплитуды вероятности траектории частицы, прошедшей в заданной области пространства — времени, которая ограничена траекториями $\beta(t) \leq x(t) \leq \alpha(t)$, в виде континуального интеграла

$$\varphi(\alpha, \beta) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\beta_1}^{\alpha_1} \frac{dx_1}{c} \int_{\beta_2}^{\alpha_2} \frac{dx_2}{c} \dots \int_{\beta_n}^{\alpha_n} \frac{dx_n}{c} e^{i/\hbar \sum_{k=1}^n S(x_{k+1}, x_k)}.$$

Возьмем функцию действия для свободной частицы

$$S(x_{k+1}, x_k) = \frac{m(x_{k+1} - x_k)^2}{2(t_{k+1} - t_k)},$$

тогда в пределе получим

$$\varphi(\alpha, \beta) = \int_{\beta(t)}^{\alpha(t)} \delta x e^{i/\hbar \int_{t_1}^{t_n} \frac{\dot{x}^2(t) m}{2} dt}.$$

Сравнивая это выражение для амплитуды вероятности траектории квантовой частицы с вероятностью траектории броуновской частицы по Винеру, приходим к выводу, что выражения очень похожи, только в квантовом случае мы имеем комплексную величину из-за множителя i в экспоненте. Интегрируя по всему пространству x , кроме последней точки x_n , получим волновую функцию, или

амплитуду вероятности нахождения частицы в точке x_n в момент t_n , которая определяется всей предшествующей историей частицы и равна

$$\varphi(x_n, t_n) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int e^{i/\hbar \sum_{k=-\infty}^n S(x_{k+1}, x_k)} \frac{dx_{n-1}}{c} \frac{dx_{n-2}}{c} \dots \frac{dx_1}{c}.$$

Фейнман показал, что эта величина подчиняется уравнению Шредингера. Если

$$S(x_{k+1}, x_k) = \frac{m}{2} \cdot \frac{(x_{k+1} - x_k)^2}{t_{k+1} - t_k} - V(x_k)(t_{k+1} - t_k),$$

то

$$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \psi(x_n, t_n)}{\partial t_n} = \frac{1}{2m} \left(\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x_n} \right)^2 \psi + V(x_n) \psi.$$

Впоследствии была доказана обратная теорема, что решение уравнения Шредингера можно представить в виде континуального интеграла. По-видимому, надо считать шредингеровскую форму квантовой механики более общей, так как в фейнмановской записи необходимы ограничения на вид лагранжиана, которых нет у Шредингера. Из фейнмановской формулировки квантовой механики следует изящный предельный переход к классической механике, т. е. к такому случаю, когда можно сказать, что частица движется строго по одной траектории, определяемой минимумом действия S .

Рассмотрим для этого, например, случай свободного движения частицы с большой массой m . Так как

$$S = \frac{m}{2} \int \dot{x}^2(t) dt \gg \hbar,$$

то для всех траекторий, не обращающих S в $\min$, интеграл от $e^{i/\hbar S}$ дает малую величину из-за быстрой осцилляции $e^{i/\hbar S}$, только классическая траектория, дающая $\min S$, приводит к заметному вкладу в амплитуду вероятности. Таким образом, чем больше m , тем точнее частица движется по классической траектории, т. е. тем меньше вероятность движения по неклассическим траекториям.

1. *N. Wiener.*— «Journ. of Math. and Phys.», 2, N 3, 1923.
2. *A. Einstein.*— «Ann. der Phys.», 4, 19, 1906.
3. *R. Feinman.*— «Rev. Mod. Phys.», 20, N 2, 367, 1948.

А. А. Тяпкин

К РАЗВИТИЮ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ
НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО
КООРДИНАТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

1. Введение

Одна из самых ярких и драматических страниц в истории развития научного познания мира связана с возникновением квантовой механики, давшей строгое количественное описание всему многообразию загадочных явлений атомного мира. Фундаментальные представления новой механики не были, однако, выведены непосредственно на основе ясного понимания необходимой трансформации закономерностей обычной механики при переходе к движению микрочастиц.

Теория атомных явлений строилась заново, на основе полного отказа от концепций классической механики. Самым необычным в построении квантовой механики было то, что сначала был, так сказать, нащупан каркас математического аппарата будущей теории и только затем была найдена физическая трактовка величин, входящих в найденные математические уравнения. Современная квантовая теория в полной мере несет отпечаток этого необычного феноменологического пути построения. Собственно, формулировка качественно своеобразных закономерностей микромира, непосредственно связанная с интерпретацией всего аппарата квантовой механики, и по сей день вызывает разногласия в некоторых, казалось бы незначительных, деталях, за которыми часто на самом деле кроются совершенно различные взгляды на сущность установленных квантовой механикой закономерностей. Важнейшие вопросы понимания квантовой

механики, не получившие еще общепринятого решения, нуждаются в дальнейшем уточнении формулировки самих основ квантовой теории, в выяснении некоторых аспектов соотношения квантовых и классических закономерностей.

Решение проблем, связанных с интерпретацией квантовой механики, в настоящее время приобретает особо актуальное значение в связи с необходимостью дальнейшей радикальной перестройки физических представлений для теоретического обобщения богатого экспериментального материала в физике элементарных частиц.

Феноменологический путь построения квантовой механики не мог не привести к формальному пониманию этой теории со значительными проблемами в объяснении особенностей движения микрочастиц. Сейчас не принято обращать внимание и на необычность построения квантовой теории, и на ограниченность достигнутого на этом пути понимания теории. В 1939 г.; однако, Л. И. Мандельштам в своих лекциях [1, стр. 345] весьма определенно подчеркивал необычность для теоретической физики построения квантовой механики, когда сначала было выдвинуто фундаментальное уравнение для некоторой неизвестной физической величины, а затем, после анализа многих гипотез, методом подбора была найдена статистическая трактовка квадрата модуля этой величины, названной волновой функцией. Столь же определенно Л. И. Мандельштам указывал и на неполноту понимания основных вопросов теории, обращая внимание на отсутствие согласия среди самих создателей квантовой механики.

С тех пор, однако, мало что добавилось к пониманию сущности квантовой теории. Лишь возросла уверенность в невозможности более глубокого понимания, чем достигнутое формальное объяснение квантовых эффектов.

За эти годы успешного применения аппарата квантовой механики значительно поубавилось число физиков, согласных с мнением А. Эйнштейна о неполноте квантовой механики или солидарных с мнением Л. И. Мандельштама. Огромные успехи практического приложения теории к атомным явлениям позволили многочисленным сторонникам Н. Бора убедить большинство физиков в научной несостоятельности поиска более полного описания этих явлений.

Однако ход развития науки неминуемо заставляет нас вернуться к рассмотрению тех же проблем, к переоценке утвердившихся мнений.

Уже давно прошла пора бурного развития приложений квантовой теории к различным областям атомного мира, когда можно было получать ценные физические результаты, не выводя ни одного нового фундаментального уравнения или теоремы и не заботясь об углублении понимания используемого аппарата. Передний фронт теоретической физики за последние десятилетия из атомного мира переместился в область ядерной физики и физики элементарных частиц, столкнувшись здесь с колоссальными трудностями при решении новых проблем на основе использования прежнего вооружения квантовой механикой и теорией относительности. Сегодняшняя теоретическая физика крайне нуждается в переоценке ценностей, ей необходимо радикальное изменение используемого аппарата. А эта задача вряд ли может быть решена на основе формального понимания существующего аппарата теоретической физики, без существенного углубления квантовой теории.

Вот почему, помимо всеми признанной работы на переднем крае теоретической физики, где трудится подавляющее большинство физиков-теоретиков, необходимо также проводить и работу в глубоком тылу теоретической физики по ликвидации пробелов в понимании основных, ранее установленных, закономерностей и по поиску более полного описания этих явлений.

Правда, уже само вступление на этот путь сопряжено с трудностями преодоления широко распространенного мнения об исчерпывающей полноте современной квантовой механики, с проявлением не только большой самостоятельности в суждениях, но и большой нескромности расхождения во взглядах с самыми крупнейшими авторитетами в физике.

Поэтому и мне, формулируя постановку задачи о поиске нового представления квантовой механики, однозначно описывающего наряду с результатами необратимых измерений также и скрытые от непосредственных наблюдений детали движения микрообъектов, приходится начинать с нескромного критического разбора взглядов великих физиков.

2. О неполноте существующего квантовомеханического описания движения микрообъектов

В дискуссии с А. Эйнштейном Н. Бор одержал победу не только над ошибочной уверенностью Эйнштейна в существовании атомных явлений, результаты измерений которых не описываются аппаратом квантовой механики. Вместе с этим, как бы заодно, было несправедливо отвергнута и ценная идея Эйнштейна о необходимости дальнейшего развития теории с целью установления пространственно-временного описания явлений микромира. Ценность постановки этой задачи не умаляется и тем, что Эйнштейн на этом пути ошибочно надеялся исключить вероятность из описания квантовых явлений. Нельзя сказать, чтобы эта положительная сторона позиции Эйнштейна, потерявшись среди ошибочных высказываний, осталась полностью не замеченной его оппонентами. В. Гейзенберг, например, в своей книге «Физика и философия» весьма точно формулирует и эту сторону позиции Эйнштейна: «...Эта интерпретация все-таки не дает никакого описания того, что происходит на самом деле, независимо от наблюдений или между нашими наблюдениями. Что-нибудь должно ведь, однако, происходить, в этом мы можем не сомневаться. Это «что-нибудь» нельзя, возможно, описать с помощью понятий электрона или волны, или светового кванта, но поскольку оно не описывается каким-либо образом, задача физики еще не выполнена» [2, стр. 116]. В свою очередь и М. Борн пришел к выводу, что «отклонение Эйнштейном современной квантовой механики обусловлено не столько вопросом о детерминизме, сколько его верой в объективную реальность физического бытия независимо от наблюдателя» [3, стр. 131].

Неполнота квантовой механики очевидна в смысле отсутствия пространственно-временного описания движения микрочастиц, скрытого от непосредственного наблюдения, но однозначно связанного с результатами необратимых процессов измерения. Даже самые рьяные сторонники копенгагенской интерпретации вряд ли серьезно сомневаются в существовании в заданных макроусловиях движения микрообъектов до измерений. Они лишь считают, что задачей физической теории яв-

ляется описание только результатов необратимых измерений, а не описание скрытой от наблюдения пространственно-временной картины движения микрообъекта. В соответствии с этим Н. Бором и было сформулировано понятие физической реальности, а физический принцип неопределенности обобщен в философский принцип дополнительности. Ограниченность такой точки зрения особенно наглядно выявляется в отказе последовательных приверженцев копенгагенской школы дать объяснение интерференции одиночных фотонов после прохождения полупрозрачного зеркала. Этот опыт был в свое время предложен для рассмотрения А. Эйнштейном. Квантовая механика в ее современном состоянии действительно не описывает и не объясняет реально существующий процесс движения фотона от полупрозрачного зеркала до фотопластинки, регистрирующей явление интерференции при многократном повторении опыта [4, стр. 379]. Но вместо того, чтобы в отсутствии описания этого, безусловно реально существующего, но непосредственно не наблюдаемого движения увидеть ограниченность решаемой квантовой механикой задачи, Н. Бор саму постановку задачи об описании такого движения объявляет выходящей за рамки задач физической теории [5, стр. 583]. Так, Н. Бору удалось уйти и от ответа на поставленный Эйнштейном вопрос, и одновременно сохранить миф о полноте квантовомеханического описания. Такая неестественная позиция, основанная на философском пересмотре понятия физической реальности, могла надолго утвердиться в физике только потому, что квантовая механика, минуя описание скрытого от непосредственного наблюдения движения микрообъектов, тем не менее действительно дает полное описание результатов необратимых процессов измерений.

Выдвинутый Н. Бором принцип дополнительности не только отражает тот факт, что в различного вида опытах мы познаем дополняющие друг друга стороны реальности, экспериментальное исследование которых невозможно совместить в опытах одного какого-либо вида. Принцип дополнительности, однако, не ограничивается этим обобщением содержания физического принципа неопределенности. Он бездоказательно запрещает и теоретическое объединение в один физический образ сведений, получаемых в несовместимых экспериментах. И именно

В этом отношении принцип дополнительности выходит за рамки обобщения физической закономерности, сформулированной впервые В. Гейзенбергом в принципе неопределенности. В пользу такого толкования принципа дополнительности Н. Бор приводил только философские аргументы, которые в литературе подвергались убедительной критике со стороны философов и физиков. Но эта критика, относящаяся к формулировке и философскому обоснованию принципа дополнительности, не переросла в отрицание глубоко антинаучного применения этого принципа. Напротив, теперь в статьях многих философов, причисляющих себя к лагерю материалистов можно найти и многочисленные попытки обоснования принципа дополнительности на основе материалистической диалектики.

Никем не доказана теорема о невозможности однозначного статистического описания квантовых явлений на основе совместного использования одновременно неизмеримых физических величин. Копенгагенская школа объявила такое описание вне физической реальности, исходя из позитивистского принципа наблюдаемости, согласно которому в физическую теорию должны вводиться только непосредственно наблюдаемые величины. Удивительно, конечно, как сторонники таких взглядов не замечают опровержения выдвинутого принципа наблюдаемости самой квантовой механикой, в основе которой лежит использование непосредственно неизмеряемой волновой функции. Физики-материалисты тот же не доказанный в теории вывод обычно обосновывают в соответствии со своими философскими взглядами. Для этого оказывается достаточным в позитивистском тезисе «не измеряется — значит не существует» сделать только перестановку причины со следствием. Нарушение же принципа наблюдаемости в теоретической физике при этом объявляется несовместимым с материалистической философией, так как оно будто бы ведет к агностицизму. К сожалению, и в философских работах по вопросам квантовой механики не была в должной мере показана неправомочность отождествления ненаблюдаемости с непознаваемостью.

Действительно, невозможность одновременного непосредственного измерения двух по отдельности измеряемых величин вовсе не означает непознаваемости физи-

ческих понятий, использующих обе эти величины, так как не доказана невозможность косвенного измерения таких величин на основе определения по результатам непосредственных измерений. Напротив, отказ от познания движения микрообъектов в заданных макроусловиях, например движения фотона в обсуждавшемся ранее опыте, есть прямая дань агностицизму. Таким образом, постановка вопроса о дальнейшем развитии теории квантовых явлений имеет прямое отношение к философским проблемам естествознания, так как против теоретического анализа непосредственно неизмеряемых величин выдвигались лишь ошибочные философские доводы.

Казалось бы, при такой ситуации философы-марксисты могли бы на деле оказать неоценимую помощь естествознанию, устранив ложные философские преграды на пути дальнейшего развития важнейшей физической теории. Однако вместо привлечения внимания к выяснению вопроса о сущности единства корпускулярных и волновых свойств микрообъектов теперь в философских работах мы зачастую встречаем отрицание постановки этого вопроса как не имеющего смысла [6, стр. 24].

Прямое отношение к философии имеет и выяснение принципиальных недостатков принятой сейчас формулировки существующего теоретического описания квантовых явлений. Общепринятое утверждение, что квантовая теория определяет состояние микросистем по отношению к приборам, описываемым классической механикой и являющимся своеобразными системами отсчета, приводит к принципиальной трудности последовательной формулировки квантовых процессов, происходивших в доисторические времена. Казалось бы, устранение этой трудности должно быть исходным моментом любого материалистического анализа квантовой теории. Однако в многочисленных трудах, посвященных философским проблемам квантовой механики, мы даже не встречаем постановки этого вопроса. Исключением является лишь работа Б. Я. Пахомова¹, в которой правильно намечается путь устранения этой трудности.

Указанная трудность последовательной формулировки описания квантовых процессов в доисторические времена обусловлена в основном допущенной путаницей

См. доклад Б. Я. Пахомова в данной книге.

в определении понятий прибора и измерения в квантовой механике. Если бы при описании и изучении движения спутника Земля была бы причислена к прибору, то это вызвало бы немалое удивление. Аналогичное же недоразумение в квантовой механике продолжает оставаться в основе формулировки этой теории.

Действительно, физические условия движения микрообъектов, задаваемые классическим потенциалом, называют приготовляющей частью прибора, забывая, что предметом квантовой механики является не сам по себе микрообъект, а микрообъект, находящийся в определенных физических условиях. Процесс перехода микрообъекта из одних физических условий движения в другие неправомерно называют процессом измерения. На самом же деле с познавательной деятельностью субъекта принципиально связана лишь регистрация этого процесса детектором, вырабатывающим макроскопический сигнал.

Проверка предсказаний квантовой механики, помимо использования процесса макроскопического усиления для детектирования изменений квантовых состояний движений, требует, конечно, и контролируемых условий однозначного выделения исходного статистического ансамбля исследуемых квантовых систем, что невозможно без макроскопического задания физических условий движения макрообъектов. Однако только часть, детектирующую квантовые переходы, необходимо исключить при описании квантовых явлений, происходивших в доисторические времена, т. е. при описании их вне связи с экспериментальной проверкой теоретических предсказаний. Собственно, экспериментальный прибор, вырабатывающий макроскопически усиленный сигнал о квантовом переходе микрообъекта из одних физических условий в другие, вовсе не составляет неотъемлемую часть необратимого квантового процесса. К сожалению, на это обстоятельство не обращается внимание в монографии Д. И. Блохинцева [7] при разборе макроскопической природы детектора, макроскопической неустойчивости равновесия его начального состояния.

Например, процессы возбуждения атомов, излучения квантов света этими атомами, а также процессы фотоионизации атомов газа фотонами происходят вне всякой связи с познавательной деятельностью субъекта из макромира.

Использование же в приборе уже созданного фотоэлектрона в качестве начального толчка для создания под действием электрического поля макроскопической лавины в электронном умножителе, газовом счетчике или искровой камере не может повлиять на происшедшие ранее квантовые процессы возбуждения атома, излучения им фотона и последующей фотоионизации атома в счетчике. Независимо от того, подано ли электрическое поле на счетчик или нет, т. е. зарегистрирован нами фотон или нет, сам процесс фотоионизации атома или образования комптоновского электрона нарушает когерентность волн (квантовые процессы 1-го рода, по терминологии фон Неймана [8]), устраняя возможность в последующем выделить макроскопическими средствами ансамбль, в котором проявились бы интерференционные эффекты.

Так, если в опыте с полупрозрачным зеркалом фотоны перед попаданием на фотопластинку будут проходить через два симметрично расположенных счетчика комптоновских электронов, то независимо от наличия напряжения на счетчиках произойдет стирание интерференционных полос на фотопластинке, пропорциональное эффективности процесса комптоновского рассеяния фотонов.

3. Обоснование необходимости установления совместного координатно-импульсного описания движения микрообъектов

Предметом описания волновой механики является поведение квантовых систем, состоящих из коллектива не взаимодействующих между собой отдельных микрообъектов, находящихся в одинаковых физических условиях движения.

В квантовой механике, точно так же как и в классической механике, физические условия движения объекта задаются с помощью функций потенциальной энергии. Но в классической физике эти функции потенциальной энергии используются после решения уравнений движения для получения динамического или статистического описания движения в пространстве и времени или в фазовом пространстве координат и импульсов. В квантовой механике функции потенциальной энергии однозначно определяют лишь некоторую вспомогательную величину

ну — волновую функцию исследуемого состояния. Физический смысл последней выражается в предсказании вероятностей перехода микрообъекта из исследуемого состояния в любое другое осуществляющееся в природе состояние движения.

Следует отметить, что вероятностный характер даваемого описания отвечает статистической природе этих переходов, а не является искусственным порождением принятой схемы описания. Действительно, при одном и том же типе внезапных изменений внешних физических условий в различных экземплярах одинаковых квантовых систем получаются в общем случае переходы в различные состояния, отличающиеся собственными значениями определенной динамической переменной. Поэтому объективная закономерность проявляется в распределении вероятностей таких переходов.

Так как о переходе каждого отдельного микрообъекта в другое состояние движения может быть получен в специально организованных условиях макроскопический сигнал, то, следовательно, можно сказать, что волновая функция дает статистическое описание результатов любых возможных измерений квантовых систем. В соответствии с типом воздействия на квантовые системы эти процессы классифицируются как измерения различных динамических переменных. Среди так называемых наблюдаемых величин в квантовой механике мы встречаем и динамические переменные — координаты и импульсы, которыми описывается движение в классической физике. Но в квантовой механике эти величины не объединяются в описании движения микрообъекта в фазовом пространстве.

Среди различных возможных состояний квантовых систем особое место занимают так называемые собственные состояния физических величин. Не описывая самого движения микрообъекта в заданных физических условиях, определяющих квантовомеханическое состояние, волновая механика выделяет среди возможных такие состояния и соответствующие им функции потенциальной энергии, при которых определенные физические величины сохраняют неизменные значения. Очевидно, что соответствующие измерения, проведенные для каждого отдельного экземпляра из статистического коллектива квантовых систем, находящихся в заданном собственном сос-

тоянии, будут приводить к одному и тому же результату. Такой ансамбль обладает определенным значением физической величины в силу ее сохранения в процессе движения в каждом экземпляре.

Для реализации квантовых систем, находящихся в собственном состоянии, нужно осуществление определенных физических условий, выражающихся в задании определенной функции потенциала.

Специфика же свойств квантовых систем состоит в том, что в природе не существует таких состояний движения микрообъектов, при которых сохранялись бы неизменными пространственная координата в каком-либо направлении и составляющая импульса в том же направлении. (Кстати, в классической механике эти условия выполняются только в состоянии покоя объекта.) Следовательно собственные состояния этих динамических переменных не совпадают. Для осуществления собственного состояния по импульсу нужно отсутствие всяких сил в пространстве, а для собственного состояния по координате требуется иметь бесконечно узкий потенциальный ящик с бесконечно высокими потенциальными стенками.

Прямым следствием отсутствия в природе состояний с неизменными значениями координаты и импульса является невозможность одновременного измерения координаты и импульса, так как процесс измерения использует происходящий в каждом отдельном случае переход микрообъекта из исследуемого состояния в одно из существующих собственных состояний с неизменными значениями измеряемых величин.

Таким образом, из квантовой механики следует невозможность осуществления таких макроскопически заданных физических условий движения микрообъектов, которые позволили бы выделить статистический коллектив квантовых систем с неизменными значениями импульса и координаты. Выполнив условия сохранения неизменной одной из этих величин, мы согласно принципу неопределенности получим для статистического ансамбля таких систем неопределенное значение другой величины. Следует отметить, что термин «неопределенное значение», имеющий конкретный смысл применительно к статистическому ансамблю одинаковых квантовых систем, часто используют весьма неудачно для отдельной квантовой системы, затушевывая тот факт, что отдельное

измерение всегда приводит к определённому значению измеряемой величины. Квантовая же механика к тому же, как особо подчеркивает П. Дирак [9, стр. 145], исходит из абстрактной возможности точного отдельного измерения координаты или импульса микрообъекта.

Пусть, например, мы имеем статистический коллектив не взаимодействующих между собой электронов, локализованных в определенной области пространства за счет использования одинаковых потенциальных ящиков. Если мы сможем мгновенно устранить потенциальные стенки ящика и выпустить электрон в свободное пространство, лишенное силовых полей, воздействующих на электрон, то это позволит нам провести сколь угодно точное измерение импульса отдельного электрона. В каждом конкретном измерении мы будем получать определенное значение импульса. Но измерения с различными экземплярами имеющегося коллектива одинаковых систем приведут к различным результатам. Дисперсия, характеризующая разброс полученных результатов в статистическом ансамбле, и входит в соотношение неопределенностей.

Естественно будет считать, что измерение является особым видом воздействия, которое, несмотря на разрушение исследуемой квантовой системы, позволяет получить значения измеряемой величины, присущие исследуемому объекту. Тогда различие результатов измерений с отдельными экземплярами коллектива одинаковых систем должно характеризовать изменение данной измеряемой величины в процессе движения микрообъекта в исследуемом состоянии. Задачей дальнейшего развития квантовой механики и должно стать установление описания движения микрообъекта в фазовом пространстве p и q , скрытого от непосредственного наблюдения, но однозначно связанного со статистическими распределениями результатов измерения.

Поскольку квантовая механика дает правильное предсказание статистических распределений результатов всех возможных измерений, то естественно будет предположить, что аппарат существующей теории скрыто содержит все сведения и о движении микрообъекта в фазовом пространстве p и q в любом заданном состоянии.

Именно в таком аспекте, вопреки установкам копенгагенской школы, были предприняты некоторыми уче-

ными попытки развития обычного формализма квантовой теории. Как отмечает П. Дирак [9, стр. 187], фон Нейманом впервые была введена для квантовых систем плотность $F(p, q)$ в фазовом пространстве, аналогичная гиббсовской плотности в классической статистической физике. Но применительно к квантовым системам эта статистическая функция не может быть непосредственно измерена, так как соответствующий ей статистический ансамбль систем является скрытым для макромира, ибо он не может быть выделен заданием макроскопических условий движения микрообъектов. В этом отношении функция плотности вероятности в фазовом пространстве совершенно аналогична волновой функции, также непосредственно не измеряемой в опыте, но связанной теоретически со всеми получаемыми в опыте статистическими распределениями результатов измерений. Однако построение квантовой теории на основе функции распределения в смешанном координатно-импульсном пространстве явилось бы значительным углублением теории, так как позволило бы наряду с предсказанием статистических распределений результатов всех возможных измерений получить сведения о скрытом от непосредственного наблюдения движении микрообъектов.

Следует отметить, что постановка вопроса о получении сведений о таком движении не противоречит сделанному ранее фон Нейманом выводу о «скрытых параметрах». В 1932 г. в своей замечательной монографии «Математические основы квантовой механики» [8], которая и сейчас остается наиболее строгим и точным изложением квантовой механики, фон Нейман пришел к выводу о невозможности введения в квантовую механику непротиворечивым образом неучтенных скрытых параметров, которые позволили бы из чистого ансамбля квантовых систем выделить подансамбли без дисперсии по импульсу и координате и установить на этой основе «истинное» причинное движение микрочастиц [8, стр. 240—241]. Таким образом, вывод фон Неймана относится к не учтенным в теории, но непосредственно наблюдаемым на опыте параметрам, поскольку речь идет о выделении на их основе ансамблей, не описываемых в обычной квантовой теории.

Признавая за современной квантовой механикой полное описание всех действительно непосредственно наб-

людаемых величин, мы обращаем внимание на неизбежное существование принципиально скрытых от непосредственного наблюдения параметров движения микрообъектов. Эти параметры не могут быть использованы для выделения макроскопическими средствами ансамблей, противоречащих современной квантовой теории и имеющимся экспериментальным данным. Но эти принципиально скрытые от непосредственного наблюдения параметры должны быть познаваемы на основе установления связи их со всей совокупностью наблюдаемых величин.

Следует также отметить, что решение проблемы установления однозначного описания принципиально скрытого от непосредственного наблюдения движения микрообъектов не позволит предсказать какого-либо нового эффекта или результата измерений в области квантовых явлений. Для чего же тогда нужно это описание? Прежде всего для того, чтобы заполнить пробел в объяснении наблюдаемых квантовых эффектов, для которых существующая теория дает только статистические предсказания результатов наблюдений. Иначе говоря, для того, чтобы дать конкретное объяснение, например, движению микрочастиц при туннельном эффекте, причине статистического разброса результатов повторных измерений и, наконец, единству корпускулярных и волновых свойств материи. В новом опыте возникла бы принципиальная необходимость, если бы речь шла о замене старого объяснения новым. Но ведь в том-то и состоит парадокс наших дней, что в течение сорока лет существования квантовой механики отсутствует какое-либо объяснение указанных эффектов. Таким образом, квантовая механика в ее современном виде, давая правильное и полное описание статистических распределений результатов всех возможных измерений, тем не менее в явном виде не дает всего того, что можно было бы установить о движении объектов в микромире на основе этих результатов.

Кроме того, устранение пробела в объяснении квантовых эффектов на основе установления скрытой от непосредственного наблюдения сущности квантовых явлений приведет со временем и к предсказанию новых экспериментальных результатов, но не в области атомной физики, а в более глубоких областях физики, где пока не удалось построить даже формального теоретического аппарата на основе существующих представлений.

Ведь если говорить строго, то и молекулярная теория, открывшая величайшие горизонты перед физиками, собственно в феноменологическую термодинамику не внесла никаких практических результатов.

Д. И. Блохинцев [7] совершенно правильно отмечает, что предположение о скрытом детерминированном движении квантовых частиц, которому соответствуют принципиально скрытые, неизмеряемые параметры, вовсе не может быть отвергнуто на основании рассуждений, получивших название теоремы Неймана, так как эти рассуждения относятся к скрытым лишь в квантовой теории, но наблюдаемым параметрам [8, стр. 133—147]. Тем не менее методы математической статистики в действительности позволяют строго обосновать тот же вывод и для ненаблюдаемых параметров. Ниже мы покажем, что и для принципиально скрытого движения микрочастиц недопустимо представление о движении по определенным траекториям в фазовом пространстве, так как такое движение несовместимо в рамках математической статистики с распределениями вероятностей для наблюдаемых величин в квантовой теории.

Это означает, что намерения некоторых физиков [10, стр. 11; 11, стр. 145; 12, стр. 34; 13, стр. 289] развивать квантовую теорию с целью установления динамического движения обречены на полную неудачу. Невозможность создания причинного нестатистического описания результатов измерений в квантовых процессах доказана фон Нейманом. Мы же докажем ниже необходимость привлечения статистики не только для предсказаний результатов измерений, но и для описания принципиально скрытого от непосредственного наблюдения движения микрочастиц.

В поисках однозначного описания скрытого движения микрочастиц следует, используя методы математической статистики, допускать при необходимости сколь угодно сложный и неклассический образ движения. Единственным критерием правильности найденных свойств скрытого движения микрочастиц может быть только однозначная совместимость их со всей совокупностью предсказываемых существующей теорией экспериментальных результатов. Поэтому вполне естествен обратный путь отыскания ненаблюдаемой функции распределения плотности вероятности $F(p, q)$ в фазовом пространстве, исходя из анализа аппарата существующей квантовой механики.

Именно такой путь построения смешанной матрицы плотности или функции совместного распределения по импульсам и координатам был избран в свое время в работах Е. Вигнера [14], Г. Вейля [15], Я. П. Терлецкого [16], Д. И. Блохинцева [17], П. Дирака [18] и Д. Мойэла [19]. Однако авторам этих работ не удалось получить описания скрытого движения микрочастиц, так как найденные плотности вероятности в фазовом пространстве либо выражались комплексной функцией, либо при некоторых значениях аргументов принимали отрицательные значения. Использование таких функций распределения квазивероятности представляет собой развитие новых вариантов формализма описания результатов наблюдений в квантовой механике, лишь по внешнему виду близких к форме классической статистической физики.

Проблема неоднозначности найденных в этих работах решений обсуждалась в статье Р. Л. Стратановича [20]. Не удалось избежать отрицательных «вероятностей» и Г. В. Рязанову [21] при обобщении развитого Р. Фейнманом [22] подхода.

При описании на языке классической статистики специфически квантовых свойств, связанных с интерференционными эффектами волновой механики, всегда получались отрицательные значения для теоретически найденной скрытой функции $F(p, q)$. Однако никем пока не доказана теорема о невозможности решения обратной задачи определения действительной и всюду положительной функции $F(p, q)$ скрытого распределения вероятности в пространстве одновременно неизмеримых динамических переменных p и q по известным распределениям $f(p)$ и $\rho(q)$. Поскольку речь идет о реально существующем скрытом и сколь угодно сложном движении микрочастиц, для познания которого не должно существовать принципиальных преград, то неудачи в решении этой задачи должны рассматриваться только как доказательство ее сложности.

Преодолению трудностей решения поставленной нами задачи в квантовой механике может содействовать рассмотрение и решение аналогичной обратной задачи в классической физике.

Насколько нам известно, в классической статистической физике не решалась задача об однозначном определении плотности вероятности в фазовом пространстве

по известным распределениям вероятностей для координат и импульсов. Однако эта задача может быть поставлена как для объектов, совершающих движение по динамическим траекториям в фазовом пространстве, так и для объектов, движущихся по случайным траекториям.

4. Статистическое описание движения индивидуальных объектов в классической физике

До рассмотрения проблемы решения обратной задачи в классической механике нам придется обратиться к статистическому описанию динамического движения индивидуальных объектов, которое, к сожалению, не получило достаточно широкого применения, несмотря на то, что именно в статистической форме классическая механика допускает непосредственное сопоставление с результатами опыта.

Исходные понятия так называемой вероятностной механики (фазовое пространство, микроканоническое распределение, инвариантность фазового объема относительно канонических преобразований переменных и др.) рассматриваются при формулировке основной задачи статистической физики. В работе М. Борна [23, стр. 173], был исследован общий случай статистической динамики, описывающий совокупности движений индивидуальных частиц по строго определенным динамическими закономерностями траекториям при заданном распределении начальных значений скоростей и координат. Правда, автор полученное им доказательство ограниченности предсказаний состояний движения классических объектов неправомерно отождествил с недетерминированностью законов классической механики. На самом же деле классическая механика как в обычной, так и в статистической форме последовательно исходит из лапласовской предопределенности будущих состояний движения. Сами статистические расчеты, приведенные в работе [23], полностью опираются на признание детерминированности движения классических объектов, так как для каждого отдельного объекта исходного статистического ансамбля принимается строго определенная, а не случайная траектория в фазовом пространстве.

Статистическая динамика движения индивидуальных классических частиц является предельным случаем кван-

товой механики, так как при устремлении к нулю постоянной Планка квантовая механика непосредственно переходит в вероятностную классическую механику. Этот предельный переход был исследован в работе Я. П. Терлецкого [16]. Таким образом, некоторые свойства статистического представления квантовой механики являются общими и для вероятностной формы классической механики, и поэтому их нельзя приписывать специфике квантовомеханических закономерностей. По этой причине анализ вероятностной формулировки классической механики оказывается весьма полезным для выяснения целого ряда простых вопросов, запутанных некоторыми неудачными формулировками общепринятого изложения квантовой механики. Исчерпывающий анализ вероятностной механики может способствовать также дальнейшему уяснению постановки таких исходных проблем статистической физики, как доказательство эргодичности и обоснование необратимости процессов.

Изменение во времени плотности вероятности $F(p, q, t)$ в фазовом пространстве для совокупности невзаимодействующих между собой частиц, совершающих движение по законам классической динамики, описывается общеизвестным уравнением Лиувилля. Если исходному статистическому ансамблю рассматриваемых систем отвечает равномерное распределение плотности вероятности в фазовом пространстве вдоль одной из траекторий частиц и нулевое значение плотности вероятности для всех остальных точек фазового пространства, то такое микроканоническое распределение остается неизменным во времени. Этот вид стационарного состояния представляет особый интерес, так как решение поставленной нами обратной задачи в этом случае сводится к определению конкретной траектории в фазовом пространстве из анализа статистических распределений $f(p)$ и $\rho(q)$. Важно также отметить, что описание такого стационарного статистического ансамбля классических частиц, находящихся на одной фазовой траектории, совершенно тождественно описанию состояния движения одной частицы в различные случайные моменты времени, взятые по закону равномерного распределения. Свойство квазиэргодичности в этом случае выступает непосредственным следствием прямой взаимосвязи статистических распределений величин, характеризующих состояние движения

объекта, с изменением этих величин во времени, рассматриваемом в качестве случайной величины. Становится очевидным также, что относительные времена пребывания системы в определенной области фазового пространства выступают не в виде формальных вероятностей, лишенных соответствующих статистических коллективов, как это утверждается, например, в курсе М. А. Леоновича [24], а в виде самых обыкновенных вероятностей, относящихся к коллективу состояний в случайные моменты времени².

Для исследования движения индивидуальной классической частицы мы можем применить прибор, измеряющий только координату частицы, и отдельно — прибор, измеряющий только импульс частицы. Применив эти приборы в двух сериях независимых измерений, мы получим некоторые статистические распределения результатов проведенных измерений.

При этом возможны два варианта выполнения условия независимости отдельных измерений. Если можно пренебречь влиянием измерения на движение исследуемого объекта, то все измерения можно последовательно проводить на одном и том же объекте, выбирая независимо случайные моменты измерения. Если же каждое отдельное измерение приводит к заметному нарушению движения исследуемого объекта, то и в этом случае исследование возможно, так как измерения могут проводиться на различных экземплярах статистического коллектива одинаковых систем.

² Данный подход, в котором время рассматривается в качестве случайной величины, с успехом может быть применен и к вероятностному описанию движения частицы, принадлежащей к равновесному ансамблю не взаимодействующих между собой частиц, например к идеальному газу. При этом случайные величины, характеризующие состояние движения индивидуального объекта, будут являться функциями как случайного момента времени, так и случайной величины полной энергии частицы. Доказательство эргодичности, естественно, остается прежним, так как операция усреднения величин во времени будет означать статистическое усреднение по континууму состояний в различные случайные моменты времени.

Принятие времени за случайную величину допустимо также для квазистационарного ансамбля систем, совершающих условно-периодическое движение, если период этого движения много меньше времени релаксации. Соответственно эргодичность, или, точнее, квазиэргодичность может быть строго доказана для тех механических систем, статистическое описание движения которых может быть основано на признании времени наблюдения состояния движения случайной величиной, подчиняющейся равномерному распределению.

Такой подход к исследованию движения индивидуального классического объекта применим не только для описания движения по случайным траекториям типа движения броуновской частицы, но и для обычного детерминированного движения по траектории. Методы математической статистики, очевидно, должны позволять для любого типа движения найти описание, соответствующее этому специально выбранному методу экспериментального исследования. Т. е. для любого движения теоретически должны предсказываться статистические распределения результатов независимых измерений координат и импульсов. В свою очередь должна существовать и теоретическая возможность однозначного восстановления описания движения в фазовом пространстве координат и импульсов по экспериментально найденным статистическим распределениям координат и импульсов в отдельности.

Принципиальная особенность этого метода исследования состоит в применимости его результатов и для случая, когда каждое отдельное измерение приводит к разрушению исследуемой системы. Только в связи с имеющейся в классической механике возможностью проводить измерения без существенного нарушения исследуемого движения этот принципиально важный метод исследования оказался не разработанным в классической статистической физике.

Рассмотрим сначала общий случай периодического движения классического объекта по определенной траектории в фазовом пространстве. Для простоты выкладки исследуем случай одномерного движения.

Рассматривая результаты измерений координат и импульсов как функции случайной величины времени наблюдения $q=q(t)$ и $p=p(t)$ и принимая для t равномерное распределение $\varphi(t)dt = \frac{1}{T}dt$, где нормировочный коэффициент T есть величина периода, мы найдем следующие выражения для плотностей вероятностей получения значений координат и импульсов в независимых случайных измерениях:

$$\rho(q) = \frac{2}{T} \frac{1}{|\dot{q}|} = \frac{2}{T} \frac{1}{\left| \frac{\partial H}{\partial p}(q) \right|}; \quad (1a)$$

$$\dot{f}(p) = \frac{2}{T} \frac{1}{|\dot{p}|} = \frac{2}{T} \frac{1}{\left| \frac{\partial H}{\partial q}(p) \right|}, \quad (16)$$

где $H(p, q)$ есть функция Гамильтона для исследуемого движения.

Следует подчеркнуть, что появление статистики в распределении результатов измерений координат и импульсов классического объекта, движущегося по определенной траектории, связано не с ошибками опыта, а со случайным выбором момента измерения. Различные значения, получаемые в этих опытах, характеризуют факт пребывания исследуемого объекта в различных точках пространства в состояниях с различными импульсами. В соответствии с этим и смысл полученных распределений весьма прост. Например, вероятность $\rho(q)dq$ получения в измерениях значения q в интервале dq пропорциональна времени действительного пребывания объекта в этой области пространства. Аналогичный смысл имеет и распределение плотности вероятности $\dot{f}(p)$.

Полученные распределения $\rho(q)$ и $\dot{f}(p)$ характеризуются отличными от нуля дисперсиями $(\Delta q)^2$ и $(\Delta p)^2$, если только исследуемый объект не находится в состоянии покоя. При фиксированном значении энергии эти дисперсии оказываются взаимосвязанными между собой. Больше того, если рассмотреть классический гармонический осциллятор с полной энергией, равной $\frac{\hbar\omega_0}{2}$ то для него мы найдем то же соотношение для дисперсий, что и для квантового осциллятора в нулевом состоянии, т. е.

$$\overline{(\Delta q)^2} \overline{(\Delta p)^2} = \frac{\hbar^2}{4}.$$

Так как принятое нами описание результатов измерения динамических переменных классического объекта по своей форме совершенно аналогично статистическому описанию стационарных состояний в квантовой механике, то полученные результаты наглядно показывают необоснованность широко используемой в квантовой механике трактовки термина «неопределенность» применительно к отдельному микрообъекту. Лишь К. В. Никольский [25] и Д. И. Блохинцев [26] в своих курсах по

квантовой механике придерживались языка математической статистики, последовательно примененного впервые фон Нейманом [8] для изложения основного содержания квантовой механики.

Однако этими авторами осталась явно недооцененной основная особенность статистических ансамблей, составленных из не взаимодействующих между собой частиц, как средства выявления свойств движения индивидуальных объектов.

Строго говоря, дисперсии $\overline{(\Delta q)^2}$ и $\overline{(\Delta p)^2}$ как в случае классической, так и квантовой механики относятся к статистическим ансамблям независимых повторных измерений с одинаковыми физическими системами. Объективный характер измерений означает реальное осуществление этих распределений в ансамбле одинаковых систем в процессе движений исследуемых объектов. Поскольку ансамбль составлен из не взаимодействующих между собой частиц, то относящиеся к ансамблю статистические распределения являются одновременно и статистической формой описания движения индивидуальной частицы. При заданной отличной от нуля полной энергии классического осциллятора мы никакими изменениями потенциальной функции не сможем создать движения, отвечающего статистическому ансамблю с нулевыми значениями обеих дисперсий.

Это обстоятельство выражает сам факт движения исследуемого классического объекта в фазовом пространстве, а не отсутствие у него определенного импульса в каждой точке пространства. Невозможность создания ансамбля с нулевыми дисперсиями при заданной энергии осциллятора означает также и невозможность одновременного измерения координаты и импульса при использовании прибора, разрушающего исследуемое движение. Очевидно, что и это ограничение экспериментальных возможностей не может лишить классический объект свойства двигаться в каждой точке пространства с определенной скоростью. Самое главное, что применение более совершенного прибора, измеряющего одновременно импульс и координату частицы, вовсе не единственный способ доказательства этого свойства.

Весьма простой теоретический анализ распределений $\rho(q)$ и $f(p)$, полученных только в независимых отдельных измерениях координат и импульсов, позволяет однознач-

но установить наличие движения по определенной траектории фазового пространства.

Уже само по себе соотношение (1a) устанавливает связь между абсолютной величиной скорости или импульса и координатой.

Действительно,

$$|p| = 2 \frac{m}{T} \frac{1}{\rho(q)} \quad (2)$$

Нам остается лишь исключить из этого соотношения неизвестные параметры m и T .

Продифференцировав по времени соотношение (2), найдем

$$|\dot{p}| = \frac{2}{T} \frac{|\rho'(q)| |p|}{\rho^2(q)}. \quad (3)$$

Подставляя это значение $|\dot{p}|$ в (1б), получим соотношение, связывающее динамические переменные p и q только через заданные нам функции $\rho(q)$ и $f(p)$:

$$|p| f(p) = \frac{\rho^2(q)}{|\rho'(q)|}. \quad (4)$$

Полученное соотношение (4) определяет, следовательно, уравнение траектории в фазовом пространстве переменных p и q .

Применив его, например, для классического осциллятора, имеющего распределения

$$\rho(q) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{q_0^2 - q^2}} \quad \text{и} \quad f(p) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{p_0^2 - p^2}},$$

найдем известное уравнение эллипса для фазовой траектории классического осциллятора

$$\frac{p^2}{p_0^2} = 1 - \frac{q^2}{q_0^2}.$$

Самое главное, что при выводе соотношений (1a) и (1б) и при решении обратной задачи определения фазовой траектории по измеренным статистическим распределениям мы нигде не пользовались динамическими законами классической механики. Это обстоятельство имеет принципиальное значение, так как делает применимым полученное соотношение (4) для выявления скрытого движения по определенной траектории вне зависимости от действующих динамических законов. Сле-

довательно, факт движения по определенной траектории из-за кинематических факторов приводит к определенной взаимосвязи отдельных статистических распределений по q и p , являющихся проекциями микроканонического распределения.

Таким образом, только на основании измеренных распределений $\rho(q)$ и $f(p)$, не прибегая к одновременному измерению импульса и координаты и не делая каких-либо предположений о динамических законах, управляющих движением исследуемого объекта, мы можем на основании соотношения (4) установить факт движения по траектории и определить саму траекторию движения объекта в фазовом пространстве.

Это означает, что мы можем применить соотношение (4) и к анализу скрытого движения микрочастиц в различных квантовомеханических состояниях. Поскольку в этой области физики принципиально невозможно одновременное измерение импульса и координаты микрочастицы, указанный способ анализа представляет единственную возможность выявления скрытого движения по определенной траектории. Подставив в соотношение (4) распределения, даваемые квантовой механикой для стационарных состояний, мы убедимся, что полученное уравнение не имеет решений. Ни при каких действительных значениях p не выполняется равенство (4) для определенных q , если, например, взять функции распределения для квантового осциллятора. Нетрудно убедиться, что это нарушение равенства (4) имеет место для всех квантовомеханических состояний с волновой функцией, представляющей суперпозицию плоских волн. Отсутствие решений уравнения траектории означает, что квантовомеханические распределения $\rho(q)$ и $f(p)$ не совместимы с представлением о скрытом движении по определенной траектории. Исключение составляет только свободное движение микрочастиц с заданным импульсом, т. е. случай отсутствия интерференции волн.

Следовательно, вывод фон Неймана обобщается и на случай полностью скрытых, принципиально ненаблюдаемых параметров. Это значит, что статистичность квантовомеханического описания обусловлена не только случайностью выбора момента измерения отдельного экземпляра из статистического коллектива одинаковых объектов, находящихся в стационарном состоянии дви-

жения, но и более сложным характером скрытого от непосредственного наблюдения движения.

Следует отметить, что в работе Д. Бома [12] был сделан совершенно ошибочный вывод о существовании скрытого квантовомеханического движения по динамическим траекториям. Полученную из уравнения Шредингера систему двух уравнений автор интерпретировал как уравнения динамического описания движения микрочастицы на том основании, что одно из этих уравнений имеет вид уравнения Якоби — Гамильтона с добавочным квантовомеханическим потенциалом. Как показал ранее Б. Т. Геликман [27] на примере описания движения броуновской частицы, и в классической физике подобная система уравнений является описанием статистического, а не динамического движения частицы. Скрытый параметр, трактуемый Д. Бомом в качестве скорости отдельной частицы в определенной точке пространства, на самом деле является лишь средней скоростью континуума частиц в данной точке.

Поиск теоретического описания скрытого движения в квантовой механике, безусловно, следует вести, учитывая случайный характер этого движения, на основе статистического анализа, позволяющего определить всюду положительную плотность вероятности $F(p, q)$ в фазовом пространстве. Развитый выше подход легко обобщается на случай более сложного движения в фазовом пространстве. Для сохранения полной ясности это обобщение целесообразно провести сначала на примере движения объектов классической механики.

Пусть независимым и отдельным измерениям q и p подвержен статистический ансамбль систем, полная энергия которых распределена по некоторому закону $W(\varepsilon)$. Результаты измерений функций распределения $\rho(q)$ и $f(p)$ будут одинаковы как для ансамбля, составленного из механической смеси систем с разными, но постоянными для каждого экземпляра значениями энергии, так и для ансамбля, составленного из одинаковых неконсервативных систем, полная энергия которых меняется вследствие независимых случайных толчков. Интерпретация статистических результатов будет, конечно, различной для таких ансамблей.

Наблюдаемые распределения в рассматриваемом случае будут равны:

$$\rho(q) = \int_{\varepsilon_1(q)}^{\infty} \frac{2m}{T(\varepsilon)} \frac{W(\varepsilon) d\varepsilon}{|\rho(\varepsilon, q)|}; \quad (5a)$$

$$f(p) = \int_{\varepsilon_2(p)}^{\infty} \frac{2}{T(\varepsilon)} \frac{W(\varepsilon) d\varepsilon}{|\dot{\rho}(\varepsilon, q)|}. \quad (5b)$$

С другой стороны, эти же функции связаны следующими интегральными соотношениями с плотностью вероятности в фазовом пространстве:

$$\rho(q) = \int_{-\infty}^{\infty} F(p, q) dp; \quad (6a)$$

$$f(p) = \int_{-\infty}^{\infty} F(p, q) dq. \quad (6b)$$

Из сопоставления этих соотношений следует

$$F(p, q) = \frac{W(\varepsilon)}{T(\varepsilon)}, \quad (7)$$

где функции $W(\varepsilon)$ и $T(\varepsilon)$ нам неизвестны. Но из этого соотношения следует, что нужную нам плотность вероятности мы можем искать как некоторую функцию $F(\varepsilon)$ только одной переменной $\varepsilon = \frac{p^2}{2m} + V(q)$. Выразив абсолютную величину скорости $\left| \frac{p}{m} \right|$ в соотношении (5a) через энергию, получим для искомой функции $F(\varepsilon)$ следующее интегральное уравнение Вольтерра первого рода:

$$\rho(q) = \sqrt{2m} \int_{\varepsilon_1}^{\infty} \frac{F(\varepsilon) d\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon - \varepsilon_1}}, \quad (8)$$

где величина q в функции $\rho(q)$ должна быть выражена через величину нижнего предела интеграла $\varepsilon_1 = V(q)$.

Полученное уравнение (8) совпадает с уравнением, встречающимся в задаче Абея. Оно имеет единственное решение [28, стр. 246] следующего вида:

$$F(\varepsilon) = \frac{1}{\pi \sqrt{2m}} \frac{d}{d\varepsilon} \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{\rho(q = q(\varepsilon_1)) d\varepsilon_1}{\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon}}. \quad (9)$$

Таким образом, решение обратной задачи было полу-

чено нами с использованием динамических законов классической механики. Для определения плотности вероятности $F(\varepsilon)$ в фазовом пространстве требуется знать распределение $\rho(q)$ и функцию потенциальной энергии $V(q)$. Распределение по импульсам $f(p)$ при этом подходе может быть предсказано на основании (6б) или (5б), где ε_2 следует принять равным $\frac{p^2}{2m} + V_{mi}$. Соотношение (7) предполагает выполнение равенства $\varepsilon = \frac{p^2}{2m} + V(q)$. Соотношения же (5) и (6) могут быть использованы при статистическом рассмотрении движения объекта независимо от динамических закономерностей классической механики. При этом все статистические распределения относятся к статистическому ансамблю Гиббса, составленному из одинаковых не взаимодействующих между собой физических систем, подверженных случайным возмущениям, толчкам со стороны одного и того же термостата. Наблюдаемые распределения $\rho(q)$ и $f(p)$ представляют собой сумму взятых с определенными статистическими весами распределений, отвечающих движению по определенным траекториям в фазовом пространстве. За счет стохастических толчков исследуемая система переходит с одной траектории на другую, скачком меняя микросостояния. Если независимые измерения q и p не нарушают исследуемого движения системы, то статистические распределения могут быть получены в ансамбле повторных независимых измерений с одной физической системой, находящейся во взаимодействии с термостатом. Вероятностные распределения результатов измерений обусловлены на этот раз не только случайным выбором момента измерения, но и случайным характером изменения динамического движения исследуемого объекта.

Приняв каноническое распределение по энергии $W(\varepsilon) = \frac{1}{\theta} e^{-\frac{\varepsilon}{\theta}}$ для одномерного классического осциллятора, представляющего собой классическую броуновскую частицу, находящуюся в поле сил $m\omega_0^2 q$ и испытывающую независимые случайные толчки, из соотношений (5) получим в согласии с результатами работы [29] для q и p распределения по нормальному закону. Распределения Гаусса, таким обра-

зом, получаются в результате суммирования распределений

$$\rho(q, \varepsilon) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{q_0^2(\varepsilon) - q^2}} \quad \text{и} \quad f(p, \varepsilon) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{p_0^2(\varepsilon) - p^2}}, \quad (10)$$

где

$$q_0^2 = \frac{2\varepsilon}{m\omega_0^2} \quad \text{и} \quad p_0^2 = 2m\varepsilon.$$

Частица, движущаяся в фазовом пространстве по эллиптической траектории, соответствующей полной энергии ε , в некоторый случайный момент времени t в точке $q(t)$ получает толчок, изменяющий мгновенно ее импульс $p(t)$ на некоторую случайную величину Δp_i . Следовательно, находясь в той же точке q с прежней потенциальной энергией $\frac{m\omega_0^2 q^2}{2}$ в момент времени $t + dt$, частица имеет уже другое

значение кинетической энергии $\frac{(p + \Delta p_i)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} + \Delta \varepsilon_i$. На

ту же величину $\Delta \varepsilon_i = \frac{2p\Delta p_i + (\Delta p_i)^2}{2m}$ изменяется и полная энергия осциллятора, в соответствии с которой дальнейшее движение частицы в фазовом пространстве происходит уже по новой эллиптической траектории.

5. Об однозначном статистическом описании скрытого от непосредственных наблюдений движения микрочастиц в фазовом пространстве

Скрытую величину плотности вероятности $F(p, q)$ в фазовом пространстве для квантовых систем в общем виде следует, конечно, искать исходя из волновой функции состояния, так как она содержит все данные о статистических распределениях измеряемых величин. Однако развитый в предыдущем разделе подход для систем классической механики представляет небезынтересные возможности и для исследования некоторых типично квантовых систем.

Как уже отмечалось, для классического осциллятора с определенной энергией, равной $E_0 = \frac{\hbar\omega_0}{2}$, дисперсии распределений по q и p совпадают с дисперсиями для

квантового осциллятора в нормальном состоянии. Сами же распределения по q и p существенно отличаются от квантовых распределений. Однако для классического осциллятора, возбуждаемого броуновскими толчками, мы имеем уже распределения по q и p того же самого типа, что и в случае нормального состояния квантового осциллятора. Это сходство распределений и позволяет надеяться на возможность получения сведений о скрытом движении при анализе некоторых квантовых систем на основе решения обратной задачи (9), полученного для классической системы.

Использование соотношения (9) для определения $F(\varepsilon)$ по $\rho(q)$ для квантового осциллятора эквивалентно принятию гипотезы о том, что между возмущающими толчками движение осциллятора происходит по законам классической динамики, а неизвестной природы толчки, изменяющие состояние скрытого движения, происходят случайно и независимо от положения объекта в фазовом пространстве. Доказательством справедливости этих необычных по своей простоте предположений о скрытом движении было бы получение всюду положительной плотности вероятности $F(p, q)$ и полное совпадение полученных на ее основе распределений других наблюдаемых переменных с квантовомеханическими.

Подставив в решение (9) распределение для нулевого состояния квантового осциллятора $\rho_0(q) = |\psi_0|^2 = \frac{1}{q_0 \sqrt{\pi}} e^{-q^2/q_0^2}$, где $q_0^2 = \frac{\hbar}{m\omega_0}$, найдем функцию плотности вероятности в фазовом пространстве $F(p, q) = \frac{\omega_0}{2\pi\varepsilon_0} e^{-\varepsilon/E_0}$, где $\varepsilon = \frac{p^2}{2m} + V(q)$, и соответственно энергетическое распределение, совпадающее с каноническим распределением Гиббса, если модуль распределения θ принять равным $E_0 = \frac{\hbar\omega_0}{2}$. Полученная функция $F(p, q)$ является всюду положительной величиной. Вычисленное на ее основе распределение $f(p)$ точно совпадает с квантовомеханическим распределением

$$f_0(p) = \frac{1}{p_0 \sqrt{\pi}} e^{-p^2/p_0^2},$$

где $p_0^2 = \hbar m \omega_0$.

На первый взгляд, казалось бы, имеется тем не менее явное противоречие распределения по энергии для рассмотренного осциллятора с постоянством полной энергии квантового осциллятора. Однако на самом деле именно последовательное применение формализма квантовой теории показывает полную тождественность этих систем. Используемая нами переменная $\varepsilon = \frac{p^2}{2m} + V(q)$ для фиксации положения рассмотренной системы на определенной эллиптической траектории в фазовом пространстве прежде всего является скрытой, непосредственно ненаблюдаемой величиной в квантовой механике как сумма мгновенных значений кинетической и потенциальной энергии. Именно из невозможности одновременного измерения импульса и координаты следует невозможность измерения величины ε и наблюдения дисперсии в ее распределении. Измеряемой в квантовой механике является другая величина E , соответствующая оператору полной энергии $\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(q)$, равному сумме операторов кинетической и потенциальной энергии, в то время как скрытая величина энергии ε является суммой собственных значений кинетической и потенциальной энергии. Среднее же значение этой ненаблюдаемой величины равно полной энергии осциллятора. Действительно, $\bar{\varepsilon} = \int_0^\infty \varepsilon W_0(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{\hbar\omega_0}{2}$.

Следует также иметь в виду, что для точного измерения полной энергии всегда требуется согласно принципу неопределенности бесконечно большое время.

Может показаться противоречивым лишь сам факт превышения значений скрытой величины ε над полной энергией системы $E_0 = \frac{\hbar\omega_0}{2}$. Однако это обстоятельство является прежде всего прямым следствием той же кажущейся противоречивости соотношения между энергетическими переменными в самой квантовой механике. Порознь измеримые величины кинетической и потенциальной энергии согласно квантовой теории принимают также и собственные значения, превышающие собственное значение полной энергии. Современная квантовая теория не объясняет этого необычного соотношения между энергетическими характеристиками, отмечая лишь отсутствие противоречия в рамках принятого форма-

лизма в силу одновременной неизмеримости этих величин.

Таким образом, естественно, что ненаблюдаемая величина ε , представляющая сумму собственных значений кинетической и потенциальной энергий, принимает значения, превышающие полную энергию. Но физическая теория, претендующая на описание скрытого движения, не может ограничиться только выяснением формальной непротиворечивости этого факта. Необходимо найти физическое объяснение как этому факту, так и вообще причинам неизолированности, неконсервативности квантовых систем.

Попытка представить квантовый осциллятор как полностью тождественный рассмотренному выше броуновскому осциллятору, для которого невозможно только провести измерение мгновенной энергии ε , наталкивается на одну принципиальную трудность. Квантовые частицы, высвободившиеся благодаря туннельному эффекту, всегда имеют энергию, соответствующую полной энергии системы с незначительным дисперсионным разбросом. Следовательно, толчки, испытываемые квантовыми системами, оставляют неизменной полную энергию системы. Это будет возможно, если предположить, что при каждом отдельном толчке одновременно происходит мгновенное изменение кинетической энергии на величину $\Delta\varepsilon_i$ и потенциальной энергии на величину $\Delta V_i = -\Delta\varepsilon_i$, сохраняющую неизменное значение в процессе дальнейшего движения частицы в пространстве до следующего случайного толчка. Тогда ненаблюдаемая величина $\varepsilon = \frac{p^2}{2m} + V(q)$, учитывая только мгновенные изменения кинетической энергии, характеризует положение объекта в фазовом пространстве и не определяет остающиеся неизменными мгновенные значения полной энергии $E_i = \varepsilon_i + \Delta V_i$. Такие процессы, идущие с сохранением полной энергии, в квантовой теории называют виртуальными.

Флуктуациями кинетической энергии объясняется уход частицы в область, далекую от притягивающего центра, где велика потенциальная энергия, определяемая классической функцией $V(q) = \frac{m\omega_0^2 q^2}{2}$ без учета случайных сдвигов потенциала на ΔV_i . Прохождении

ем над потенциальным барьером за счет случайного процесса опускания всей потенциальной функции объясняется туннельный эффект. Применяя классический образ потенциала силового поля, квантовая механика в действительности же скрыто учитывает микроскопическую природу флуктуаций потенциальной энергии. Не объясняя физической сущности туннельного эффекта, современная теория пользуется для его формулировки весьма неудачной терминологией (подбарьерные частицы, туннельный эффект). Из самого факта предсказания квантовой механикой сколь угодно больших значений кинетической энергии частиц уже следует необоснованность представления о прохождении частиц под барьером.

Таким образом, для типично квантового случая движения, каким является квантовый осциллятор в наименьшем энергетическом состоянии, удалось получить существенно положительную функцию распределения в совместном координатно-импульсном представлении. Тот же факт, что это решение удалось найти на основе классического подхода, означает, что квантовый осциллятор между отдельными возмущающими толчками совершает микродвижение по динамическим законам классической механики. Лишь в наличии случайных особого типа толчков извне проявляется специфика квантовой природы. В классической физике не встречалось подобных примеров неизолированности систем, когда толчки извне приводят к противоположным изменениям кинетической и потенциальной энергий.

О природе статистичности квантовомеханического описания ранее высказывались мнения лишь в виде гипотез и догадок. Так, по мнению Д. И. Блохинцева, квантовая статистичность обусловлена невозможностью изоляции микросистем от макромира [30, стр. 376]. Более определенное мнение о возможной природе неизолированности макросистем было робко высказано авторами учебника [31, стр. 145] в виде предварительной, неапробированной гипотезы, напечатанной мелким шрифтом. В качестве возможной причины случайного воздействия на движение микрообъекта ими было указано на флуктуационные удары со стороны виртуального поля фотонов вакуума. Обоснованием для сделанного предположения являлось полученное в работе [32] соотношение неопределенностей для классического гармонического

осциллятора, возбуждаемого флуктуационными ударами со стороны фотонного вакуума. Недостаточность этого обоснования станет очевидной, если вспомнить полученный выше результат о выполнении при некоторой энергии соотношения неопределенностей и для классического осциллятора, совершавшего динамическое движение.

Убедительное доказательство существенной роли флуктуаций вакуума в квантовой механике было получено еще ранее в работе Э. И. Адировича и М. И. Подгорецкого [33]. В этой работе было показано, что классический гармонический осциллятор, возбуждаемый флуктуационными ударами виртуальных фотонов вакуума, имеет точно такие же распределения координат и импульсов, как и квантовый осциллятор в нормальном состоянии.

Авторами не было найдено для рассмотренного осциллятора энергетическое распределение $W(\epsilon)$, определяющее плотность вероятности в фазовом пространстве. Получив же отличную от нуля дисперсию энергетического распределения и не заметив, что она относится к скрытой, непосредственно ненаблюдаемой величине, авторы пришли к ошибочному заключению о неполной тождественности рассмотренного классического и квантового осцилляторов.

Используя приведенное выше доказательство об отсутствии противоречия в энергетических характеристиках этих осцилляторов, мы можем на основании результатов работы [33] прийти к однозначному выводу относительно физической природы флуктуационных толчков, нарушающих изолированность квантовых систем. Именно виртуальные процессы возбуждения квантовых систем фотонным вакуумом приводят к неизвестным в классической физике одновременным флуктуациям кинетической и потенциальной энергии при сохранении полной энергии.

Таким образом, специфическая особенность наличия нулевой энергии $E_0 = \frac{\hbar\omega_0}{2}$ квантовых систем целиком обусловлена их неизолированностью от нулевых колебаний вакуума, воздействием виртуальных фотонов вакуума. Так как виртуальные процессы изменения кинетической энергии за счет потенциальной могут происходить, по определению, только в связанных системах, то нуле-

вой энергией обладают именно такие системы, а величина нулевой энергии оказывается пропорциональной частоте ω_0 , характеризующей степень жесткости связи. Существование конечной величины нулевой энергии связанных систем в свою очередь означает отсутствие в природе ансамблей с дисперсиями по q и p , одновременно равными нулю. Следовательно, соотношение неопределенностей обусловлено принципиальной невозможностью изоляции систем от нулевых колебаний вакуума, а не свойствами процесса измерения. Напротив, невозможность одновременного измерения импульса и координаты является прямым следствием отсутствия квантовых ансамблей, отвечающих состоянию покоя локализованной частицы, и принципиальной необходимости нарушения исследуемого состояния движения при взаимодействии, используемом для развития макроскопического процесса в каждом отдельном акте измерения.

Таким образом именно взаимодействие с вакуумом, в неявном виде учитываемое теоретическим формализмом, обуславливает основное отличие квантовой механики от статистического описания динамических систем классической физики. Принципиальная невозможность изоляции любой материальной системы от взаимодействия с физическим вакуумом, представляющим систему с бесконечным числом степеней свободы, делает всеобщими квантовые закономерности и приводит к принципиально недетерминированному движению микрочастиц.

Эти основные особенности скрытого движения микрочастиц нам удалось выяснить на основе установления однозначного совместного координатно-импульсного статистического описания квантового гармонического осциллятора в нормальном состоянии. Однако дальнейший анализ показывает, что выявленное на этом частном примере стохастическое воздействие физического вакуума на микрочастицы в связанном состоянии далеко не исчерпывает специфику скрытого движения квантовых частиц. Это стохастическое воздействие со стороны вакуума предопределяет отмеченное еще Шредингером [34] и Фюртом [35] некоторое сходство между основным уравнением квантовой механики и классическим уравнением движения броуновской частицы. Но, с другой стороны, имеющееся принципиальное различие между этими уравнениями не удастся в полной мере объяснить отли-

чием природы виртуальных толчков, испытываемых микрочастицей со стороны физического вакуума, от молекулярных толчков, испытываемых броуновской частицей. К сожалению, мы не имеем возможности останавливаться здесь на анализе работ (27, 36, 37, 38), в которых имеющаяся некоторая аналогия в статистических закономерностях квантовой механики и классической диффузии получила явную переоценку. Отметим лишь, что если бы вся специфика движения квантовой частицы исчерпывалась независимыми случайными толчками со стороны вакуума, нарушающими детерминированное движение по классическим законам, то полученное нами решение (9) давало бы для любого квантового состояния описание скрытого движения микрочастицы в виде всюду положительной функции плотности вероятности в фазовом пространстве. Для выяснения же ограниченных возможностей применения к квантовым системам полученного нами решения обратной задачи достаточно будет обратиться к рассмотрению квантового осциллятора в возбужденном состоянии.

Взяв функцию распределения координат для первого возбужденного уровня квантового осциллятора

$$\rho_1(q) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q^2}{q_0^3} e^{-q^2/q_0^2},$$

получим однозначное решение уравнения (9):

$$F_1(\varepsilon) = \frac{\omega_0}{2\pi} \cdot 2 \left(\frac{\varepsilon}{E_0} - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{E_0} e^{-\varepsilon/E_0}$$

и соответственно энергетическое распределение, которое имеет среднее значение энергии, совпадающее с полной энергией

осциллятора в этом состоянии $\bar{\varepsilon} = \int_0^{\infty} \varepsilon W_0(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{3}{2} \hbar \omega_0$. Най-

денное на основе $F_1(\varepsilon)$ распределение по импульсам также совпадает с квантовомеханическим распределением. Однако полученная функция $F_1(\varepsilon)$ не дает статистического описания в фазовом пространстве, так как при $\varepsilon < \frac{E_0}{2}$ она принимает отрицательное значение и, следовательно, не является плотностью вероятности в фазовом пространстве. Совершенно аналогичная ситуация возникает и при рассмотрении других возбужденных состояний. Тем не менее немаловажное зна-

чение имеет тот факт, что на основе классического статистического анализа квантовомеханической плотности вероятности $\rho_n(q)$ в координатном пространстве удается получить функцию $F_n(e)$, которая позволяет вычислить и распределение по импульсам $f(p) = |c(p)|^2$, и значения полной энергии $E_n = \hbar\omega_0\left(n + \frac{1}{2}\right)$, не обращаясь к уравнению Шредингера.

Формальная применимость решения (9) в этом случае, надо полагать, обусловлена выполнением основной предпосылки проведенного расчета, состоящей в предположении о движении частицы по динамическим законам классической механики в промежутках между флуктуационными толчками со стороны вакуума. Однако из того факта, что найденное решение для возбужденного состояния квантового осциллятора в некоторой области фазового пространства принимает отрицательное значение, с неизбежностью следует, что специфика квантового движения не может быть объяснена полностью на основе учета только независимых стохастических нарушений этого движения виртуальными фотонами вакуума. Не касаясь физической природы этих нарушений, мы должны допустить в общем случае более сложную картину их стохастического действия, предположив, например, существование зависимости толчков от состояния движения микрообъекта.

6. Заключение

Таким образом, можно надеяться на решение и более сложной задачи описания скрытого движения в фазовом пространстве в самом общем случае на основании учета коррелированности флуктуационных толчков вакуума. При решении этой задачи можно исходить из квантовомеханической плотности $\rho_n(q)$ только в случае действительной волновой функции. В общем же случае комплексной волновой функции решение задачи должно исходить непосредственно из волновой функции, так как только оно содержит полную информацию о состоянии квантовой системы, включая и сведения о корреляции флуктуационных толчков. И если случайные флуктуационные толчки, испытываемые квантовой системой со стороны физического вакуума, окажутся статистически коррелированными, зависимыми от состояния движения микрочастиц, то волновые процессы в вакууме, обобщен-

ную информацию о которых содержит волновая функция, могут быть единственной физической причиной управления виртуальными процессами воздействия на механические системы. Ненаблюдаемые непосредственно волны де Бройля могут соответствовать реальному физическому процессу в вакууме, связанному с движением механического микрообъекта и обнаруживающему свое существование только по влиянию на виртуальные процессы воздействия вакуума на ту же механическую систему. Следует обратить внимание на принципиальное отличие этого предположения от обсуждавшихся ранее идей волны-пилота или двойного решения [10, 11], согласно которым волна управляет движением микрочастицы в пространстве и времени, а не случайным процессом виртуального взаимодействия с вакуумом.

Вместе с тем необходимо заметить, что особенности квантовых закономерностей вряд ли могут быть полностью объяснены воздействием, испытываемым связанной микрочастицей со стороны физического вакуума, так как неклассические свойства поведения микрочастиц отчетливо проявляются и для свободного движения, описываемого суперпозицией плоских волн. Попытки расшифровки этого движения также приводят к отрицательным «вероятностям». Однако все проведенные до сих пор статистические анализы квантовой механики с целью аналитического определения неизмеряемой плотности вероятности в фазовом пространстве исходили из одного недостаточно обоснованного предположения о процессе измерения в квантовом ансамбле. В классической статистической физике процесс измерения приводит к разбиению исходного статистического коллектива на такие части с определенными неизменными значениями измеряемых величин, которые при смешивании дают статистический ансамбль, совершенно тождественный исходному. В статистических анализах квантовой механики процесс измерения также предполагается в виде разбиения исходного статистического ансамбля на части с неизменным значением измеряемой величины, пропорциональные по своему объему вероятности пребывания систем исходного ансамбля с заданным значением измеряемой величины. Именно таков смысл принимаемых обычно соотношений (6а) и (6б). Тот же факт, что получаемый после измерения смешанный статистический ансамбль оказывается

в общем случае не эквивалентным исходному, объясняется тем, что сама процедура выделения макроскопическими средствами в исходном ансамбле систем с заданным значением наблюдаемой ведет к изменениям дополнительных величин в силу перехода систем в другое состояние движения, называемое собственным состоянием для данной измеряемой величины.

Однако в принципе нельзя исключить и то, что на самом деле при этом процессе перехода в общем случае определенным изменениям подвергаются не только дополнительные величины, но и сами измеряемые величины. Тогда даваемые квантовой механикой статистические распределения плотностей вероятностей для различных физических величин должны трактоваться в качестве вероятностей перехода из исходного состояния в собственные состояния, не имеющих прямого отношения к пребыванию систем исходного ансамбля с заданным значением переменной.

Надо полагать, что именно волновой процесс в вакууме может оказаться причиной того, что для определения вероятности перехода квантовой системы из исходного состояния движения в собственное состояние для некоторой величины требуется принимать во внимание фазовый объем исходного состояния, соответствующий не только данному собственному значению переменной, но и другим собственным значениям.

Как было показано в работе [39], необходимость такой трактовки измерения с очевидностью следует из статистического анализа простейшего случая свободного движения микрочастицы, описываемого суперпозицией двух плоских волн. В той же работе было обращено внимание на возможность устранения отрицательных «вероятностей» при описании этого движения за счет введения состояний в фазовом пространстве, по-разному относящихся к средствам наблюдения дополнительных величин. Правда, в работе [39] нами был конкретно рассмотрен лишь частный вариант этого более общего подхода, при котором, однако, не было соблюдено обычное условие нормировки полной вероятности на единицу.

В общем же виде никем еще не проводился систематический анализ квантовой механики как с учетом возможных корреляций во взаимодействиях микросистем с вакуумом, так и с учетом возможности перехода из лю-

бой точки фазового объема исходного состояния в данное собственное состояние. А вместе с тем именно эти не учтенные пока свойства квантовых систем могут оказаться теми существенными добавлениями к общему свойству неизолированности квантовых систем от нулевых колебаний вакуума, которыми обусловлено обсуждавшееся выше принципиальное отличие квантовых уравнений от классического уравнения диффузии или движения броуновской частицы.

Конечно, только строгое математическое решение задачи описания скрытого движения в общем случае может подтвердить или опровергнуть сделанное предположение о влиянии некоторого волнового процесса на виртуальные процессы взаимодействия механических систем с вакуумом и процессы перехода этих систем в новые состояния движения. Однако сама идея разделения квантовомеханического объекта на собственно микрочастицу, имеющую реальную энергию и способную производить используемые в измерениях реальные (невиртуальные) воздействия, и на скрытый, непосредственно ненаблюдаемый волновой процесс в вакууме, оказывающий случайного характера воздействия на микрочастицу, — сама эта идея представляет пока единственную возможность логически и физически непротиворечивого объяснения интерференционных эффектов одиночных частиц. У этой идеи объяснения просто нет конкурента, если только не считать господствующую сейчас идею отказа вообще от объяснения явлений интерференции. Обсуждая противоречивость обычных попыток объяснения двух постановок опыта с одиночными фотонами, прошедшими полупрозрачное зеркало, Н. Бор писал: «При всякой попытке наглядно представить себе поведение фотона мы, стало быть, встретились бы со следующим затруднением: с одной стороны, мы должны были бы сказать, что фотон выбирает один из двух путей, с другой же стороны — что он ведет себя так, как если бы он пошел по обоим путям сразу» [5, стр. 585]. Из неприемлемости каждой из гипотез для объяснения результатов обоих дополнительных постановок опыта Н. Бор и делает свой вывод о невозможности какого-либо объяснения движения фотона в пространстве после прохождения полупрозрачного зеркала, фактически превращая принцип дополнительности в принцип исключительности.

Однако подразделение объекта на дискретную частицу, идущую только по одному из двух возможных путей, и на непрерывный волновой процесс в вакууме, проходящий по обоим путям и оказывающий затем статистическое воздействие на микрочастицу, позволяет дать единое и непротиворечивое объяснение наблюдаемым эффектам. Эта возможность объяснения ни Н. Бором, ни другими физиками, к сожалению, серьезно не обсуждалась. В статье О. Фриша [4, стр. 382] среди прочих действительно логически противоречивых или физически несостоятельных попыток объяснения мимоходом высказывается и эта идея объяснения, против которой приводится лишь одно неубедительное возражение о ненужности волнового процесса, существующего самостоятельно, без частицы. Но ведь уже признан физиками в качестве особой физической среды вакуум, несущий бесконечную энергию в связанном виде, из которого мы не можем взять ни одной калории, не затратив столько же энергии. Так почему же нами должна исключаться возможность волнового процесса в вакууме, связанного с этой скрытой в вакууме энергией? Конечно, используемая в квантовой механике волновая функция может выражать только свойства, общие для волновых процессов, связанных с макроскопически выделенным ансамблем микрочастиц. Все трудности интерпретации современной квантовой теории обусловлены невыявленными особенностями взаимодействия с физическим вакуумом и влиянием на это взаимодействие и процесс измерения определенных волновых процессов, связанных с движением механических объектов. Нетрудно себе представить, насколько непонятной и формальной будет, например, теория точного описания движения парохода, если она только в неявном виде учтет реальный процесс образования волн и попадания парохода в собственную отраженную волну.

Поэтому и не следует удивляться необычности законов современной феноменологической теории квантовых явлений, где речь может идти не о волнах в жидкости или газе, а о неучтенных, в явном виде непосредственно не наблюдаемых волнах физического вакуума, влияющих на существенно неклассический вид флуктуационных воздействий на микрообъекты и на процесс измерения физических величин, определяющих их движение. Физическая теория приобретет максимально возможную

ясность и наглядность после явного представления совершенно различных сторон квантовых явлений. Выделение микрообъекта, совершающего движение в пространстве и во времени по законам классической механики, в качестве индикатора действительно совершенно необычных свойств физического вакуума не только поможет осознать в полной мере противоречивую картину использования классических образов для описания неклассических свойств поведения самого микрообъекта, но и позволит по-новому подойти к исследованию физических свойств еще более глубокой области реального мира. Если статистическое обоснование феноменологической термодинамики открыло дверь к исследованиям мира «невидимых» частиц, то аналогичное обоснование феноменологической теории, описывающей поведение этих частиц, откроет новые пути исследования совершенно необычных свойств непосредственно не наблюдаемой универсальной физической среды — вакуума, знание которых может оказаться крайне необходимым для решения фундаментальных проблем теории элементарных частиц.

Автор благодарен Д. И. Блохинцеву, Б. С. Неганову и Ю. И. Иваньшину за интерес к настоящей работе и многочисленные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Мандельштам. Полное собрание трудов, т. 5. М., 1950.
2. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
3. М. Борн.— «УФН», вып. 59, 1956.
4. О. Фриш.— «УФН», вып. 90, 1966.
5. Н. Бор — «УФН», вып. 66, 1958.
6. М. Э. Омеляновский.— «Материалы к симпозиуму «Диалектика и современное естествознание», вып. 2. М., 1966.
7. Д. И. Блохинцев. Принципиальные вопросы квантовой механики. М., 1966.
8. И. фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М., 1964.
9. П. А. М. Дирак. Принципы квантовой механики. М., 1960.
10. Л. де Бройль.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955.
11. Ж.-П. Вижье.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955.
12. Д. Бом.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955.

13. Л. Яноши.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955.
14. E. Wigner.— «Physical Review», 40, 749, 1932.
15. Г. Вейль. Теория групп и квантовая механика. М.—Л., 1936.
16. Я. П. Терлецкий.— «ЖЭТФ», 7, 1290, 1937.
17. D. I. Blokhintsev.— «J. of Phys.» (USSR), 2, 71, 1940.
18. P. A. Dirac.— «Review of Mod. Phys.», 17, 195, 1945.
19. Дж. Мойэл.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955.
20. Р. Л. Стратанович.— «ЖЭТФ», 32, 1483, 1957.
21. Г. В. Рязанов.— «ЖЭТФ», 35, 121, 1958.
22. Фейнман.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М.
23. М. Борн.— «УФН», т. 69, 1959.
24. М. А. Леонтович. Статистическая физика. М., 1944.
25. К. В. Никольский. Квантовые процессы. М., 1940.
26. Д. И. Блохинцев. Основы квантовой механики. М., 1953.
27. Б. Т. Геликман.— «ЖЭТФ», 17, 830, 1947.
28. В. И. Смирнов. Курс высшей математики, т. 2. М.—Л., 1952.
29. Н. Н. Боголюбов. О некоторых статистических методах в математической физике. М., 1945.
30. «Философские вопросы современной физики». М., 1952.
31. А. А. Соколов, Ю. М. Лоскутов, И. М. Терпов. Квантовая механика. М., 1962.
32. А. А. Соколов, В. С. Туманов.— «ЖЭТФ», 30, 802, 1956.
33. Э. И. Адирович, М. И. Подгорецкий.— «ЖЭТФ», 26, 150, 1954.
34. E. Schrödinger.— «Berl. Ber.», 144, 1931.
35. R. Fürth.— «Zeit. für Phys.», 81, 143, 1933.
36. И. Феньеш.— «Вопросы причинности в квантовой механике». М., 1955.
37. E. Nelson. Physical Review, 150, 1079, 1966.
38. G. G. Comisar.— «Physical Review», 138, 1332, 1965.
39. А. А. Тяпкин.— «Философские проблемы физики элементарных частиц». М., 1963.

Л. Г. Антипенко

О СУЩНОСТИ РЕДУКЦИИ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В СВЕТЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ИМПУЛЬСА

В своих работах Д. И. Блохинцев отмечал, что для выяснения сущности редукции волновых пакетов перво-степенное значение имеет учет воздействия частицы на прибор, а не прибора или макроокружения на частицу. По его мнению, последнее имеет место не всегда и, во всяком случае, не существенно в данном вопросе. Так ли это на самом деле?

В наследие от классического естествознания в научном сознании закрепился тот факт, что всякий материальный объект, тело, сохраняет при всевозможных взаимодействиях свои определяющие характеристики до тех пор, пока такой объект, или тело, не будет окончательно разрушен. С точки зрения философии это означает, что всякая вещь, вступая в различные отношения с другими вещами, не меняет своих существенных свойств. Другими словами, свойства вещи лишь обнаруживаются в отношениях к другим вещам, а не возникают в них.

Квантовая механика преподавала в этом смысле важный гносеологический урок. Она выявила зависимость свойств квантовых объектов от макросреды, в частности от отношений к разным классам приборов [1]. С учетом этого обстоятельства вопрос о редукции волновых пакетов находит некоторое естественное объяснение при более глубоком гносеологическом анализе концепции корпускулярно-волнового дуализма.

Уже не раз в физической и философской литературе обращалось внимание на тот факт, что волновые свойства микрообъекта связаны с обратимыми процессами, происходящими в соответствующих макроусловиях. Наоборот, когда микрообъект проявляет себя сугубо корпускулярным образом, происходят необратимые процессы [2; 3, стр. 307], которые Д. И. Блохинцев назвал «катастрофическими». В чем существенная разница между двумя видами этих процессов?

На этот вопрос, по нашему мнению, можно ответить исходя из рассмотрения особенностей законов сохранения энергии и импульса применительно к движению микрообъекта по отношению к дополнительным (в духе Н. Бора) классам приборов. В современной квантовой теории четкое выявление волновых и корпускулярных свойств микрообъектов безотносительно к соответствующим макроусловиям лишено всякого смысла. В этом легко убедиться, если обратиться к одному из исходных постулатов квантовой механики. Речь идет о приписывании свободно движущейся микрочастице волнового вектора $\vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}$ и циклической частоты волнового процесса $\omega = \frac{E}{\hbar}$. Эти соотношения сами по себе не определяют ни распространение *волны* в классическом смысле, ни движение *части-*

цы, хотя и связывают между собой волновые и корпускулярные характеристики микрообъекта. Неоднозначность в поведении микрообъекта устраняется лишь относительно заданных макроусловий. Мы не имеем права ассоциировать с микрообъектом образ частицы безотносительно к макроусловиям определенного рода. Нам представляется, что там, где микрообъект проявляется в некотором смысле как волна, обнаружить частицу не удастся только по той простой причине, что ее там нет. Соответственно в таких условиях волне следует приписывать более реальный смысл, чем это делается при обычной статистической интерпретации квантовой механики. Попытаемся это обосновать.

Присоединяясь к утверждениям о том, что безотносительно к прибору нельзя говорить ни о волне, ни о частице, мы допускаем, что между актами измерения имеет место распространение в пространстве некоторого материального возмущения, вопрос о природе которого остается открытым. Все возражения против этих известных соображений, на наш взгляд, связаны с некоторыми неопределенностями, допускаемыми в толковании понятия «частица». Понимание частиц базируется в основном на интуитивных соображениях, унаследованных от классической физики. Парадоксы с редукцией волнового пакета возникают тогда, когда явно или неявно допускается, что при всех взаимодействиях частица сохраняет свои определяющие свойства. Поэтому не лишен смысла вопрос о том, что такое частица, чем определяется ее локальное воздействие на прибор.

Известно, что одним из самых существенных свойств частицы является ее определенная масса покоя. Этот факт сам по себе, правда, не может свидетельствовать о локальных проявлениях частиц; надо учесть еще то обстоятельство, что масса покоя частицы однозначно определяется соотношением между ее энергией и импульсом. Более того, с учетом реального взаимодействия микрообъекта с макросистемами необходимо иметь в виду не энергию и импульс сами по себе, а их одновременное изменение. Все необратимые, катастрофические процессы связаны с такими изменениями энергии и импульса микрообъекта, которые однозначно определяют массу покоя частицы. В тех случаях, где соотношение между ΔE и Δp не соответствует массе покоя частиц, исчезает и локаль-

ное воздействие, характерное для частиц. В этом случае имеют место обратимые процессы. Электроны, нуклоны, атомы, молекулы образуют некоторую волновую картину, о которой судят косвенным образом на основании реальных интерференционных или дифракционных эффектов, после прохождения или соответственно отражения от упорядоченных структур (металлических фольг, кристаллов и т. д.); те же микрообъекты регистрируются в качестве частиц такими приборами, как камера Вильсона (пар), фотографическая пластинка (поликристаллическое вещество), газовый счетчик и т. д. В последнем случае эффект локализации имеет место потому, что происходят необратимые процессы на центрах локализации в самих регистрирующих приборах.

Однозначное соотношение между энергией и импульсом микрообъекта нарушается тогда, когда его кинетическая энергия переходит в потенциальную. А это имеет место во всех случаях, когда микрообъект взаимодействует с упорядоченными структурами или движется в силовых классических полях. Пытаясь спасти классическое представление о частицах, А. Ланде [4, стр. 307—313] попытался возродить отдельную гипотезу В. Дьюайна [5], выдвинутую последним в 1923 г. для объяснения особенностей поведения фотонов (или других частиц), связанного с такими эффектами, как селективное отражение от монокристаллов и пр. Согласно этой гипотезе, система, периодическая в определенном направлении с периодом l , может изменять свой импульс в этом направлении только в количествах, кратных $\frac{h}{l}$ (аналогия с постулатами Н. Бора относительно изменения механического момента $\Delta M = nh$). Если микрообъекты взаимодействуют с такой системой, то по закону сохранения импульса они обязаны иметь селективные направления своего движения после взаимодействия. На самом деле в содержании этой гипотезы приоткрывается завеса над сущностью корпускулярно-волнового дуализма. В упорядоченных системах в результате их взаимодействия с микрообъектами распространяются реальные волны, сдвигающие слои кристалла друг относительно друга. Благодаря конечной скорости распространения этих волн нарушается однозначное соотношение между энергией и импульсом микрообъекта,

которое определяет во всех других случаях его локализацию. Ко всем этим другим случаям относятся взаимодействия микрообъектов в системах с несвязанными или слабо связанными элементами, в которых могут происходить необратимые процессы под действием волнового материального возмущения. Примером необратимого процесса является ионизация атома.

По нашему мнению, в общем и целом «катастрофичность» прибора заключается не в том, что в вышеупомянутых случаях он подвержен необратимым воздействиям, а в том, что во всех случаях он «катастрофично» влияет на сам микрообъект, так что его взаимодействия с микрообъектом выделяют существенные характеристики последнего, формируют его корпускулярные свойства в случае необратимых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. Некоторые проблемы физического познания.— «Вопросы философии», 1964, № 7.
2. Л. Бриллюэн. Научная неопределенность и информация. М., 1966.
3. И. фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М., 1964.
4. А. Lande. Why do quantum theorists ignore the quantum theory?— «The Brit. Journal for Philosophy of Science», 15, N 60, 1965.
5. W. Duane.— «Proc. Nat. Acad.», 9, 158, 1923.

Н. М. Роженко

ПОНЯТИЕ ВЕРОЯТНОСТИ И КВАНТОВАЯ ЛОГИКА

В философских дискуссиях о квантовой механике имеется много от простого непонимания и недоразумений, но есть нечто и от «глубоких истин», о которых Нильс Бор говорил, что противоположные им содержат также глубокую истину. Внесение логической ясности в обсуждение таких глубоких истин, в частности и по вопросу о понятии вероятности, как об этом было сказано в докладах М. Э. Омельяновского и Ю. В. Сачкова¹, могло бы помочь отличить простые недоразумения от ситуаций, когда можно сказать, что противостоящие друг

¹ См. настоящий сборник, стр. 21 и 90.

другу в дискуссии оппоненты в какой-то мере оба обладают долей истины. Имеется в виду построение квантовой логики как математической логики, которая могла бы внести такую ясность.

Строить квантовую логику можно, исходя из высказываний, которые разрешаются соотношением неопределенностей. Например, высказывания «либо p , либо q », «если p , то не- q , и если q , то не- p », «совместное p и q невозможно», «либо p , либо q , либо p и q неопределенные» легко формализуются и записываются логикоматематически в виде несложных формул импликации, строгой дизъюнкции, штриха Шеффера и т. п. Анализ этих формул показывает, что они неравносильны, существенно различны, т. е. выражают некоторую двойственность, присущую квантовой механике. Такая двойственность формальнологического выражения соотношения неопределенностей кажется неслучайной и проявляется, например, в альтернативной схеме «либо пространственно-временное описание, либо причинность», в утверждении несовместимости и взаимоисключаемости дополнительных аспектов корпускулярно-волнового описания, расщеплении понятия реальности, смысле волновой функции. Здесь вместе с тем становится очевидным, что двух значений — «истины» и «лжи» — недостаточно и нужно допускать другие истинностные значения — «неопределенно», «вероятно» и т. п. Очевидно, квантовая логика должна быть вероятностной, модальной, многозначной. К такому мнению склоняются в своих работах по квантовой логике Г. Рейхенбах, П. Феврие, К. Вейцзекер, П. Миттельштадт и др. Среди них проектив-операторная концепция квантовой логики Неймана и Биркгофа, выдвинутая еще в 30-е годы, представляется наиболее адекватной, однако и она не может считаться окончательной. Н. Бор, как известно, возражал против существующих вариантов квантовой логики.

Поэтому достижение большей ясности в этом вопросе, необходимость большего внимания к проблеме построения квантовой логики, как разновидности математической логики, весьма актуальны и положили бы конец мнимым философским спорам не по существу. Квантовая логика, если она будет построена и признана общесогласованной в будущем, будет логикой дополненности включающей фундаментальное понятие вероятности.

О ПРИРОДЕ ВЕРОЯТНОСТИ

По укоренившейся традиции в философской литературе лишь для квантовой механики допускается фундаментальность и первичность вероятностных представлений, тогда как для статистической механики молчаливо допускается лишь вспомогательный характер вероятностных методов. Вполне прав В. И. Купцов¹, когда высказывает мысль о том, что и в статистической механике вероятность не является мерой незнания, а выражает существо происходящих процессов. Причем важно подчеркнуть, что речь идет не о практической невозможности решения $6N$ (N — число молекул в моле газа) дифференциальных уравнений, а о принципиальной невозможности сведения законов поведения статистических систем к жестко детерминированным законам.

В связи со сказанным нам представляется небесполезным напомнить некоторые результаты, полученные покойным физиком Н. С. Крыловым [1]. Анализируя логические основы статистической механики, Н. С. Крылов обращает внимание на то, что существенно выполнение трех условий: 1) эргодичности, 2) конечности времени релаксации, 3) монотонности возрастания термодинамической вероятности (выполнимость второго начала термодинамики). Оказывается, что все эти три условия выполняются, если выполняется условие так называемого *размешивания*, и наоборот. Все системы, рассматриваемые в статистической механике, являются системами размешивающегося типа.

Однако законы поведения размешивающихся систем противоречат допущению о ньютоновском характере процессов, якобы лежащих в основе поведения этих систем. Так, например, в результате размешивания система всегда приходит в некоторое равновесное состояние, характеризующееся равновероятностью всех микросостояний. Если же допустить, что в основе поведения системы лежат законы ньютоновской механики, то мы в силу различимости частиц в классической механике всегда можем так отобрать (или создать для этого условия) час-

¹ См. стр. 100 настоящего сборника.

тицы, что нарушим равновероятность. Приведем такой пример. Согласно законам ньютоновской механики любое конечное состояние системы всегда строго однозначно зависит от начального, т. е. то распределение, которое вложено в начальное состояние системы частиц газа, должно переноситься однозначным образом на другие состояния. Однако размешивание в строгом соответствии с опытом обеспечивает именно независимость конечных состояний системы от ее начального состояния.

Доказано, что статистичность в статистической механике нельзя обосновать и с точки зрения квантовой механики. Откуда же берется эта статистичность?

Н. С. Крылов оговаривается, что можно было бы допустить возможность получения статистичности как результата незамкнутости, неизолированности первой системы. Тогда, присоединив к ней вторую, внешнюю систему, можно было бы уже по отношению к этой составной системе (система 1 + система 2) сформулировать снова статистический закон поведения, но тем самым мы вынуждены снова прибегать к объяснению при помощи уже третьей внешней системы и т. д. до бесконечности.

Таким образом, статистику нельзя вывести, идя «изнутри» системы, ее нельзя вывести, идя и «извне» системы. Статистику нельзя формально обосновать с помощью другой теории, т. е. нельзя вывести из других (нестатистических!) законов.

Эта парадоксальность является, по нашему мнению, проявлением одной общей диалектической закономерности в теории познания. Суть дела коротко сводится к следующему. С переходом в познании к другому уровню организации объекта, т. е. с переходом от изучения некоторых замкнутых, выделенных элементов к изучению системы, в которой уже совокупность тех же элементов создает некоторую целостность, мы сталкиваемся с новыми свойствами этого объекта, которые требуют адекватного логического языка для своего описания. Закон поведения системы не выводим (и не сводится) из закона поведения отдельного элемента. Подобное же происходит и при переходе от системы к элементарному уровню.

ЛИТЕРАТУРА

Н. С. Крылов. Работы по обоснованию статистической физики. М.—Л., 1950.

Раздел третий

ПРОБЛЕМЫ СТРУКТУРЫ И СИММЕТРИИ КВАНТОВЫХ ОБЪЕКТОВ

В. С. Барашенков

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ СТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1

Проблема структуры материальных объектов, которые в современном эксперименте проявляются как простейшие, представляет собой одну из наиболее интересных и в то же время одну из наиболее трудных проблем современной науки. Эта проблема расположена на пересечении таких важнейших вопросов современной физики и философии, как соотношение простого и сложного, непрерывность и дискретность микроскопического пространства — времени, вопрос о возможности «вневременных» и «внепространственных» форм существования материи и т. д. Без преувеличения можно сказать, что в проблеме структуры микрообъектов рельефно сфокусированы все основные трудности и противоречия современной теории элементарных частиц.

Исследование философских аспектов проблемы структуры материальных объектов началось еще много веков тому назад. При этом многие авторы подчеркивали, что в природе не может быть абсолютно элементарных объектов, поскольку такие объекты не могли бы претерпевать никаких изменений и поэтому оставались бы совершенно необнаружимыми — свойство, которое представляется весьма невероятным. Однако другим исследователям, и в первую очередь многим физикам, подобные соображения не казались убедительными, так как можно было

допустить существование сразу нескольких сортов неизменных по своим внутренним свойствам элементарных объектов (простейших «кирпичиков»), каждый из которых, тем не менее, отличался бы от других. Взаимопревращения таких объектов были бы обнаружимы. Кроме того, отличие свойств элементарных объектов от свойств образованных из них сложных систем давало бы возможность фиксировать их относительное движение.

Нетрудно видеть, что допущение подобных элементарных объектов не противоречит и известному положению В. И. Ленина о «неисчерпаемости», если эту неисчерпаемость понимать не в смысле неограниченного аддитивного деления, а в смысле наличия у каждого элементарного объекта неисчерпаемого количества внутренних неизменных свойств.

Элементарная частица при таком подходе ассоциируется с безразмерной материальной точкой, наделенной неисчерпаемым количеством характеризующих ее признаков: массой, зарядом, спином и т. д. Правда, при этом возникает трудная проблема неограниченного числа элементарных частиц: так как наряду с частицей, обладающей некоторым определенным признаком, можно допустить существование частицы, не имеющей данного признака, то число различных элементарных частиц становится, вообще говоря, необозримо большим. Хотя трудно примириться с мыслью о равной степени элементарности очень большого числа каких-либо объектов, тем не менее эта проблема остается не решенной пока и в современной, более совершенной картине строения вещества (подробнее см. [1]).

Представления о бесструктурных элементарных частицах, частицах-точках, были широко распространены еще совсем недавно, 10—15 лет тому назад, несмотря на то, что созданная сразу же вслед за матричной механикой квантовая теория волновых полей позволяла, во всяком случае — качественно, рассчитать форму и плотность распределения вещества внутри частицы. Весьма характерными в этом отношении являются утверждения Л. Д. Ландау и Е. М. Лившица: «Под элементарными частицами подразумевают частицы, которые во всех физических явлениях принимают участие как целое, т. е. не имеет смысла говорить об их частях»; и далее, «очевидно, что если элементарная частица обладала бы

конечными размерами, то она не должна была бы быть деформируемой, так как понятие доформации связано с возможностью независимого движения отдельных частей тела... Мы приходим, таким образом, к весьма существенному результату, что элементарные частицы не могут иметь конечных размеров, а должны рассматриваться как геометрические точки» [2, стр. 34].

Образ пространственно-структурной и в то же время элементарной по своим свойствам частицы был осознан физиками далеко не сразу. Решающий перелом здесь произошел лишь в 50-х гг., после того, как Р. Хофштадтер экспериментально доказал наличие в протоне электромагнитного облака с размерами $r \sim 10^{-13}$ см.

В настоящее время известно, что не только нуклоны, но и все другие частицы, в том числе и такие, казалось бы, «бестелесные», как нейтрино и фотон, — все имеют сложную внутреннюю структуру. Структура, обусловленная сильными ядерными взаимодействиями, характеризуется размером $r \sim 10^{-13}$ см, т. е. размером порядка комптоновской длины волны наилегчайшей ядерной частицы — π -мезона. Кроме этого, вокруг частицы существует облако электронно-позитронных пар с характерным размером $r \sim \hbar/2m_e c$, приблизительно в 150 раз большим размера мезонного облака; однако благодаря слабости электромагнитных взаимодействий (отношение электромагнитной и ядерной постоянных связи $e^2/g^2 \simeq \simeq 5 \cdot 10^{-4}$) плотность этого облака совершенно ничтожна и заметным образом проявляется лишь при весьма специфических условиях, например в процессах рассеяния на очень малые углы $\theta \sim 0$.

В ультрамалых областях $r \sim (10^{-16} \div 10^{-17})$ см следует ожидать существенного вклада слабых взаимодействий, которые на этих расстояниях происходят с неменьшей вероятностью, чем сильные ядерные взаимодействия. Элементарные частицы представляются нам сейчас чрезвычайно сложными образованиями, структура которых весьма прихотливым образом зависит от интерференции облаков различных виртуальных частиц. В центральных областях структура является значительно более плотной, чем на периферии¹. В этом смысле можно ска-

¹ Вследствие соотношения неопределенностей $\Delta x \cdot \Delta p \sim \hbar$ на малых расстояниях возможно образование тяжелых виртуальных частиц и многомезонных комплексов с массой $\Delta m \sim \Delta p \cdot c \sim \hbar c / \Delta x$, тем большей, чем меньше Δx .

зять, что элементарная частица состоит из плотного ядра и рыхлой периферической оболочки. Вместе с тем в отличие, например, от атома водорода, где центральное ядро и электронная оболочка четко разделены и различаются по своим размерам на пять порядков, между ядром и периферией элементарной частицы нет резкой границы. (В этом проявляется некоторая общая закономерность: чем меньше расстояния мы рассматриваем, тем более «перемешанными» и трудно разделимыми в пространственном отношении становятся отдельные детали структуры.)

Правда, экспериментально такая картина в настоящее время обоснована только для нуклона, для других частиц она является, строго говоря, всего лишь экстраполяцией нуклонных экспериментальных данных, хорошо согласующейся, однако, с предсказаниями различных квантово-полевых моделей.

2

Сведения о структуре нуклонов сейчас получают в основном из анализа экспериментальных электромагнитных форм-факторов. Однако таким образом удастся, в сущности, определить лишь значения среднеквадратичных радиусов, получить сведения о распределениях электрического заряда и магнитного момента на далекой периферии, качественно установить факт возрастания плотности их распределения при переходе к центральной области нуклона и оценить вклад различных резонансных взаимодействий в структуру нуклона. Более детальная физическая интерпретация экспериментальных форм-факторов встречает непреодолимые пока трудности, обусловленные тем, что только в нерелятивистском пределе, т. е. при малых значениях передаваемого импульса q , соответственно — только в области далекой периферии $r \sim \hbar/q > 10^{-13}$ см, форм-факторы $F(q)$ просто связаны с пространственной плотностью $\rho(r)$. При меньших значениях r пространственная интерпретация форм-факторов остается пока неясной.

Чтобы понять, в чем здесь дело, прежде всего заметим, что так же, как и любая другая наблюдаемая величина в квантовой теории, плотность распределения заряда, массы или плотность какой-либо другой величи-

ны ξ , характеризующей внутреннюю структуру изучаемой частицы, определяется как среднее значение квантового оператора $\hat{\xi}(x)$:

$$\rho_{\xi}(x) = \langle \psi | \hat{\xi}(x) | \psi \rangle, \quad (1)$$

где $|\psi\rangle$ — волновая функция состояния частицы, $\langle\psi|$ — сопряженная ей функция.

Соответствующий форм-фактор, описывающий структуру частицы на языке импульсных переменных, связан с плотностью $\rho_{\xi}(x)$ интегральным соотношением

$$\rho_{\xi}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{\xi}(q) e^{iqx} d^3q. \quad (2)$$

Это соотношение является определением этого форм-фактора.

С другой стороны, величины, определяемые из опытов с рассеянием, в том числе и форм-факторы, зависят от произведения *различных* волновых функций $\langle\psi_{\text{кон}}|$ и $|\psi_{\text{нач}}\rangle$, описывающих состояние изучаемой частицы (частицы-мишени) *до* и *после* взаимодействия. При рассеянии частиц с энергией, намного меньшей массы мишени, отдача последней мала (мал передаваемый импульс q) и эффектами ее релятивистского сжатия можно пренебречь; геометрическая форма частицы-мишени при этом не изменяется, и конечная волновая функция не отличается от начальной. Поэтому по формуле (2) с помощью форм-фактора $F(q)$, определенного из опыта с рассеянием, можно было бы надеяться вычислить распределение плотности $\rho(x)$.

К сожалению, для этого требуется знать величину $F(q)$ не только при малых, но и при больших значениях q , когда частица-мишень становится релятивистской. В последнем же случае уже нельзя пренебречь релятивистским сжатием ее размеров и волновые функции $\langle\psi_{\text{кон}}|$ $\langle\psi_{\text{нач}}|$ оказываются существенно различными, поэтому определенный из опыта форм-фактор $F(q)$ представляет собой результат сложной суперпозиции начального и конечного состояний и его нельзя интерпретировать как изображение функции плотности на языке импульсных переменных. Экспериментальный форм-фактор, определяемый из измеряемого на опыте сечения рассеяния, и форм-фактор в формуле (2) являются в этом случае совершенно различными величинами.

Более того, вследствие релятивистской инвариантности экспериментальный форм-фактор оказывается зависящим не только от трехмерного вектора q , но и от его четвертой компоненты q_0 , поэтому формально вычисленная с помощью этого форм-фактора плотность ρ оказывается зависящей не только от пространственных, но и от временной переменной:

$$\rho(\bar{x}, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(q) e^{i\bar{q}\bar{x} - iq_0 t} d^4q; F(q) \equiv F(\bar{q}, q_0). \quad (3)$$

Зависимость от времени исчезает лишь в специальной системе координат — в системе центра масс, где всегда $q_0 = 0$.

Если основная часть структуры изучаемой системы простирается в область масштабов Δx , больших ее комптоновской длины волны $\hbar/Mc$, где отдача не важна, то вклад очень больших значений q в интегралы (2) и (3) оказывается несущественным (при этом также $q_0 \simeq 0$) и физический смысл форм-фактора $F(q)$, определенного из опытов с рассеянием, совершенно ясен.

Именно таково положение, например, при исследовании плотности электронных оболочек, атомов, характерный размер которых $\Delta x \gtrsim 10^{-8}$ см, а комптоновская длина волны даже самого легкого атома — атома водорода в миллион раз меньше.

Иная ситуация имеет место при исследовании структуры нуклона, где размер облака виртуальных π -мезонов сравнительно мал, всего лишь в семь раз превосходит комптоновскую длину волны нуклона. Физическая интерпретация экспериментальных форм-факторов в этом и в других подобных случаях становится неясной. Формально вычисленную функцию $\rho(\bar{x})$ лишь на периферии, при $x \gtrsim 10^{-13}$ см, можно приближенно рассматривать как физическую плотность.

Существенно подчеркнуть, что отсюда тем не менее еще нельзя заключить о непригодности пространственно-временных представлений в области $r \lesssim 10^{-13}$ см. В частности, оптический анализ упругого рассеяния высокоэнергетических частиц дает значение вероятности поглощения налетающей частицы веществом частицы-мишени, непосредственно зависящее от пространственной координаты r $k = k(r)$ [3]. Хотя детальная связь определя-

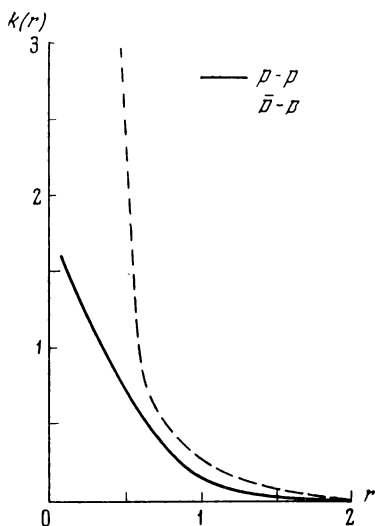


Рис. 1

Вероятность поглощения при упругих $p-p$ и $\bar{p}-p$ взаимодействиях (соответственно сплошная и пунктирная кривые). Значения r даны в единицах 10^{-13} см. В области больших r кривые близки друг к другу; это указывает, что периферическая структура нуклона и антинуклона приблизительно одинакова

емой из опыта функции $k(r)$ с плотностью распределения вещества при $r \lesssim 10^{-13}$ см также остается еще не ясной, координата r сохраняет здесь свой *обычный* физический смысл. При достаточно высокой точности измерений изучение экспериментальной функции $k(r)$ позволяет фиксировать неоднородности пространственной структуры взаимодействующих частиц $\Delta x \sim \lambda$, где λ — дебройлевская длина волны относительного движения этих частиц. (Напомним, что при достигаемой на современных ускорителях энергии $T \simeq 30$ Гэв длина волны λ приблизительно на порядок меньше средних геометрических размеров нуклона.)

Наиболее неясной остается сейчас область ядра. Хотя современные ускорители в принципе дают возможность «прощупать» структурные детали вплоть до расстояний $\Delta x \sim 5 \cdot 10^{-15}$ см, строение центральных областей нуклона по-прежнему остается для нас загадочным белым пятном. Даже само понятие ядра определяется сейчас весьма неоднозначно.

Очень часто ядром называют область, где становятся существенными многомезонные взаимодействия. Размеры такой области составляют что-то около $0,5 \cdot 10^{-13}$ см.

Иногда ядром называют ту часть нуклона, которая ответственна за основные его свойства — его спин, барионное число, гиперзаряд. Радиус такого ядра по поряд-

ку величины, по-видимому, близок к комптоновской длине волны нуклона $\hbar/Mc \simeq 2 \cdot 10^{-14}$ см, и поэтому этот керн может быть сопоставлен облаку тяжелых виртуальных частиц. В частности, процесс нуклон-нуклонной аннигиляции происходит при соприкосновении именно таких центральных частей нуклона и антинуклона. На рис. 1 область аннигиляции соответствует расстояниям $r_{\text{ан}} \lesssim 5 \cdot 10^{-14}$ см, где поглощение антипротонов резко возрастает; в этой области коэффициент $\bar{p} \rightarrow p$ поглощения намного превосходит коэффициент $p \rightarrow p$ поглощения. Если считать, что размеры кернов в нуклоне и антинуклоне приблизительно одинаковы, то $r_{\text{кern}} \sim r_{\text{ан}}/2 \simeq (2 \div 3) \cdot 10^{-14}$ см.

Столкновение относительно массивных кернов частиц сопровождается значительным энерговыделением, рождением большого числа вторичных частиц. Наоборот, при столкновении периферических областей частиц или при столкновении керн — периферия выделяется существенно меньшее количество энергии и, следовательно, рождается меньшее число вторичных частиц; в этом случае керны первичных сталкивающихся частиц испытывают сравнительно небольшую отдачу и незначительно изменяют направление своего движения. Соответственно двум таким типам столкновений в эксперименте наблюдаются два типа существенно различных по своим свойствам неупругих взаимодействий: один тип характеризуется значительно большей множественностью рождающихся частиц и относительно большей изотропией их вылета, чем другой тип; величина импульса, передаваемого бариону в первом случае, отказывается намного большей, чем во втором [4].

Понятно, что поскольку между керном и периферией нет резко выделенной границы, то разделение неупругих взаимодействий на два различных типа также является весьма условным: всегда можно указать некоторое количество событий, которые по их свойствам можно отнести как к одному, так и к другому типу взаимодействий.

Теперь, прежде чем перейти к обсуждению различных теоретических подходов к исследованию структуры частиц, отметим некоторые важные тенденции развития физики элементарных частиц, оказывающие все более сильное влияние на формирование наших представлений о строении частиц и на методы его исследования.

Обзор развития наших представлений о строении вещества и анализ быстро нарастающего потока новых экспериментальных данных о характере микроскопических явлений приводят к важному выводу о том, что по мере дальнейшего углубления в область малых пространственно-временных масштабов все более отчетливо выступают две дополняющие друг друга тенденции: с одной стороны, для описания простейших физических объектов, с которыми мы имеем дело, приходится использовать образы все большей и большей информативной емкости, с другой стороны — возрастает роль случайного фактора и развертывающаяся перед нами физическая картина все дальше и дальше отходит от призрачных линий лапласовского детерминизма в сторону сложных вероятностных построений. Эти тенденции органически связаны между собой, так как вероятностный элемент проявляется как мера, характеризующая множества значений новых степеней свободы, возникающих по мере открытия все большей информативной емкости рассматриваемых физических объектов.

Как с онтологической, так и с гносеологической точек зрения две указанные тенденции весьма точно отражают общий характер развития современной физики элементарных частиц².

Поэтому едва ли можно надеяться на успех предпринимаемых некоторыми авторами попыток свести вероятностное содержание современной физики элементарных частиц к каким-то более глубоким лапласовски детерминированным законам (к так называемым «динамическим законам», по терминологии Я. П. Терлецкого). Так, совершенно необоснованными представляются следующие утверждения Я. П. Терлецкого: «Характеризуя элементарные физические законы, мы прежде всего можем утверждать, что они являются законами динамического типа. Действительно, элементарные законы, по самой своей сути, должны отражать все движение полностью и не могут содержать в себе неизвестных, случайных элементов, так как введение последних означает допущение других, неизвестных, еще более элементарных законов,

² Тенденция к рассмотрению физических объектов все большей информативной емкости подчеркивается также И. Акчуриным [5].

управляющих этими элементами (если не становиться на точку зрения нематериальности этих элементов)... Оставляя примат за динамическими законами, мы допускаем, что за всяким последним, известным нам законом, имеющим статистический характер, скрывается более элементарный закон динамического характера» [6, стр. 20]. Эти утверждения являются всего лишь произвольной декларацией.

Конечно, почти никогда нельзя «математически строго» доказать бесперспективность какого-либо направления. Однако в науке засчитывается лишь то, что позволяет предсказывать новое. И не случайно поиски «элементарных динамических законов» до сих пор не дали ни одного, буквально ни одного, предсказания, которое было бы подтверждено экспериментом и в то же время не содержалось бы в общепринятой квантовой теории.

Существенно подчеркнуть, что структура элементарных частиц имеет сугубо статистический, вероятностный характер.

4

Непрерывное увеличение информационной емкости образов, сопоставляемых элементарным физическим объектам, многогранность и сложность процессов, в которых они участвуют, оставляют довольно мало надежд на то, что физику пионов, нуклонов и странных частиц удастся сформулировать — во всяком случае, в ближайшие годы — в виде какой-то единой замкнутой системы уравнений, подобной, например, системе уравнений Максвелла или уравнениям Ньютона. Все чаще высказывается мнение, что такое решение вопроса, по-видимому, является недостижимым идеалом.

Сейчас все большее значение приобретают ограниченные подходы, в рамках которых создаются более или менее адекватные математические описания отдельных сторон сложных физических явлений. Примером может служить, в частности, полюсная теория структуры нуклона или $SU(3)$ - и $SU(6)$ -симметричные теории расщепления масс и форм-факторов элементарных частиц. Развитие физики элементарных частиц и в особенности изучение явлений, связанных с их внутренним строением, идет сейчас в основном именно по такому пути. И если раньше фи-

зическое явление считалось понятым, когда удавалось составить уравнения, которые описывали и позволяли предсказывать это явление, то теперь понять явление все чаще означает уметь построить достаточно точную, в общем случае вероятностную модель этого явления, которая, как и уравнения, давала бы возможность предсказывать его изменения в зависимости от изменения окружающей обстановки; уравнения при этом остаются лишь для описания отдельных деталей рассматриваемого явления³.

Типичным в этом отношении является применение метода Монте-Карло — метода статистических испытаний, воспроизводящего реальный процесс выбора между возможными путями развития явления, подобно тому как это каждый раз происходит в природе. Метод Монте-Карло непосредственно моделирует ход реальных процессов и по сравнению с другими известными нам сейчас методами расчета наиболее адекватно отражает то, что действительно реализуется в природе. Достаточно детально разработать модельный монте-карловский алгоритм — это и означает в данном случае создать достаточно точную теорию явления. Следует ожидать, что ввиду его большой общности такой подход станет в дальнейшем одним из основных методов теоретического изучения окружающего нас мира и в значительной степени определит вид будущей физической теории.

Все более широкое применение метода моделей является еще одной важной тенденцией в развитии физики элементарных частиц. Особенно ярко эта тенденция проявляется при изучении структуры частиц. Подобно теории атомного ядра, этот раздел физики представляет сейчас набор различных, частично перекрывающихся друг с другом моделей, каждая из которых отражает, в основном, лишь какой-либо один аспект явления. Более того, для описания структуры элементарных частиц в

³ Поэтому слишком категоричным представляется утверждение Я. П. Терлецкого о том, что «математический аппарат теории, отображающий законы движений,— речь идет об элементарных законах,— можно представлять себе в виде дифференциальных, интегральных, функциональных или каких-либо других уравнений... Общее решение уравнения дает все возможные виды движения, конкретное же движение отбирается из всех возможных начальными и граничными условиями» [6, стр. 26]. Это — всего лишь одна из возможностей, и, по-видимому, далеко не самая вероятная.

последнее время все чаще стали привлекаться нерелятивистские квантовомеханические модели, оправдавшие себя при рассмотрении атомного ядра (см. ниже).

5

Как уже отмечалось выше, описание структуры элементарных частиц на языке экспериментальных форм-факторов встречает существенные трудности при попытках перехода на привычный нам пространственно-временной язык. Однако трудности возникают и в том случае, если остаться в рамках форм-факторного описания, но попытаться сделать хотя бы небольшое уточнение теории, так как это сразу же приводит к резкому увеличению числа необходимых форм-факторов. Так, например, при учете следующего, двухфотонного, приближения к сечению рассеяния электрона на протоне, из анализа которого сейчас в основном и определяются значения форм-факторов протона, число таких различных форм-факторов возрастает до двух десятков. Определить из опыта и оперировать с таким большим числом величин становится практически почти невозможно, тем более что различным процессам взаимодействия присущи свои специфические форм-факторы. Все это приводит к необходимости найти какой-то иной, более удобный способ описания структуры элементарных частиц.

Из формулы (1) видно, что распределение плотности некоторой величины ξ , характеризующей структуру частицы, вполне однозначно определяется заданием ее функционала $|\psi\rangle$. Поэтому задачу пространственно-временного описания внутреннего строения элементарной частицы можно заменить задачей определения ее функционала. Такой функционал можно рассматривать как сумму слагаемых, одно из которых описывает «голый остов» частицы, а другие определяют вклады отдельных компонент облака виртуальных частиц, существующего вокруг этого «остова». Например, для нуклона

$$|N\rangle = \varphi_N \cdot |N_0\rangle + \varphi_{N\pi} \cdot |N_0\pi\rangle + \varphi_{N\rho} \cdot |N_0\rho\rangle + \\ + \dots + \varphi_{\Lambda K\pi} \cdot |\Lambda_0 K\pi\rangle + \dots,$$

где φ_N — амплитуда «голового» нуклона, $\varphi_{N\pi}$ — амплитуда состояния, когда вокруг «голового» нуклона имеется

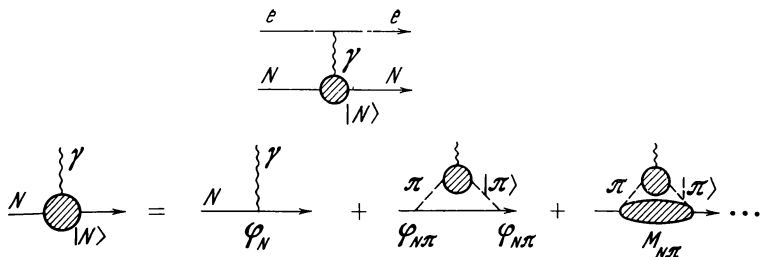


Рис. 2

Диаграмма, описывающая упругое рассеяние электрона в нуклоне. Верхняя вершина относится к взаимодействию γ -кванта с точечным электроном. Нижняя вершина зависит не только от структуры нуклона, но также и от структуры π -мезона, амплитуды упругого рассеяния виртуального π -мезона на нуклоне и т. д.

облако, образованное одним виртуальным π -мезоном, и т. д. Можно надеяться, что для описания не слишком глубоких слоев структуры потребуется сравнительно небольшое число амплитуд φ_n .

Так как амплитуды φ_n входят в выражения различных наблюдаемых величин — в теоретические выражения для магнитных моментов частиц, в сечении различных процессов и т. д., — то эти амплитуды, в принципе, можно было бы определить из непосредственного сравнения теоретических формул с опытом, подобно тому как это сейчас делается для форм-факторов $F(q)$. К сожалению, в общем случае такая программа является слишком сложной, так как при этом оказывается необходимым одновременно учитывать функционалы сразу нескольких частиц и амплитуды некоторых процессов рассеяния. Это видно, например, из диаграммы упругого e — N рассеяния, приведенной на рис. 2.

На современном этапе более оправданным и результативным подходом к определению функционалов элементарных частиц является построение различных моделей, параметры которых подбираются на основе каких-либо приближенных теоретических соображений или путем непосредственного сравнения с опытом. Впервые такой подход был подробно рассмотрен, по-видимому, Р. Саксом [7] и в последующем развивался рядом других авторов (см., например, [8]). Однако значительные успехи здесь были достигнуты лишь в последние годы в

рамках так называемой резонансной полюсной модели нуклона, основанной на предположении, что основной вклад в структуру дают двух- и трехмезонные состояния, которые приближенно можно заменить одночастичными состояниями с резононами η , ω , ρ , ϕ и т. д. (рис. 3). Так как массы этих резонансов известны из других опытов, то неизвестными параметрами в этом случае являются лишь постоянные связи резонансов с нуклоном f_n , а также мезонмезонные постоянные M_ρ и M_n . Подбирая соответствующим образом значения этих величин, удастся удовлетворительно описать все известные в настоящее время экспериментальные данные по электромагнитной структуре протона и нейтрона⁴.

После того как определены все параметры, в рамках резонансной модели могут быть рассчитаны амплитуды f_n и, следовательно, пространственные плотности распределений электрического заряда и магнитного момента в нуклоне $\rho(x)$.

Можно построить более детальную модель, если принять во внимание ширину мезонных резонансов и учесть зависимость нуклон-резонансных вертексов от величины передаваемого импульса ($f_n = f_n(q)$). Однако на уровне современных экспериментальных точностей такая детализация не дает пока ничего нового.

Резонансная полюсная модель представляет собой в настоящее время наиболее результативный и наиболее пригодный для конкретных численных расчетов подход к рассмотрению структуры нуклона.

Теоретиками сейчас интенсивно обсуждаются также различные модели «бутстрапа» (шнуровки), в основу которых положено допущение о том, что каждая элементарная частица состоит из всех других частиц, или, более точно, структура каждой элементарной частицы определяется взаимодействиями всех других частиц. Так, например, нуклон содержит внутри себя мезоны π , ρ , K и т. д., которые в свою очередь содержат пары $N + \bar{N}$, $N + \bar{\Lambda}$ и т. д. Пока остается неясным, можно ли на основе этой идеи написать точную замкнутую систему уравне-

⁴ Для более точного согласования с опытом сейчас вводят дополнительный параметр, соответствующий полюсному описанию электромагнитной структуры самого резонанса. Если этого не делать, то хорошее согласие с опытом достигается лишь при условии, что для ρ -мезона выбирается масса, несколько меньшая его экспериментальной.

ний, которая имела бы решение, определяющее различные свойства, в том числе и структуру, всех элементарных частиц. Сейчас рассматриваются лишь очень грубые модели, учитывающие взаимосвязь всего только двух-трех сортов частиц, поэтому о количественном согласии с экспериментом говорить еще слишком рано, хотя в качественном отношении в ряде случаев получены весьма обнадеживающие результаты.

В связи со значительными успехами унитарной систематики элементарных частиц в последнее время большое внимание уделяется изучению моделей, в которых элементарные частицы рассматриваются составленными из кварков, барионы — из трех кварков, мезоны — из кварка и антикварка.

При чисто групповом подходе утверждение, что та или иная частица «состоит из кварков», имеет лишь тот смысл, что волновая функция этой частицы преобразуется как произведение нескольких простейших унитарных спиноров; кварковая структура частиц в этом случае имеет лишь символический смысл, независимо от того, существуют в природе кварки как реальные физические частицы или же нет.

Наряду с этим рассматриваются модели, в которых элементарные частицы представляются как связанные состояния реально существующих кварков. Такой подход приобретает особую простоту и наглядность, если допустить, что, несмотря на то, что дефект масс системы нескольких связанных кварков очень велик, намного больше масс образованных из них пиона или нуклона, сами кварки можно рассматривать как нерелятивистские частицы в некоторой потенциальной яме. Это допущение является следствием предположения о том, что силы, действующие между кварками, обусловлены обменом мезонами, комптоновская длина которых и определяет радиус потенциальной ямы $R = \hbar/mc$ (если обмен осуществляется π -мезонами, то $R \approx 1,4 \cdot 10^{-13}$ см, если же за обменные силы ответственны главным образом ρ -мезоны, то $R \approx 0,25 \cdot 10^{-13}$ см, т. е. порядка размеров нуклонного ядра). В соответствии с соотношением неопределенностей импульс кварка в такой яме порядка массы промежуточного мезона m : $p \sim \hbar/R = mc$, что намного меньше массы кварка M , составляющей по теоретическим оценкам что-то около десятка $\Gamma\text{эв}$; поэтому релятивистскими эффек-

тами движения кварков в потенциальной яме можно пренебречь.

Глубина потенциальной ямы подбирается таким образом, чтобы низший энергетический уровень был равен массе пиона или нуклона. Возбужденные уровни сопоставляются мезонным и барионным резонансам. Соответствующие пространственные распределения $\rho(x)$ могут быть вычислены с помощью стандартных методов.

Для анализа кварковой структуры частиц сейчас широко применяются модели, разработанные ранее для описания структуры атомного ядра. Это обстоятельство является весьма характерной особенностью современного этапа исследования внутреннего строения элементарных частиц.

Следует ожидать, что изучение составных моделей элементарных частиц, основанных на гипотезе кварков, будет, по-видимому, одним из основных теоретических направлений в ближайшие годы.

6

Если гипотеза о существовании кварков подтвердится на опыте, то это приведет к радикальному изменению самого подхода ко всей физике элементарных частиц. В этом случае именно кварки, а не нуклоны, мезоны или какие-либо другие частицы будут рассматриваться как элементарные физические объекты, так как из частиц с дробными значениями квантовых чисел можно составить все другие известные нам сейчас частицы, кварки же из этих частиц построить принципиально невозможно.

Законы взаимодействий кварков должны иметь более простой и фундаментальный вид, чем законы, описывающие взаимодействия более сложных систем — мезонов и барионов. Если кварки, как это часто предполагается сейчас, взаимодействуют между собой сильнее, чем другие частицы, то законы взаимодействий нуклонов, мезонов и других известных нам частиц будут так же связаны с законами взаимодействий кварков, как, например, законы взаимодействий целых атомов и молекул связаны с более элементарными законами взаимодействий протонов и электронов. Если же кварки взаимодействуют приблизительно так же, как мезоны и барионы, то

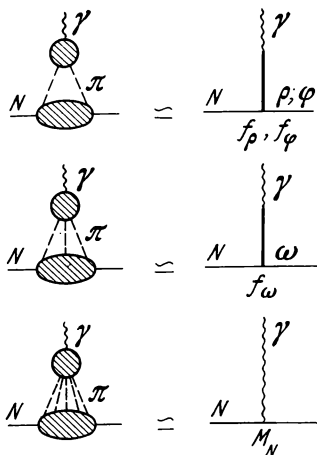


Рис. 3

Аппроксимация резонансами многомезонных состояний в оболочке нуклона. Предполагается, что состояния с очень большим числом мезонов и состояния с парами тяжелых частиц реализуются глубоко в центре нуклона; при рассмотрении периферических областей их вклад можно аппроксимировать постоянным форм-фактором $F(q) M_N = \text{const}$ (вообще говоря, различным для протона и нейтрона: $M_p \neq M_n$); f_n — соответствующие эффективные постоянные взаимодействия с нуклоном

взаимодействия последних между собой снова будут более сложными, чем взаимодействия самих кварков, подобно тому как взаимодействия атомных ядер являются следующей ступенью по отношению к взаимодействию составляющих их нуклонов. В обоих случаях экспериментальное и теоретическое исследование взаимодействий кварков явится несравненно более фундаментальной задачей, чем анализ взаимодействий других сортов частиц; кварки будут представлять собой следующий, более глубокий уровень материи (в частности, роль «атома электричества» в этом случае будет играть уже не заряд электрона e , а заряд кварка $e/3$; заряды всех других частиц будут выражаться как *целые*, кратные e . То же можно сказать и о других квантовых числах).

Возможно, что именно такой «неэлементарностью» взаимодействий известных нам сейчас частиц и обусловлены наши затруднения на пути построения теории сильных взаимодействий.

Конечно, нельзя ожидать, что взаимодействия кварков будут «более классическими», чем взаимодействия других частиц; как это следует из всей совокупности экспериментальных данных, квантовый аспект явлений становится все более и более существенным по мере того, как мы углубляемся в недра вещества. Для описания структуры «сложных частиц» — нуклонов и мезонов — по-прежнему важное значение будут иметь приближенные мо-

дельные подходы. Их роль не уменьшится, а, наоборот, возрастет: упрощение законов будет достигнуто лишь на самом нижнем уровне — уровне кварковых явлений. В дальнейшем и эти явления окажутся слишком сложными и потребуют модельных подходов и т. д. — свойства материи неисчерпаемы. В частности, уже сейчас можно ожидать, что кварки, если они существуют, должны обладать сложной внутренней структурой. Если их взаимодействие — «сверхсильное», то эта структура будет обусловлена кварковыми взаимодействиями; если же кварки взаимодействуют «просто сильно», то в их структуру будут входить мезоны и барионы.

7

Как видно, хотя наши знания структуры элементарных частиц за последние годы и продвинулись далеко вперед, они, тем не менее, по-прежнему представляют собой пеструю мозаику различных фактов, идей и предположений, еще далекую от того, чтобы сложиться в какую-то целостную картину. Теперь, после того, как было изучено большое количество моделей бутстрапа и различных вариантов релятивистских обобщений $SU(3)$ - и $SU(6)$ -симметрий, мы только начинаем по-настоящему осознавать, какие огромные трудности предстоит нам преодолеть на пути построения такой картины. Несомненно, что на этом пути нам еще не раз придется переосмыслить и существенно модернизировать многие физические и философские положения, кажущиеся сейчас совершенно незбылемыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Барашенков. — «Вопросы философии», 1965, № 9.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля. М., 1948.
3. V. S. Barashenkov. — «Fortschritte d. Phys.», **10**, 205, 1962.
4. Подробнее см.: V. S. Barashenkov a. o. — «Fortschritte d. Phys.», **14**, 1, 1966.
5. См. «Вопросы философии», 1966, № 10.
6. Я. П. Терлецкий. Динамические и статистические законы физики. М., 1950.
7. R. Sachs. — «Phys. Rev.», **87**, 1100, 1952
8. I. Umemura. — «Prog. Theor. Phys.», **28**, 113, 1962.

**КАТЕГОРИИ СИММЕТРИИ И АСИММЕТРИИ
И ФИЗИКА МИКРОМИРА**

Понятие симметрии прошло длительный путь становления в науке. В обыденной жизни слово симметрия употребляется в двух значениях: а) симметричное — это нечто пропорциональное, сбалансированное, способ согласования многих частей, с помощью которого они объединяются в целое; б) симметрия — равновесие [1, стр. 37]. Предмет симметричен, если его можно подвергнуть какой-либо операции, после которой он будет выглядеть, как и в начале.

В науке, в частности в физике, понятие симметрии связано с понятиями порядка и беспорядка, покоя и движения, однородности и неоднородности, изотропности и анизотропности, равномерности и неравномерности, сохранения и изменения и т. д. В современной физике речь идет больше о симметрии ее законов, чем о симметрии предметов.

Р. Фейнман считает, что существует «ритм и повторяющиеся структуры в явлениях природы, которые не видны при простом наблюдении, но открываются лишь анализом. И это те ритмы и структуры, которые мы называем физическими законами... В основе всех законов физики лежат принципы симметрии, тесно связанные с наличием в изменении сохраняющихся моментов» [2, стр. 13]. Он также считает, что ритм и повторяющиеся структуры связаны с существованием в природе тождественного.

Анализ существующих определений симметрии показывает, что основой их является понятие равенства, которое также претерпело изменения в направлении расширения своего объема. Наиболее общее математическое понятие равенства связано с взаимнооднозначным соответствием множеств, т. е. с теоретико-множественной эквивалентностью.

Основной математический аппарат принципа симметрии — теория групп. Именно полная совокупность неэквивалентных между собой операций симметрии образует группу. Как известно, неэквивалентные операции назы-

ваются элементами симметрии. Какие бы объекты, процессы, тенденции ни были подвергнуты рассмотрению, мы не найдем таких, у которых не было бы хотя бы одного элемента симметрии, а это значит, что всегда, сравнивая два объекта, процесса, тенденции, мы найдем, что в чем-то они тождественны.

Анализ данных естествознания, математики, архитектуры, искусства и других областей человеческого познания и практической деятельности показывает, что абсолютной, «чистой» симметрии в объективной действительности нет. Абстрактная симметрия — это идеализированное отражение действительности.

В науке, наряду с симметрией, пользуются понятиями асимметрии, диссимметрии и антисимметрии.

Авторы данной работы сделали попытку обобщить указанные понятия частных наук и предложили философские, т. е. предельно общие, определения симметрии и ее антипода — асимметрии.

Непосредственной логической основой для определения понятий симметрии и асимметрии, на наш взгляд, является диалектический характер отношений между тождеством и различием, их взаимодействие, включение различия в тождество, а тождества в различие. Основываясь на этой характеристике диалектики соотношения между тождеством и различием, а также проанализировав содержание существующих понятий, можно предложить следующие определения симметрии и асимметрии как научных категорий познания.

Симметрия — это категория, обозначающая процесс существования и становления тождественных моментов в определенных условиях и в определенных отношениях между различными и противоположными состояниями явлений мира.

Асимметрия — это категория, обозначающая существование и становление в определенных условиях и отношениях различий и противоположностей внутри единства, тождества, целостности явлений действительности.

Во всех реальных явлениях симметрия и асимметрия сочетаются друг с другом. Это находит отражение и в понятиях науки. Так, в группах преобразований Галилея и Лоренца симметричны все состояния покоя и равномерного прямолинейного движения, но асимметричны состояния покоя и ускоренного движения. И все же в естество-

знании еще существует односторонний подход к симметрии и асимметрии, когда они рассматриваются вне диалектической связи друг с другом. Даже как первый, и ограниченный, подход к отображению в науке явлений природы он уже не может удовлетворить растущие запросы естествознания, особенно физики микромира, где наиболее ярко проявляется объективная диалектика, и мы думаем, что с помощью установления связи симметрии и асимметрии можно будет успешнее решать очередные задачи современной физики.

Задача нахождения единства симметрии и асимметрии в каких-то явлениях сводится к нахождению таких групп операций, в которых раскрывается как тождество в различном, так и различное в тождественном. Прежде чем была установлена симметрия протонов и нейтронов по отношению к сильным взаимодействиям, было установлено различие между ними, их определенная асимметричность по отношению к электромагнитным взаимодействиям. Частицы и античастицы асимметричны потому, что в противоположности между ними имеются тождественные моменты, в силу чего они и являются зеркальными отражениями друг друга. Так что единство симметрии и асимметрии заключается и в том, что они предшествуют одна другой, что наиболее ярко проявляется в развитии нашего познания. Уже непосредственно из определений симметрии и асимметрии видно, что они основаны на таких всеобщих категориях, как тождество, различие, изменение, становление, т. е. на категориях, имеющих бесспорно всеобщее значение. В свою очередь категории симметрии и асимметрии имеют существенное значение для характеристики других всеобщих категорий нашего познания, например такой категории, как закон.

Каждый закон науки выражает какую-то однородность, тождественность, присущую различным явлениям и их взаимодействиям, а тождественное, идентичное в различном и противоположном и есть симметрия. Но не менее важно применение к категории закона и категории асимметрии. Законы действительности в своем содержании, а также в своих связях друг с другом и условиями своего действия имеют не только те или иные формы симметрии, но и асимметрии.

Так, законы механики Ньютона асимметричны по отношению к группе преобразований Лоренца. Закон воз-

растания энтропии явно асимметричен по отношению к переходам различных видов энергии друг в друга и устанавливает, как известно, преимущественную тенденцию превращения всех видов энергии в тепловую. Асимметрия — столь же существенный момент законов, как и симметрия. «Не будет большим преувеличением сказать,— пишет Я. А. Смородинский,— что наиболее интересные результаты достигались в физике именно тогда, когда выяснялись законы нарушения симметрии [3, стр. 3].

Наличие асимметрии в содержании законов не уничтожает в их содержании и существования симметрии; она, как и симметрия, является основой связи между законами. Действительно, например явная асимметричность содержания закона возрастания энтропии служит основой, на которой раскрываются связи этого закона с законом сохранения и превращения энергии, что выражается через существование таких физических величин, как термодинамические потенциалы. Известно, что законы сохранения энергии и импульса содержат в себе взаимную асимметрию: энергия — скаляр, импульс — вектор, но между ними существует глубокая связь, раскрытая релятивистской теорией. Связь между законами основывается как на существовании в их содержании симметрии, так и асимметрии, которая, очевидно, выражает более глубокие стороны этой связи.

Из всех законов физики наиболее существенное значение для ее развития имеют законы сохранения [4] и их связь с симметрией и асимметрией. Но прежде всего надо систематизировать многообразие симметрий и асимметрий.

В настоящее время можно дать следующую классификацию различных видов симметрии и асимметрии, встречающихся в физике.

В физике общепринято выделять две следующие формы симметрии и асимметрии: геометрическую и динамическую. К ним Е. Вигнер добавляет в качестве третьей формы еще симметрию перекрестных отношений (крос-симметрию) [5, стр. 727—737]. Здесь оговоримся, что в физике классифицируют только виды симметрии, а виды асимметрии оставляют в стороне. Как будет показано ниже, классификация видов симметрии является классификацией и видов асимметрии.

Симметрии, выражающие свойства пространства и времени, относят к геометрической форме симметрии. Примерами геометрических симметрий являются: однородность пространства и времени, изотропность пространства, пространственная четность, эквивалентность инерциальных систем отсчета.

Симметрии, непосредственно не связанные со свойствами пространства и времени и выражающие свойства физических взаимодействий, относят к динамической форме симметрии. Примерами динамических симметрий являются симметрии электрического заряда, спина, изотопического спина, странности и т. д.

Вообще говоря, к динамическим симметриям относят симметрии внутренних свойств объектов и процессов. Так что геометрические и динамические симметрии можно рассматривать как внешние и внутренние симметрии.

Уже было сказано, что формы симметрии одновременно являются и формами асимметрии. Действительно, все известные виды асимметрии можно отнести или к геометрическим, или к динамическим асимметриям. Асимметрии свойств пространства и времени относятся к геометрическим, а асимметрии свойств взаимодействия, причинности и развития — к динамическим.

Такие асимметрии, например, как неоднородность пространства и времени и анизотропность пространства,— геометрические асимметрии, а различие между протонами и нейтронами в электромагнитных взаимодействиях, различия между частицами и античастицами по электрическому, барионному, лептонному зарядам и т. д.— динамические асимметрии.

Вместе с вопросом о существовании геометрических и динамических форм симметрии и асимметрии стоит вопрос о взаимной связи и обусловленности этих форм. Причем последний вопрос является одним из центральных вопросов современной теоретической физики. На наш взгляд, как нераздельны друг от друга симметрия и асимметрия, так нераздельны и указанные их формы. В общем плане взаимосвязь этих форм вытекает из единства таких атрибутов материи, как пространство, время и движение. Жесткое противопоставление этих форм принципиально недопустимо.

В самом деле, рассматривая, например, такую «типичную» геометрическую симметрию, как однородность про-

странства, можно заметить, что в ее определении в скрытом виде содержатся динамические характеристики. Ведь суть этой симметрии в том, что в пространственных перемещениях при определенных физических условиях, при слабых, например, полях тяготения поведение тел не зависит от занимаемого ими места в пространстве, что и выражается в независимости присущего им импульса от их пребывания в тех или других точках пространства. Без учета единства пространства и движения материи говорить о каких-либо свойствах симметрии или асимметрии пространства просто бессмысленно. В абсолютно пустом пространстве нет ни однородности, ни разнородности. В нем вообще ничего нет, и о нем ничего сказать нельзя. Ни одну геометрическую симметрию нельзя определить без привлечения, прямого или опосредованного, динамических параметров. Даже определение такой простой геометрической симметрии, как симметрия двух точек по отношению к какой-то прямой, включает в себя возможность их совмещения, т. е. определенного движения. Без движения и вне движения не существует ни одной геометрической симметрии.

В свою очередь динамические симметрии связаны со свойствами пространства и времени, что выражается через возможность их геометрической интерпретации. Например, такая динамическая симметрия, как симметрия изотопического спина, геометрически интерпретируется при помощи такого пространства представлений, как пространство изотопического спина, в котором поворот на 180° , независимо от направления поворота, превращает протон в нейтрон, а нейтрон в протон. Возможность такой интерпретации симметрии изотопического спина, т. е. тождественности протонов и нейтронов по отношению к сильным взаимодействиям, позволяет предполагать, что эта симметрия связана с определенными пространственными формами. В области сильных взаимодействий пространство выступает с рядом специфических свойств, которые отражены в понятии пространства изотопического спина. К сказанному можно добавить, что такие, например, симметрии, как симметрии пространства — времени Римана (геометрические симметрии), видимо, имеют динамическую основу, что позволяет некоторым физикам (Е. Вигнер) считать их динамическими симметриями [5, стр. 727—737]. Так, оказывается возможным даже

симметрии, относящиеся к пространству и времени, рассматривать как динамические симметрии.

Таким образом, любая геометрическая симметрия связана с движением и взаимодействием материальных объектов, а любая динамическая симметрия — со свойствами пространства и времени.

Очевидно, что неразрывная связь существует и между геометрическими и динамическими формами асимметрии. Эту связь можно показать на таком примере: асимметричность пространства — времени Римана есть следствие наличия сильных полей тяготения или, равноправно, больших масс материи.

Основой взаимосвязи геометрических и динамических форм асимметрии, так же как и симметрии, является единство пространства, времени и движения материи.

Признавая единство симметрии и асимметрии и их геометрических и динамических форм, необходимо вопрос о взаимоотношении законов сохранения и симметрии ставить значительно шире, чем он обычно ставится. Но, прежде чем изложить наиболее широкую постановку этого вопроса на основе единства симметрии и асимметрии и их геометрической и динамической форм, рассмотрим вопрос о соотношении понятия инвариантности и сохранения физических величин. Очень часто эти понятия отождествляются, к тому же без достаточных оснований. Напомним, что под инвариантностью понимают свойство неизменности физических величин по отношению к некоторой совокупности изменений физических условий. Под сохранением же физических величин понимают их превращения, эквивалентные в количественных отношениях. Сохраняющиеся величины имеют моменты инвариантности, но, как видно, не сводятся к ним. Говоря о сохраняющихся величинах в физике, важно иметь в виду, что они не существуют вне процессов превращения и взаимодействия физических объектов.

Понятия инвариантности и сохранения — родственные, но не идентичные. Каждой сохраняющейся величине соответствует определенный закон сохранения, чего не скажешь о величинах инвариантных. Инвариантными по отношению к преобразованиям Лоренца являются, например, следующие величины: объем покоящегося тела, масса покоя, постоянная Больцмана, энтропия, отношение энергии к частоте для цуга волн, движущегося со

скоростью света. Ни одной из этих инвариантных величин не соответствует закон сохранения.

Более того, такая инвариантная величина, как масса покоя, есть несохраняющаяся величина. Сохраняется, как известно, общая масса, но не масса покоя.

Из сказанного следует, что содержание принципов инвариантности и содержание законов сохранения полностью не совпадают.

Далее отметим, что нельзя устанавливать однозначную связь между определенными видами симметрии и определенными законами сохранения. Так, нельзя закон сохранения энергии однозначно связывать с такой симметрией, как однородность времени, а закон сохранения импульса — с однородностью пространства. Существенная связь между названными симметриями и законами сохранения, конечно, есть, но ее нельзя считать однозначной и жесткой в том смысле, что данные симметрии определяют все содержание данных законов сохранения. В содержание каждого закона сохранения входит та или иная симметрия, но, помимо симметрии, в его содержание входит и определенная асимметрия. В закон сохранения и превращения энергии, по крайней мере в условиях известной нам области мира, входит асимметрия прямых и опосредованных способов превращения энергии, которая заключается в том, что опосредованные способы превращений через теплоту преобладают над прямыми способами превращения любой формы энергии в любую другую ее форму.

Закон сохранения импульса в форме классической механики асимметричен по отношению к преобразованиям Лоренца. Асимметричность, присущая этому закону, выражается и в том, что при учете конечной скорости передачи взаимодействия равенство действия и противодействия нарушается. Глубокое изучение законов сохранения требует раскрытия в их содержании как моментов симметрии, так и асимметрии. Уже из сказанного следует, что попытки вывести законы сохранения только из определенных форм симметрии (закон сохранения энергии — из однородности времени, закон сохранения импульса — из однородности пространства) возможны только при условии односторонней трактовки этих законов, поэтому они не могут быть вполне корректными.

Известная теорема Э. Нетер, собственно говоря, не выводит, например, закон сохранения энергии из однородности времени, а раскрывает связь некоторых его форм с данной формой симметрии времени, что, конечно, имеет большое значение.

В принципе же выведение всех сторон законов сохранения из форм симметрии, в особенности только из геометрических, невозможно. Законы сохранения связаны не только с геометрическими симметриями, но и с динамическими. Эта связь, например, ясно выступает в законе сохранения полного момента импульса электронов в атомах, относящегося к их спиновым и спин-орбитальным взаимодействиям. В последних, как известно, внутренние степени свободы электронов, а значит, и динамические симметрии связаны с их движением в пространстве, а следовательно, и с геометрическими симметриями.

Надо думать, что любой закон сохранения имеет глубокую связь с определенными геометрическими и динамическими симметриями и асимметриями. Однако эту связь нельзя раздувать и сводить все содержание законов сохранения к определенным видам симметрии и асимметрии. Законам сохранения можно сопоставить не только определенные виды симметрии и асимметрии, но и определенные поля и их связи. Правда, этот путь изучения законов сохранения еще не получил широкого применения, но попытки идти по этому пути уже существуют, например, в теории компенсирующих полей [6, стр. 58].

В этой теории с законом сохранения заряда — тока сопоставляется векторное электромагнитное поле. Соответствующие векторные поля сопоставляются с законами сохранения изотопического спина, барионного числа, странности и т. д. Идея этого сопоставления заключается в раскрытии внутренних связей определенных законов сохранения со структурой определенных полей. А так как все поля взаимосвязаны, то должны быть взаимосвязаны и законы сохранения. Интересные мысли о взаимосвязи таких законов сохранения, как закон сохранения энергии и закон сохранения барионного числа, высказывает Дж. Сакураи. Причем он выполнение одного из этих законов ставит в зависимость от выполнения другого. Но какой бы характер ни имели связи между законами сохранения, очевидно, раскрытие этих

связей приведет к более глубокому знанию как содержания, так и форм проявления этих законов.

Для изучения связи между законами сохранения большое значение, конечно, имеет изучение связи между различными типами взаимодействия, в частности такого вида этой связи, как проявление в определенных условиях внутри взаимодействия одного типа взаимодействия другого типа.

В настоящее время известно, что в электромагнитных взаимодействиях на расстояниях в 10^{-15} см существенную роль начинает играть пионный вакуум, т. е. начинают проявляться характерные черты сильных взаимодействий. Видимо, проявление одних типов взаимодействия в других типах взаимодействия является общей закономерностью микромира. Изучение взаимопроникновения различных типов взаимодействия во многом будет способствовать изучению взаимосвязей между законами сохранения. Так, изучение взаимосвязи сильных и электромагнитных взаимодействий даст, видимо, возможность раскрыть некоторые связи между законами сохранения электрического заряда и барионного числа. Большие возможности в плане раскрытия взаимосвязей законов сохранения содержат необходимые сейчас соотношения между такими сохраняющимися величинами, как электрический заряд, изотопический спин и гиперзаряд. Изучение взаимосвязей законов сохранения, естественно, наталкивает на более общий вопрос: не имеют ли законы сохранения какую-то общую основу? Не существует ли такой принцип, из которого можно было бы вывести все ныне известные законы сохранения?

Необходимость изучения законов сохранения в свете каких-то общих принципов ни у кого в настоящее время сомнений не вызывает. Иначе говоря, существует задача наряду с опытным дать и теоретическое обоснование законов сохранения. Эта задача отнюдь не сводится к нахождению такого общего принципа, из которого можно было бы математически вывести законы сохранения. Математическое выведение из какого-то общего принципа законов сохранения ограничено по своим возможностям, оно может сделать явным только то, что в скрытом виде существует в данном принципе. Но все многообразные стороны всех законов сохранения жестко связать с каким-то одним физическим принципом вряд ли возможно.

Попытки вывести все законы сохранения из соответствующих геометрических симметрий ныне оставлены, так как оказалось, что большая группа законов сохранения (барионного числа, лептонного числа, странности и др.) прямой связи с геометрическими симметриями не имеет. Но и для тех законов сохранения, которые прямо связаны с геометрическими симметриями (законы сохранения энергии, импульса и т. д.), вывод всех их сторон из данных симметрий также оказывается невозможным. Из такой, например, геометрической симметрии, как однородность пространства, можно вывести только одну сторону закона сохранения импульса, а именно, что импульс тела не зависит от места, занимаемого телом в пространстве. Другие же стороны этого закона, как-то: взаимосвязь механического и электромагнитного импульса, взаимосвязь импульса с энергией и т. д.— из данной геометрической симметрии не выводятся. Сам принцип симметрии нуждается в теоретическом обосновании. «Задача динамического обоснования симметрии, безусловно, одна из наиболее важных задач, выдвинутых развитием физики элементарных частиц» [7, стр. 557].

Также нельзя вывести все стороны законов сохранения, связанных с динамическими симметриями, из данных симметрий. В этом случае даже инвариантность сохраняющихся величин получается только приближенно.

Таким образом, признавая огромное значение данного аспекта в анализе и теоретическом обосновании законов сохранения, все же нужно отметить его ограниченность.

Между симметрией, асимметрией и законами сохранения бесспорно имеется существенная связь, но ее нельзя настолько раздувать, чтобы все содержание законов сохранения сводить к формам симметрии и асимметрии. Задача теоретического обоснования законов сохранения не только в том, чтобы раскрыть их связи с формами симметрии и асимметрии, но и в том, чтобы раскрыть их связи друг с другом, со структурой полей, с такими всеобщими законами, как закон сохранения материи и движения и закон единства атрибутов материи. И в этом плане задача математического вывода тех или иных сторон законов сохранения из форм симметрии, структуры полей и т. д. есть лишь один, но очень важный аспект теоретического обоснования законов сохранения.

Огромный фактический материал, которым располагает современная наука, позволяет провести достаточно широкое философское обобщение, отразить в философских понятиях тенденции симметрии и асимметрии, имеющие место в объективной действительности.

Категории познания являются всеобщими тогда, когда они отражают атрибуты материи и их взаимосвязи. Категории симметрии и асимметрии, на наш взгляд, удовлетворяют этим требованиям, и поэтому так велика их роль в современной физике.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H. Weyl. Symmetry.* N. Y., 1952.
2. *R. Feynman. The character of physical Law.* London, 1965.
3. «УФН», т. 84, вып. 1, 1964.
4. См. *Н. Ф. Овчинников. Принципы сохранения.* М., 1966.
5. «УФН», т. 85, вып. 4, 1965.
6. «Элементарные частицы и компенсирующие поля». М., 1964.
7. «Основные направления исследований в физике элементарных частиц» — «УФН», т. 85, вып. 3, 1965.

И. Т. Тодоров

О ГРУППОВОМ ПОДХОДЕ В ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1

Применение групп в теории элементарных частиц стало модой после того, как зимой 1964 г. был обнаружен Ω -гиперон с такой же массой и с такими же свойствами, какие предсказал Гелл-Манн в 1962 г. на основе предположения о «приближенной симметрии» $SU(3)$. Первые систематические упоминания о теории представлений групп в физике тоже относятся к не очень далекому прошлому, а именно к концу двадцатых и к началу тридцатых годов, когда Герман Вейль и Ван дер Варден показали, что созданная незадолго до этого квантовая механика очень естественно формулируется в терминах теории представлений.

Между тем, принципы симметрии, или, что то же самое, инвариантность законов природы относительно некоторой группы преобразований, по сути дела присутствовали в физике намного раньше, задолго до появления (в XIX в.) самого термина «группа» в математике. Знаменитый закон инерции, или, как теперь его называют, «принцип относительности Галилея», есть не что иное, как принцип инвариантности законов механики относительно равномерных, прямолинейных движений системы отсчета (т. е. относительно так называемой «группы Галилея»). Фактически, некоторые уточнения этого же принципа, учитывающие существование предельной скорости « c » (что приводит к замене группы Галилея группой Лоренца), легли в основу специальной теории относительности Эйнштейна. Основными законами сохранения в физике являются законы сохранения энергии-импульса и момента количества движения, связанные с инвариантностью относительно группы движения пространства-времени — группы Пуанкаре.

Вообще принципы инвариантности являются самыми общими, самыми фундаментальными законами природы. Они относятся к частным закономерностям таким же образом, как и сами эти закономерности относятся к отдельным событиям в природе¹. Общность симметрии различных лагранжианов (или уравнений) приводит к общности законов сохранения (теорема Нетер).

2

Роль теории групп в квантовой механике значительно больше, чем в классической физике. Впервые в квантовой механике нашла применение теория (линейных) представлений групп². Это связано с тем, что в кванто-

¹ Эта мысль подробно обосновывается в Нобелевской лекции Вигнера [1, стр. 727].

² В двадцатиминутном сообщении, разумеется, нет возможности последовательно вводить используемые понятия. Все же я попытаюсь пояснить терминологию теории представления на примере группы трехмерных вращений $SO(3)$.

Совокупность трехмерных вращений образует группу, так как последовательное применение двух вращений снова является вращением и для каждого вращения имеется обратное вращение, которое возвращает систему координат в исходное положение. Представлением группы называется сопоставление каждому вращению g некоторой матрицы T_g таким образом, чтобы последовательному применению двух вращений соответствовало бы произве-

вой механике имеет место принцип суперпозиции состояний, не имеющий аналога в классической физике. Этот принцип позволяет разложить произвольное состояние по векторам, преобразующимся по неприводимым (унитарным) представлениям группы симметрии. Наличие симметрии обуславливает существование нескольких линейно независимых векторов с одной и той же энергией, т. е. вырождение собственных значений гамильтониана. Размерность неприводимых представлений группы дает степень вырождения. Полный набор коммутирующих операторов алгебры Ли группы симметрии определяет систему одновременно измеримых физических величин, задание которых вместе с энергией однозначно определяет физическое состояние. Так, основные физические величины возникают как генераторы или как функции от генераторов группы симметрии. Энергия и импульс определяются как инфинитезимальные операторы сдвигов по времени и в пространстве. Момент импульса дается генераторами вращений в пространстве — времени. Все эти величины связаны с самой фундаментальной симметрией в природе — с геометрической симметрией пространства — времени, поэтому они применимы к любой физической системе в любой теории³.

дение матриц: $T_{g_1 g_2} = T_{g_1} T_{g_2}$. Примером двузначного (спинорного) представления может служить совокупность двухрядных унитарных матриц $SU(2)$

вида
$$T_a = \exp \left(i \sum_{j=1}^3 \alpha_j \frac{\sigma_j}{2} \right), \quad \text{где } \sigma_j \text{ — спиновые матрицы Паули.}$$

Параметр α_j есть угол вращения вокруг оси j . Генераторы (или инфинитезимальные операторы) представления определяются как (умноженные на $-i$) производные от операторов T_g по параметрам группы в точке, где эти параметры равны нулю. В случае спинорного представления это — двухряд-

ные матрицы $S_j = \frac{1}{2} \sigma_j$. Физические генераторы группы вращения отождес-

твляются с вектором спина частицы. Представление называется приводи-

если в некотором базисе все матрицы T_g имеют $T_g = \begin{pmatrix} T_g^{(1)} & 0 \\ 0 & T_g^{(2)} \end{pmatrix}$.

В противном случае представление называется неприводимым. Любое представление может быть разложено на неприводимые. Неприводимые представления группы $SO(3)$ характеризуются полным спином системы s .

³ С симметрией пространства — времени относительно различных преобразований отражения связаны понятия о пространственной и временной чет-

Наряду с геометрической симметрией в последние десятилетия особое развитие получило изучение динамических симметрий, относящихся к отдельным классам взаимодействий, например к сильным взаимодействиям элементарных частиц. Собственные значения генераторов группы симметрии сильных взаимодействий $U(2) = U(1)_Y \otimes SU(2)_I$ задают основные физические характеристики адронов: электрический заряд, гиперзаряд и изотопспин. Сохраняющемуся при всех взаимодействиях барионному числу соответствует однопараметрическая группа $U(1)_B$ фазовых преобразований барионных полей.

Важный пример динамической симметрии, относящийся к «классической» нерелятивистской квантовой механике, представляет собой нерелятивистская теория водородного атома, где симметрия гамильтониана задается группой вращений $SO(4)$ в некотором четырехмерном пространстве, не имеющем прямого отношения к нашему физическому пространству.

3

Итак, роль групп и алгебр Ли в квантовой теории (по крайней мере) двойка. Во-первых, группа симметрии определяет степень вырождения собственных значений гамильтониана. Во-вторых, эрмитовы генераторы алгебры Ли дают естественный набор наблюдаемых, знание которых полностью характеризует физическую систему. Для выполнения этой второй роли от группы на самом деле не требуется, чтобы она задавала симметрию. Чтобы все-таки классификация состояний по неприводимым представлениям группы не была произвольной, необходимо потребовать, чтобы для каждого значения энергии собственные векторы гамильтониана принадлежали определенному неприводимому представлению группы (а не являлись смесью разных представлений), другими словами, чтобы гамильтониан не имел отличных от нуля матричных элементов между векторами, принадлежащи-

ности системы (в частности, частицы). Однако, по-видимому, эти понятия имеют ограниченную область применения, и в этом смысле их скорее нужно ввести в раздел «динамических» симметрий. Мы не будем вдаваться здесь в обсуждения этого вопроса [2, стр. 453].

ми разным неприводимым представлениям группы. Для этого необходимо, чтобы инвариантные операторы алгебры (называемые операторами Казимира) коммутировали с гамильтонианом. Примером группы, по-видимому, удовлетворяющей этому условию, является группа $SU(6)$, объединяющая спиновую и унитарную симметрии. Наоборот, группа $SU(3)$ заведомо не удовлетворяет сформулированному условию отсутствия смешивания, так как каждый из φ - и ω -мезонов является смесью унитарного синглета и восьмой (нейтральной) компоненты октета. Группа внутренней симметрии $W_3 = U(3) \otimes U(3)$, соответствующая симметрии как по кварковым, так и по антикварковым индексам, в отдельности могла бы в этом смысле лучше служить для классификации частиц, поскольку все девять векторных мезонов объединяются в одно неприводимое представление $(3, 3^*)$ этой группы.

Мы намеренно не пользовались часто встречающимся термином «приближенная симметрия» для характеристики групп типа $SU(6)$ или W_3 . Во-первых, эти «симметрии» (если их можно так назвать) весьма сильно нарушены, что видно, например, из больших разностей масс мезонов, входящих в один мультиплет (π -мезон более чем в шесть раз легче χ^0 - и φ -мезонов). Во-вторых, успех в использовании этих групп для классификации частиц и для получения массовых формул и соотношений между магнитными моментами вызван не тем, что в каком-то приближении эти группы являются точными симметриями, а скорее наоборот, тем, что основные физические величины — гамильтониан (или квадрат массы), магнитный момент и пр. — могут быть выражены как функции генераторов группы. Польза рассмотрения алгебры Ли, не коммутирующей с гамильтонианом, но в терминах генераторов которой выражается гамильтониан, была обнаружена еще раньше в ядерной физике [3].

Иногда противопоставляют групповые методы структурным моделям. Между тем развитие теории в последние десятилетия недвусмысленно показывает, что как в ядерной физике, так и в физике элементарных частиц модели и групповые методы всегда идут рука об руку. Часто они просто сводятся к разным выражениям одного и того же подхода.

Групповой подход выделяет существенные черты данной модели (или класса моделей), отвлекаясь от второстепенных деталей. Например, использование групп W_3 или $SU(6)$ в теории элементарных частиц приводит к тем общим следствиям модели кварков, которые не зависят, например, от конкретного вида потенциала, связывающего кварки в мезоны и барионы. Извлечение этих общих следствий полезно, в особенности на данном этапе, когда мы весьма далеки от создания настоящей структурной теории элементарных частиц. Не надо, однако, думать, что групповая картина возникает всегда после того, как имеется некоторая «более физическая» составная модель. Например, так называемый восьмиричный путь в теории унитарной симметрии представлял собой в первых работах Гелл-Мана и Неемана ⁴ чисто групповой подход к систематике элементарных частиц. Лишь затем на его основе была развита кварковая модель частиц и резонансов.

4

Мы уже видели, что для применения неприводимых представлений некоторой алгебры Ли для классификации состояний данной физической системы вовсе не является необходимым, чтобы эта алгебра задавала симметрию, т. е. чтобы ее операторы коммутировали с гамильтонианом. Вполне допустимо, чтобы в одно неприводимое представление алгебры входило несколько собственных значений энергии. Крайним случаем этого типа (противоположным случаю строгой симметрии) является алгебра, в пространство одного неприводимого представления которой входят все собственные векторы гамильтониана, а следовательно, и любое состояние системы. Такая алгебра Ли называется алгеброй, порождающей спектр ⁵ (сокращенно а. п. с.).

Реальные физические системы, с которыми мы имеем дело в квантовой теории, имеют бесконечное число различных возможных состояний. В соответствии с этим

⁴ См., например [4], где имеются русские переводы первых статей этих авторов, посвященных $SU(3)$ симметрии.

⁵ См. статью Дотана и Неемана в сборнике [3], а также лекции автора «Некомпактные группы и динамические симметрии» [5].

гамильтониан физической системы имеет бесконечное множество собственных значений и собственных векторов. Таким образом, для того чтобы алгебра Ли некоторой группы могла быть а. п. с. реальной системы, необходимо, чтобы у нее были бесконечномерные неприводимые унитарные представления. Из теории представлений известно, что единственными группами (элементы которых зависят от конечного числа параметров), обладающими такими свойствами, являются некомпактные группы⁶.

Классическим примером а. п. с. является алгебра Ли группы де Ситтера $SO(4, 1)$ в отношении нерелятивистского водородного атома⁷. Мне кажется, что до сих пор знание а.п.с. водородного атома не использовано до конца и мы еще не достигли полного теоретико-группового понимания этой старой квантовомеханической задачи. Во всяком случае, работы в этом направлении продолжают до сих пор [6—8] (в [6] имеются также ссылки на классические работы Паули, Фока и Баргмана). Важность такого понимания связана с надеждой применения методов теории представлений некомпактных групп в физике элементарных частиц. Имеются многочисленные попытки в этом направлении (см., например, цитированные сборники [3, 5]), но нельзя сказать до сих пор, что достигнут настоящий успех. Вместе с тем уже сейчас применение унитарных представлений некомпактных групп поставило новые интересные вопросы, связанные с рассмотрением квантованных полей с бесконечным числом компонент. Возникает новый подход в старой проблеме о форм-факторах и «структуре частиц».

⁶ Упомянутые выше группы симметрии $SO(4)$ и $U(2)$, так же как и более широкие группы W_3 и $SU(6)$, — компакты (другими словами, параметры, задающие их элементы, описывают компактные — ограниченные и замкнутые — многообразия). Все унитарные представления этих групп конечномерны, в соответствии с тем, что данному собственному значению энергии соответствует конечное число собственных векторов. Примерами некомпактных групп могут служить все группы, включающие трансляции в (евклидовом) пространстве, так же как и все группы, сохраняющие некоторую индефинитную форму: группа Лоренца $SO(3, 1)$, группа типа $U(p, q)$ и $O(p, q)$ с $p > 0$, $q > 0$, сохраняющие соответственно формы

$$\sum_{i=1}^p |z_i|^2 - \sum_{j=1}^q |z_{p+j}|^2 \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^p x_i^2 - \sum_{j=1}^q x_{p+j}^2.$$

⁷ См., например, лекцию Попова [5].

Подведем некоторые итоги.

Мода в физике столь же недолговечна, как и в одежде. Мы уже являемся свидетелями отхода от чрезмерного увлечения чисто групповыми методами (которое достигло своего максимума полтора-два года назад). Но мне кажется, что групповой подход в физике не сводится к увлечению очередной моды, что методы теории представлений, наряду с другими методами, будут играть и в будущем важную роль в понимании микромира.

Вряд ли имеет смысл пытаться предсказывать, что именно из групповых методов и связанных с ними идей найдет развитие и применение в теории элементарных частиц. Вместо этого в заключение коротко обсудим некоторые «упреки» в адрес групповых методов в свете того, что уже говорилось.

1) Нередко противопоставляют групповой подход динамическому, считая, что первый из них формальный и феноменологичный, в то время как второй дает настоящее физическое понимание. Не входя в дискуссию по этому вопросу, мы напомним, что наиболее общее (и наиболее глубокое) понимание законов сохранения энергии-импульса и момента достигается именно на основе выявления симметрии пространства — времени, или, что то же, — на основе инвариантности законов природы относительно группы Пуанкаре. Строгие законы сохранения зарядов сегодня неизменно связываются с инвариантностью относительно различных градиентных преобразований.

2) Мы уже говорили об искусственности противопоставления групповых методов и структурных моделей. Его можно было бы сравнить с противопоставлением аналитического и геометрического выражения одного и того же факта. В точности так же, как анализ и алгебра используются не только для записи известных геометрических фактов, но и для открытия новых, и теория групп, в особенности в отношении внутренних симметрий элементарных частиц, часто приводила к новым результатам, для которых лишь затем придумывали более «наглядные истолкования».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Е. Вигнер*. События, законы природы и принципы инвариантности. — «УФН», т. 85, вып. 4, 1965.
2. *Е. Вигнер*. Нарушение симметрий в физике. — «УФН», т. 89, вып. 3, 1966.
3. «Symmetry groups in nuclear and particle physics. A lecture-note and reprint volume edited by F. J. Dyson». N. P., Amsterdam, 1966.
4. «Элементарные частицы и компенсирующие поля». М., 1964.
5. «Физика высоких энергий и теория элементарных частиц». Киев, 1966.
6. *М. Bander, С. Itzykson*. Group theory and the hydrogen atom (I and II). — «Rev. Mod. Phys.», 38, 330, 1966.
7. *М. Y. Han*. Quantum-mechanical generators of the group $O(4, 1)$ for hydrogen-atom boundstates. — «Nuovo Cimento», 42, B, 1966.
8. *Y. Nambu*. Relativistic equations for particles with internal structure and mass spectrum. Berkley, 1966.

Раздел четвертый

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ФИЗИКЕ МИКРОМИРА

Р. А. Аронов

ПРОБЛЕМА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ МИКРОМИРА

Проблема пространственно-временной структуры микромира все более отчетливо выступает как проблема существования качественно различных пространственно-временных областей, в которых определяющую роль играют различные типы материальных взаимодействий (в частности, гравитационные, электромагнитные, сильные и слабые взаимодействия).

В каждой из этих пространственно-временных областей господствующие в них взаимодействия определяют свойства пространства и времени. Разумеется, в каждой из этих областей взаимодействия иного типа тоже играют некоторую роль и вносят определенный вклад в их пространственно-временные свойства. Однако эта роль и этот вклад являются неопределяющими, второстепенными и ими, в известных пределах, можно пренебречь, в отличие от взаимодействий, играющих определяющую роль в этих областях [1, стр. 167; 2, стр. 141].

С этой точки зрения в нашей области макрокосмоса, в которой определяющую роль играют электромагнитные взаимодействия, именно они определяют свойства пространства и времени. Эвклидовость пространства и времени (соответственно псевдоевклидовость пространства — времени), представлявшаяся до сих пор «доказательством» того, что пространство и время в отсутствие гравитационного поля не зависят от материальных взаимодействий, по-видимому, является на самом деле проявлением свойств электромагнитных взаимодействий. Естественно

поэтому, что современная теория поля, соответствующая этой пространственно-временной области, отражающая ее свойства, адекватна действительности именно как электродинамика, как теория электромагнитных взаимодействий.

Столь же естественно, что попытки учесть в теории существование пространственно-временных границ, отделяющих эту область от качественно иных пространственно-временных областей, выводят за пределы тех представлений о пространстве и времени, на которые существенно опирается современная теория поля.

Трудности и противоречия, с которыми сталкиваются теории сильных и слабых взаимодействий, в значительной степени связаны с тем, что эти теории, отражающие свойства качественно иных пространственно-временных областей, по-прежнему строятся в соответствии с пространственно-временными представлениями квантовой электродинамики.

Физика элементарных частиц уже не теоретически, а практически приступает к исследованию пространственно-временной структуры микромира. Физики надеются, что электродинамические эксперименты по столкновению встречных пучков электронов и позитронов достаточно высокой энергии позволят обнаружить существование пространственно-временной границы, отделяющей друг от друга качественно различные пространственно-временные области. Конечно, решающим судьей явится эксперимент. Однако из самых общих соображений о взаимоотношении пространства, времени и материи можно высказать некоторые предположения о возможностях электродинамических экспериментов в исследовании пространственно-временной структуры микромира.

Объектом предстоящих электродинамических экспериментов является область, в которой роль электромагнитных взаимодействий и их вклад в свойства пространства и времени второстепенны: определяющую роль в этой пространственно-временной области играют взаимодействия иного типа. Электромагнитные взаимодействия обуславливают определенные свойства пространства и времени. В области, где эти взаимодействия играют определяющую роль, их вклад в свойства пространства и времени является доминирующим — пространство и время евклидовы. В исследуемой области, в которой электромагнит-

ные взаимодействия не играют определяющей роли, их вклад уже не является доминирующим, но и здесь они по-прежнему обуславливают эвклидовость пространства и времени. Поэтому проникновение в эту область может и не привести к отклонению квантовой электродинамики от эксперимента.

Следовательно, можно предполагать, что электродинамические эксперименты, осуществления которых мы ждем в ближайшее время и у нас, и за рубежом, не обнаружат существования «первой» пространственно-временной границы в микромире. Но если это и произойдет, то, как нам кажется, вовсе не потому, что такой границы не существует, а потому, что исследования электромагнитных взаимодействий не компетентны решать этот вопрос.

Электродинамические эксперименты смогут обнаружить существование пространственно-временных границ в микромире, по-видимому, в том случае, если в процессе взаимодействия встречных пучков электронов и позитронов существенными окажутся сильные и особенно слабые взаимодействия. Что же касается электромагнитных взаимодействий, то нарушение квантовой электродинамики при их исследовании на малых расстояниях, с этой точки зрения, является лишь достаточным (но не необходимым) признаком существования пространственно-временной границы в микромире, за пределами которой представления современной теории поля о пространстве и времени не соответствуют действительности.

Попытки учесть в теории существование пространственно-временных границ в микромире, связанные с дальнейшим развитием гипотезы прерывности пространства и времени, приводят к трудности с несохранением энергии и импульса в малых пространственно-временных областях. Столкнувшись с этим, теоретики пошли по двум путям. Одни из них (например, Ю. А. Гольфанд [3, стр. 256]) не увидели в нарушении обоих законов сохранения никакой трудности, поскольку это нарушение происходит в малых пространственно-временных областях и никак не сказывается на достаточно больших пространственно-временных областях, в которых по-прежнему сохраняются и энергия и импульс. Другие (например, В. Г. Кадышевский [4, стр. 40]) пошли по пути В. Паули, встретившегося в свое время с аналогичной трудностью в исследовании β -распада. На этом пути постулируется

существование некоторой новой частицы, ответственной за «несохранение» энергии и импульса, и таким образом трудность преодолевается.

Однако оба эти пути в данном случае, как нам кажется, могут оказаться неэффективными. На первом из них трудность с несохранением энергии и импульса не преодолевается, а лишь обходится. От того, что эта трудность локализуется в малых пространственно-временных областях, она вовсе не перестает быть трудностью. На втором пути преодоление трудности с несохранением энергии и импульса также, по-видимому, является лишь кажущимся, поскольку, в отличие от введенного В. Паули нейтрино, постулируется существование не реальных частиц, а некоторых квазичастиц.

Разумеется, и в этом случае решающим судьей явится эксперимент. Однако из самых общих соображений о взаимоотношении пространства, времени и материи можно высказать предположение, что трудность с несохранением энергии и импульса возникает при этом из-за того, что в теории учитывается лишь существование пространственно-временной границы, отделяющей друг от друга качественно различные пространственно-временные области, и игнорируется вклад взаимодействий, господствующих за пределами этой границы. Последовательное проведение гипотезы прерывности пространства и времени снимает эту трудность. Более того, кажущееся нарушение законов сохранения энергии и импульса в малых пространственно-временных областях приобретает при этом известное эвристическое значение, ибо позволяет в какой-то мере судить о взаимодействиях, господствующих за пределами этой пространственно-временной границы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. А. Аронов. К проблеме пространства и времени в физике элементарных частиц. — «Философские проблемы физики элементарных частиц». М., 1963.
2. Р. А. Аронов. Гипотеза прерывности пространства и времени и общая теория относительности. — «Философские проблемы теории тяготения Эйнштейна и релятивистской космологии». Киев, 1964.
3. Ю. А. Гольфанд. Квантовая теория поля в p -пространстве постоянной кривизны. — «ЖЭТФ», т. 43, 1962.
4. В. Г. Кадышевский. Об одном обобщении квантовой теории поля. — «Пространство, время, причинность в микромире». Дубна, 1964.

ПРОСТРАНСТВО И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Основная задача автора заключается в попытке показать, что пространственные понятия, фигурирующие в системе квантовой механики, гораздо разумнее считать относящимися только к макроуровню, интерпретируя их как характеристики событий обнаружения микрообъектов в макропространстве. Тенденция считать их характеристиками микрообъектов «как таковых», т. е., в конечном счете, характеристиками микропространства, почти безраздельно господствующая в настоящее время, на наш взгляд, представляет собой остатки непреодоленной инерции стиля мышления, свойственного классической физике, согласно которому микромир принципиально не отличается от макромира.

Естественно, что отказ от использования категории пространства в качестве средства задания способа существования и сосуществования микрообъектов повлечет за собой весьма далеко идущие последствия в деле понимания философского статуса этой категории. Пространство в таком случае утрачивает право быть всеобщей и универсальной формой существования материи, оставаясь лишь особенной формой существования макроматерии. Поэтому, прежде чем решаться на такой серьезный шаг, нужно доказать его обоснованность. Это, в первую очередь, предполагает выяснение понятийного содержания категории «пространство», тщательный анализ вкладываемого в нее смысла.

В нашей современной философской литературе пространство понимается как такая форма бытия материи, которая, являясь коренным условием сосуществования материальных явлений, отражает в своей сущности и свойствах некоторую общую закономерность сосуществования явлений, состояний движущейся материи. Короче, «пространство выражает порядок расположения одновременно сосуществующих объектов» [1, стр. 80]. Такова, в частности, концепция В. И. Свидерского. С. Т. Мелюхин, принимая содержание этого определения, существенно конкретизирует его в части уточнения смысла

выражения «порядок сосуществования», понимая его как протяженность [2, стр. 122].

Различное понимание категории пространства упомянутыми авторами приводит к тому, что В. И. Свидерский допускает возможность того, что в микромире теряет смысл устанавливающее количественную определенность протяженности понятие расстояния [3, стр. 6; 4, стр. 299], а С. Т. Мелюхин категорически отвергает эту возможность, считая протяженность основной характеристикой пространства, без которой оно теряет свое содержание и существование [2, стр. 152].

Присоединяясь к точке зрения С. Т. Мелюхина по вопросу о трактовке протяженности как неотъемлемой характеристики пространства, мы не разделяем всеобщей убежденности в абсолютности пространства, которую, согласно В. И. Свидерскому, следует понимать как всеобщность, обязательность существования пространства для существования всех состояний материи [4, стр. 304]. Это, разумеется, не отрицает объективности пространства там, где оно существует.

Применительно к проблеме прояснения смысла категории пространства выдвигается тезис: категория пространства, конкретизируемая в понятиях «протяженность» и «расстояние», есть не что иное, как средство индивидуализации различных объектов.

Индивидуализация различных объектов предполагает, что каждый из таких объектов не только может быть отличаем от других, но и отождествлен сам с собой. Вообще говоря, индивидуализация не предполагает существования различных объектов — если объект только один (ему не от чего отличаться), то он, естественно, может быть индивидуализирован, т. е. отождествлен сам с собой.

Общепринятые представления о пространстве, зафиксированные в упомянутых выше определениях, также связаны с представлениями о тождестве и различии объектов действительности (состояний движущейся материи). Попробуем уточнить представления о конкретном характере этой связи.

Большинство наших философов считает, что выражение «мир в целом существует в пространстве» не имеет смысла. Это происходит потому, что мир в целом — только один. Ему не от чего отличаться — различных «миров

в целом» нет. Существование пространства «внутри» мира в целом возможно только благодаря факту существования различий его отдельных фрагментов. Если же встать на позиции Парменида, трактовавшего мир в целом (бытие) как единый, неизменный, не имеющий различий ни вне, ни внутри себя, то придется отказаться и от существования пространства совсем, что Парменид и сделал, провозгласив отсутствие, несуществование пустоты. Поэтому можно сказать, что существование различий является необходимым условием существования пространства: если никаких различий нет, пространство существовать не может.

Является ли существование различий достаточным признаком существования пространства?

С нашей точки зрения, предположение об абсолютности пространства неявно подразумевает утвердительный ответ на этот вопрос. Иными словами, предполагается, что сам факт существования различных объектов обязательно требует существования пространства, откуда следует, что каждый из различных объектов обязан существовать в пространстве.

Такое понимание абсолютности пространства связано с тем, что современные представления о пространстве сформировались путем синтеза ньютоновских и лейбницевских представлений о смысле понятия «пространство».

Ньютоновская линия в понимании пространства трактовала его абсолютность как существование пространства самостоятельно, независимо от существования или несуществования наполняющих его объектов, как его существование наряду с этими объектами. Она берет свое начало в трактовке древнегреческими атомистами понятия «пустота». По мнению атомистов, пустота существует ничуть не менее реально, чем бытие (атомы), несмотря на то, что она является небытием [5, стр. 25]. Будучи необходимым и достаточным условием движения, пустота выступает у атомистов и как необходимое и достаточное условие различения и отождествления (индивидуализации) атомов, заполняющих различные области пустоты, трактуемые как реально и самостоятельно существующие. То же самое будет справедливым и для ньютоновского абсолютного пространства.

Иными словами, ньютоновская линия развития смысла

категории пространства переносит центр тяжести с индивидуальности отождествляемых и различаемых объектов на возможность их индивидуализации, трактуя эту возможность вне зависимости от объектов и опредмечивая, гипостазировав ее в понятии абсолютного пространства.

Лейбницевская линия, берущая свое начало в детальном анализе понятия «место», осуществленном Аристотелем [6, стр. 69—79], напротив, с самого начала сосредоточивает внимание на самих объектах, не отрываясь от них в ходе рассуждения. Аристотелевская трактовка места тела как границы другого тела, объемлющего данное [6, стр. 77], подразумевает существование двух различных тел — объемлющего и объемлемого — и понимает границу между ними как определенную характеристику различия этих тел. Развитием аристотелевского понятия места является представление о пространстве как о совокупности мест и порядке сосуществования вещей, сформулированное Лейбницем [7, стр. 47, 74, 78], согласно которому части пространства могут отождествляться и различаться только с помощью находящихся в нем вещей [7, стр. 85], что обусловило его вывод: «без материи нет пространства» [7, стр. 84]. Понятие расстояния также трактуется Лейбницем как характеристика взаимного расположения вещей, т. е. как характеристика определенного вида их различия [7, стр. 78].

Современным представлениям о пространстве не присуще понимание его абсолютности как существования наряду с объектами и независимо от них, свойственное Ньютону, но присуще понимание его абсолютности как необходимого и достаточного условия существования и сосуществования не только индивидуализируемых, но и всех различных объектов. Это предполагает, в частности, что существование и сосуществование каждого объекта обязательно должно быть задано пространственно. Если же трактовать пространство как относящееся к существованию только индивидуализируемых объектов, то его абсолютность будет означать, что все объекты являются индивидуализируемыми.

Анализ показывает, однако, что предположение об абсолютности пространства в обоих его вариантах оказывается слишком сильным и не обязательным, ибо характеристика существования и сосуществования различ-

ных объектов не обязательно требует их индивидуализации и может быть выражена в «непространственных» понятиях. Иными словами, требование различия объектов (которое, естественно, предполагает как существование каждого из различных объектов, так и их сосуществование всех вместе) является более слабым требованием, чем требование существования их в пространстве и требование индивидуализации объектов.

Дело в том, что, наряду с пространственными, существуют и другие способы отождествления и различения объектов — по свойствам и по числу. При установлении пространственных характеристик тождества и различия объектов (вещей) в качестве непосредственных объектов деятельности отождествления и различения берутся сами эти вещи в целом, взятые каждая как одно, как нерасчлененное себестождественное единство. Это, конечно, предполагает индивидуальность сравниваемых пространственно объектов. При установлении тождества и различия объектов по их свойствам непосредственными объектами отождествления и различения являются не сами объекты (вещи), а их свойства. Знание о тождестве или различии объектов при этом является выводным по отношению к непосредственно получаемому знанию о тождестве или различии отдельных свойств этих объектов (вещей). Сами объекты рассматриваются как наборы свойств — одно (объект) полагается как множество (множество свойств). Очевидно, что различия по свойствам, вообще говоря, несводимы к пространственным различиям.

В отличие от пространственных различий и различий по свойствам различия объектов по числу не требуют индивидуализации, представляя собой «чистые» различия, не предполагающие себестождественности различных по числу объектов. Поэтому их естественно считать более простыми, чем пространственные различия и различия по свойствам.

В реальной познавательной деятельности все три вида различий тесно связаны и неотделимы друг от друга. Однако для целей методологического анализа имеет смысл рассмотреть их отдельно. Это необходимо, в частности, для решения вопроса о статусе пространственных понятий в квантовой механике и об абсолютности пространства.

Итак, мы будем исходить из того, что различия бывают трех родов: различия по числу, пространственные различия и различия по свойствам. Попробуем установить отношения между этими видами различий.

Прежде всего покажем, что различие по числу (множественность) действительно является самым простым, исходным различием.

Очевидно, что если объекты различны пространственно, то они обязательно различны и по числу. Обратное, вообще говоря, неверно — так, например, в одном и том же месте пространства могут существовать несколько различных объектов — скажем, электромагнитное и гравитационное поля. В локальных теориях взаимодействие двух различных частиц также происходит в одной точке пространства. Иными словами, различие объектов по числу не обязательно влечет за собой их пространственное различие, в то время как пространственное различие объектов обязательно влечет за собой их различие по числу.

Это и означает, что различие по числу является более простым и фундаментальным, чем пространственное, поскольку оно, вообще говоря, не зависит в своем существовании от существования пространственных различий, в то время как существование пространственных различий зависит от существования различий по числу.

Аналогичное справедливо и для отношения между различием по числу и различием по свойствам. Различие по числу является более простым и фундаментальным, так как из существования различия объектов по свойствам вытекает их различие по числу, а из существования различия по числу существование различий по свойствам, вообще говоря, не следует. Совершенно одинаковые по свойствам объекты (например, атомы одного и того же вещества, находящиеся в одном и том же состоянии) могут все же различаться по числу.

Интересно, что в истории философии были попытки установления отношения эквивалентности между различиями по числу и пространственными различиями, а также между различиями по числу и различиями по свойствам при помощи определенных онтологических принципов.

Так, например, лейбницевский принцип тождества неразличимых (по свойствам) постулировал невозможность

существования никаких двух неразличимых друг от друга по свойствам отдельных объектов [7, стр. 54, 55], хотя и допускал возможность абстрактного мышления о такого рода объектах [7, стр. 72, 73]. Принятие этого принципа делает логически и онтологически эквивалентными различие по свойствам и различие по числу, открывая возможность умозаключать от одного типа различий к существованию другого. Кроме этого, принцип тождества неразличимых позволяет индивидуализировать объекты только по свойствам, утверждая единственность объекта, обладающего заданным набором свойств.

С другой стороны, доктрина античного атомизма о непроницаемости атомов, утверждавшая невозможность существования многих атомов в одном и том же месте пространства, онтологически и логически уравнивала различия по числу и пространственные различия, представляя собой своеобразный принцип «тождества пространственно неразличимых» (атомы «были сделаны» из одного и того же материала!). Это позволяло индивидуализировать частицы (объекты) только по их пространственным характеристикам. Если атомов было несколько (они различались по числу), то они обязательно должны были существовать в разных местах пространства (быть пространственно различными). Справедливо было и обратное — если атомы были пространственно различными, то они обязательно различались и по числу. В силу такой логико-онтологической эквивалентности было возможным объяснить одно через другое — так, например, Кант считал пространство условием множественности (численного различия явлений) [8, стр. 316].

Приведенные выше примеры показывают, что в реальной познавательной деятельности ни принцип непроницаемости, ни принцип Лейбница не являются абсолютными онтологическими критериями. Это открывает возможность считать как различия по свойствам, так и пространственные различия конкретизацией различий по числу. Соблазнительно трактовать такую конкретизацию как обязательную и сделать вывод, что эти способы конкретизации исчерпывают все ее возможности, так что из наличия различий по числу обязательно вытекает либо различие по свойствам, либо пространственное различие. Поскольку в приводившихся примерах гравитационное и электромагнитное поля, различающиеся по числу, но

не различающиеся пространственно, различны по свойствам своим, а одинаковые атомы, не различаясь по свойствам, различаются пространственно, такое предположение кажется правдоподобным. Однако в общем случае такой вывод, как показывает практика познавательной деятельности, является несправедливым. В качестве опровергающего правомерность такого вывода примера можно привести возможность существования нескольких абсолютно одинаковых по своим свойствам электромагнитных волн, обладающих одними и теми же пространственными характеристиками.

Приведенные примеры показывают также, что пространственные различия и различия по свойствам взаимно независимы. Из существования пространственных различий объектов нельзя вывести их различие по свойствам. Нельзя сделать и обратного вывода. Пространственно различные объекты могут быть тождественны по всем своим свойствам, а различные по свойствам объекты могут иметь одни и те же пространственные характеристики.

Из всего этого вытекает важный вывод, что все три вида различий могут рассматриваться независимыми друг от друга не только в логическом, но и в онтологическом смысле.

После всех этих довольно утомительных рассуждений можно, наконец, показать, что в квантовой механике пространственные различия микрочастиц разумно считать несуществующими.

Принцип неразличимости (тождественности) отдельных объектов в системе многих одинаковых (по своим свойствам) микрочастиц, справедливость которого установлена достаточно надежно макроскопическими экспериментами, утверждает, что обмен пространственными местами между отдельными микрочастицами не имеет физической значимости, т. е. не влияет на макроскопически наблюдаемые явления. Строго говоря, этот принцип лучше называть принципом отсутствия индивидуальности, ибо он требует не отсутствия всяких различий, а только лишает возможности использовать пространственные различия между различными по числу микрочастицами для их индивидуальности. Ситуация сильно затемняется тем, что в математическом аппарате квантовой механики волновая функция $\psi(r_1, r_2)$ отлична от $\psi(r_2, r_1)$ именно в

пространственном отношении, различаясь пространственным порядком аргументов. Суть дела, однако, заключается в невозможности сопоставить этим различным ψ -функциям различные экспериментальные ситуации. Поэтому, если следовать той же логике рассуждений, как и при выводе утверждения о несуществовании у микрочастицы одновременно координаты и импульса, которое основано на невозможности одновременного измерения этих характеристик (т. е. считать основой утверждений о существовании или несуществовании чего-либо эксперимент, практику), то разумнее будет предположить, что пространственных различий у микрочастиц не существует вообще, чем считать их существующими, но никак не обнаружимыми экспериментально. Различие аргументов ψ -функции в этом случае будет обозначать различие мест обнаружения микрочастиц (различных по числу) в макропространстве, которые (места обнаружения), естественно, могут быть индивидуализированы. Но из индивидуальности этих мест в макропространстве вовсе не следует индивидуальность микрообъектов в микропространстве.

Возможность такого вывода затемняется еще и тем фактом, что координату и импульс нельзя одновременно задать в математическом аппарате квантовой механики, а пространственные различия микрочастиц как будто можно. Однако симметризация волновых функций, требуемая принципом отсутствия индивидуальности, фактически ликвидирует возможность и математической индивидуализации двух различных по числу, но одинаковых по свойствам микрочастиц посредством индивидуализации их волновых функций.

Можно возразить, что, несмотря на экспериментальную необнаружимость пространственных различий микрочастиц, эти различия все же существуют. Но таким же образом можно утверждать и существование абсолютного пространства, и одновременное существование координаты и импульса, невзирая на невозможность экспериментальной проверки этого утверждения.

Можно, наконец, сказать, что хотя неиндивидуализируемые микрочастицы и не сосуществуют в пространстве (пространственные различия между ними как характеристики способа их сосуществования не существуют), сами они существуют в пространстве. Но состояние (ха-

рактеристику способа существования) микрочастиц, вообще говоря, можно задать и не прибегая к пространственным характеристикам (положение, координата), а при помощи их свойств, символизируемых квантовыми числами, которые не имеют пространственной природы. Сосуществование таких «беспространственно» существующих объектов можно задать через сосуществование их свойств с помощью аппарата теории групп, в котором пространственные характеристики могут и не фигурировать.

С философской точки зрения это означает, что категория структуры является более общей характеристикой сосуществования объектов, чем категория пространства, ибо пространственные структуры, основанные на понятии расстояния, являются частным случаем «структур вообще».

В таком случае утверждение о существовании пространства в микромире всецело будет следствием философского положения об абсолютности пространства. Если отбросить это требование (что никоим образом не поколеблет объективности существования микрочастиц), то квантовая механика так же сможет обойтись без утверждения об обязательности существования и сосуществования микрообъектов в пространстве, как теория относительности обходится без утверждения о существовании эфира и абсолютного пространства в ньютоновском смысле.

Вся вышеизложенная попытка «налить старое вино квантовой механики в новые меха» касается только философской стороны вопроса. Мы пытались показать, что принцип тождественности микрочастиц, запрещающий их индивидуализацию, позволяет исключить без всякого ущерба пространственные характеристики (основанные на понятии расстояния) как характеристики существования и сосуществования микрочастиц. Это и обосновывает предположение, что пространство, как форма существования материи, относится только к индивидуализируемым фрагментам действительности. Что же касается неиндивидуализируемых объектов, то их существование характеризуется с помощью категории структуры. Структурность материи и представляет собой абсолютную форму ее существования, более общую, чем пространство.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Философский словарь». М., 1963.
2. «Философские проблемы физики элементарных частиц». М., 1963.
3. В. И. Свидерский. Пространство и время. М., 1958.
4. В. И. Свидерский. Философское значение пространственно-временных представлений в физике. Л., 1956.
5. А. Маковельский. Древнегреческие атомисты. Баку, 1946.
6. Аристотель. Физика. М., 1937.
7. «Полемика Г. Лейбница и С. Кларка». Л., 1960.
8. И. Кант. Сочинения, т. 3. М., 1964.

И. А. Акчури

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ И МИКРОМИР

Идея информационной емкости [1] позволяет предсказать, что в самом ближайшем будущем топологические методы начнут, по-видимому, определять дальнейшие пути развития даже такой, казалось бы, независимой, имеющей чисто аксиоматическое построение дисциплины, как абстрактная теория поля. Дело в том, что относительно недавно было доказано, что основные математические средства последней — обобщенные функции (распределения, дистрибуции) — являются не только определенными функционалами. Как показал японский математик Микио Сато, обобщенные функции представляют собой прежде всего некоторые группы относительных когомологий определенных пространств [2].

Поэтому есть все основания ожидать, что рано или поздно надо переформулировать всю современную абстрактную теорию поля с точки зрения какой-то, совсем не тривиальной топологии. Именно на этом пути, по нашему мнению, произойдет очень важный для судеб дальнейшего развития физической науки процесс ее математической модернизации. Он затронет прежде всего ее очень старые понятия (например, причинность) и позволит их выразить на точном, однозначном и недвусмысленном языке современной математики — так, что

бы они стали применимыми к объектам огромной информационной емкости.

Понятие причинности в этом отношении, кажется, вплотную подошло уже в новейших работах по пучкам алгебр фон Неймана над физическим пространством к своей более или менее современной формулировке как свойства когерентности определенных алгебраических и одновременно аналитических пучков. Как раз здесь можно ожидать «второго рождения» таких методов, как дисперсионные соотношения или комплексные угловые моменты, которые станут благодаря этой математической модернизации применимыми к физическим объектам огромной информационной емкости.

Известный «кризис жанра» в этих направлениях исследований в последние годы был обусловлен, видимо, тем немаловажным обстоятельством, что они формулируются пока что лишь в рамках традиционной физической схемы объектов обычной информационной емкости. А в то же время абстрактная теория поля или все самые различные теоретико-групповые методы с самого начала строятся как теории объектов огромной, экспоненциальной информационной емкости — пусть неявно, не всегда осознанно или, во всяком случае, уж не сознательно. И поэтому, поскольку физика все более и более погружается в мир этих принципиально новых объектов, эти два направления в известном смысле «процветают» в последние годы, в то время как «дисперсионщина», «полусология» и «реджистика» вышли из моды.

Математическую базу модернизации всех этих последних направлений должны составить, по нашему мнению, новейшие «бурбакистские» методы теории функций многих комплексных переменных, основанные на понятии пучка ростков аналитических функций над данным пространством, когомологий последнего с коэффициентами в этом пучке, когерентности пучков при определенных отображениях и т. д. Здесь, по-видимому, могут быть установлены весьма глубокие связи с теоретико-групповыми методами исследования новых симметрий элементарных частиц — благодаря общим теоремам соответствия Серра, которые устанавливают далеко идущие изоморфизмы теорий, изучающих «алгебраические» свойства объектов огромной информационной емкости, и теорий, исследующих поведение связанных с этими объекта-

ми голоморфных и мероморфных функций многих комплексных переменных (знаменитые ГАГА-теоремы Серра).

Именно на этом пути, кажется, можно ожидать установления новых и строгого доказательства старых свойств аналитичности амплитуд рассеяния,— благодаря существованию общих теорем двойственности Серра — Гротендика, позволяющих по алгебраическим группам когомологий определенного ранга делать заключение о группах когомологий дополнительного ранга, вычисленным с помощью пучков аналитических функций. Огромное значение будет иметь здесь выявление совсем недавно А. Гротендиком очень интересного когомологического смысла понятия вычета, играющего столь большую роль во всех физических теориях, использующих свойства аналитичности некоторых функций [3].

Но этот процесс математической модернизации старых методов теории элементарных частиц будет только одной стороной более широкого и глубокого процесса такой модернизации всей физической науки и прежде всего ее наиболее глубоких понятийных, концептуальных основ. Самые радикальные, поистине революционные преобразования всего нашего физического способа «видения» мира будут здесь связаны, по-видимому, с когомологической модификацией и пополнением основных аксиом абстрактной теории поля; с модификациями и пополнением, учитывающими совершенно новые, топологические свойства материи на уровне ее организации в виде элементарных частиц.

Пока что, как известно, основные аксиомы абстрактной теории поля почти все являются всего лишь некоторыми ограничениями (причем в большинстве случаев далеко еще не ясно, насколько эти ограничения корректно сформулированы). А из одних ограничений новая фундаментальная физическая теория еще никогда не вырастала — для создания таковой всегда нужны были прежде всего какие-то совершенно новые, не тривиальные физические идеи. И Ньютон, и Максвелл, и Лоренц, и Планк, и Эйнштейн, и Бор, и де Бройль, и Гейзенберг, и Дирак шли именно по этому пути.

Рано или поздно физике придется искать какую-то обобщенно-пространственную интерпретацию новых

групповых свойств симметрии элементарных частиц, и, по нашему мнению, для объектов экспоненциальной информационной емкости это возможно только на языке абстрактных схем и предсхем Гротендика — они выступают некоторым современным аналогом, довольно отдаленным, правда, общей теории абстрактных многомерных пространств математики прошлого века, сыгравших столь существенную роль в построении основных физических теорий того времени [4].

И точно так же как веками и вместе с тем с детства воспитанная наглядная интуиция очень долго мешала физикам того времени представить и изучить в чистом виде, скажем, шестимерное фазовое пространство механики, так и в наше время надо будет довольно долго привыкать к несравненно более абстрактным и ненаглядным «пространствам» предсхем и схем Гротендика, «осваиваться» в работе с ними. Это ведь очень необычно устроенные объекты.

Если в обычных пространствах координатный метод Декарта позволяет сопоставить, например, геометрической траектории материальной точки некоторое уравнение, то в этих пространствах огромной информационной емкости, вообще говоря, уже нельзя ввести никакое подобие координат.

Метод Декарта здесь уже не «работает». Место координат занимают так называемые гомологии и когомологии — это, так сказать, «закрученные» и «перекрученные» остатки координатных осей, своего рода единственные остающиеся «колышки», «опорные столбы» в пространствах неэвклидовой и негильбертовой информационной емкости. На них мы можем теперь единственно надеяться «вешать» какие-то совершенно новые математические соотношения, характеризующие материальное движение в области очень малых расстояний и соответственно очень больших энергий.

Ситуация действительно очень тяжелая: координат — нет, расстояний — нет, надо искать какие-то их очень абстрактные, не наглядные заменители. «Летят», по-видимому, все наши самые основные физические понятия, которые мы впитали на первых уроках физики, так сказать, с нашим первым «физическим молоком», и которые с тех пор незримо присутствуют уже в любом нашем физическом умозаключении. Например, понятие «внут-

ри» — его, по-видимому, просто нет в мире элементарных частиц: ведь оно существенно основано на обычной, классической топологии «вырезания» подмножества из множества, а фейнмановская формулировка квантовой теории строго доказывает, что в микромире реально имеет место совсем иная топология — топология Гротендика.

Понятие «внутри» также фундаментально связано до сих пор с понятием линейной зависимости, прямой пропорциональности, которая также со времен Галилея, Гука и Ньютона составляет довольно существенную часть того, что называют «духом» физики, физическим смыслом какого-то явления или соотношения. Вспомните опять же первые уроки физики или даже арифметики: их абсолютно нельзя даже представить себе без прямой пропорциональности, линейной зависимости — это показывает, насколько глубоко присуще нашей интуиции это понятие.

И с ним также придется распрощаться в мире наших объектов огромной информационной емкости: его место займут так называемые точные последовательности — обобщения этой самой линейной зависимости на наш случай, а в более сложных ситуациях — еще и спектральные последовательности. Точную последовательность образуют группа, ее подгруппа и ее факторгруппа по этой подгруппе. Современные попытки просто «умножить» группу Лоренца на новые группы симметрии сильных взаимодействий являются своеобразным аналогом поисков Галилеем условий, в которых характеристики движения тел являются простыми линейными функциями времени (которое ему приходилось измерять по ударам собственного сердца). Он и Ньютон нашли в конце концов, как известно, что причиной отклонений от линейности изменений со временем координат движущихся тел являются некоторые силы. Нам также еще предстоит искать и искать, почему нельзя просто «перемножить» между собой группу Лоренца и новые унитарные группы симметрии.

Этому мешают какие-то новые «силы», но они действуют, и их закономерности можно сформулировать, вероятно, только в достаточно емких информационно пространствах современной алгебраической геометрии — теории предсхем и схем Гротендика, теории алгебраиче-

ских и аналитических когерентных пучков над ними и т. п.

Нам кажется, что новейшие теоретические исследования Л. Мишеля по расширениям группы Лоренца и М. Фрауссара, П. Федербуша и других по гомотопиям диаграмм Фейнмана, а также более старые работы Ч. Мизнера по когомологиям замкнутых, несвязных пространств Эйнштейна как раз вплотную подходят к такого рода надделению физическим смыслом некоторых из почти неисчерпаемого запаса самых странных и «экзотических» пространств, которые может поставить теории элементарных частиц современная алгебраическая топология.

Перечисленные выше работы убедительно показывают, что будущая теория субмикропроцессов вряд ли будет теорией некоторых уравнений,— этот последний способ формулировки физических закономерностей безнадежно устарел в наше время; он способен отразить слишком малое количество информации. Будущая общая теория элементарных частиц будет, грубо говоря, надделенной физическим смыслом алгебраической топологией (подобно тому, как постулаты квантовой механики составляют не что иное, как надделенные физическим смыслом постулаты теории гильбертовых пространств). И основную роль в этой теории будут играть не уравнения, а, по-видимому, так называемые спектральные последовательности — определенные последовательности групп, которые характеризуют «устройство» (спектр) топологических пространств — то, по какому закону примыкают, прилегают друг к другу все, самые разнообразные типы и разновидности их подмножеств.

Вопрос относительно реальной топологии физического пространства на очень малых расстояниях — это вопрос относительно того, как на самом деле выделяются, фиксируются в нем любые, сколь угодно малые подмножества некоторого множества. До самого недавнего времени (1956—1962 гг.) наука знала всего лишь одну топологию — классическую, тривиальную топологию «вырезания», в которой выделение определенного подмножества производится как бы его «вырезанием» из данного множества, а образование пересечения двух подмножеств — последовательным проведением друг за другом таких вырезаний, соответствующих последовательному

выделению таким способом каждого из исходных подмножеств в отдельности.

Талантливейший математик современности — по мнению многих, даже математик № 1 наших дней — Александр Гротендик впервые за много веков развития своей науки смог придумать на рубеже середины нашего столетия совершенно новую топологию — топологию определенных отображений и произведений, топологию Гротендика [5]. Он использовал при этом давно известные свойства «двойственности», грубо говоря, «взаимозаменяемости» друг другом в определенных условиях вырезаний и некоторых отображений. Оказывается, все построения, весь алгебраический аппарат обычной топологии (когомологии и т. д.) остаются в полной силе, если всюду предположить совершенно радикальное изменение в интерпретации самой топологии — вместо вырезаний всюду иметь в виду уже некоторые отображения задаваемых, фиксируемых подмножеств. Тогда уже пересечение двух подмножеств должно задаваться их определенным прямым произведением.

Вот здесь мы и приходим к предположению, что в микромире, на расстояниях порядка одного ферми (10^{-13} см), происходит переход от обычной топологии вырезания микромира к принципиально новой топологии отображений Гротендика. Дело ведь в том, что в достаточно малых «подмножествах» реального физического пространства микромира, на достаточно малых расстояниях от данной частицы, всегда возможно появление виртуальных частиц (одиноких или пар, в зависимости от их электрического или барионного заряда). Тем самым «очень малые» подмножества реального физического пространства получают отображение в некоторое новое гильбертово пространство состояний с новыми базисными ортами, характеризующими возможность «наличия» новых виртуальных частиц.

Перед нами — типичная топология Гротендика: все более и более уменьшающиеся подмножества задаются не «вырезаниями», а некоторыми отражениями в пространства состояний виртуальных частиц все большей и большей массы. Пересечения же этих очень малых (менее 1 ферми в «диаметре») подмножеств задаются уже прямым произведением соответствующих пространств виртуальных состояний.

Изучение топологий Гротендика серьезными математическими средствами еще только начинается, но уже получен ряд очень интересных результатов. Так, сам Гротендик и молодой американский математик Майк Артин получили нечто вроде принципа соответствия для новой топологии: при выполнении определенных условий (физический смысл которых еще надо исследовать и исследовать) топологию отображений можно свести к классической, тривиальной топологии вырезаний. Американец Стив Шатц получил очень важные теоремы двойственности для кохомологий в новой топологии и показал, что, вообще говоря, объекты, обладающие топологией Гротендика, ведут себя довольно патологически — их так называемая кохомологическая размерность почти всегда равна бесконечности. Этот результат принципиально важен для физики: именно такова же кохомологическая размерность пространства всех путей из начальной точки в конечную Фейнмана.

Качественно весьма своеобразную, принципиально отличную друг от друга природу могут иметь пространства сильных, слабых, электромагнитных и гравитационных взаимодействий и в отношении их чисто теоретико-множественных свойств. Мы имеем здесь в виду поведение соответствующих вакуумов в отношении выполнимости или невыполнимости в них знаменитой континуум-гипотезы Георга Кантора.

Как известно, совсем недавно молодой американский математик Поль Козн доказал совершенно строго предположение Курта Геделя, сделанное им в 1947 г., о том, что континуум-гипотеза никак не зависит от аксиом теории множеств и должна добавляться к ним в качестве дополнительного постулата. Тем самым с континуум-гипотезой повторяется история, случившаяся в прошлом столетии со знаменитым постулатом о параллельных: Лобачевский, Больяи, Гаусс и Риман, показав возможность геометрий, в которых он не выполняется, тем самым, как известно, перевели проблему параллельных из ранга чисто математических проблем в ранг проблем физических, и Гаусс даже надеялся решить ее сам чисто экспериментальным путем. Это удалось сделать только столетие спустя — благодаря созданию общей теории относительности и ее экспериментальной проверке во время солнечных затмений.

В наше время совершенно аналогичная ситуация может случиться и в общей теории элементарных частиц: для одних взаимодействий между счетной бесконечностью и континуумом могут оказаться существующими еще и промежуточные классы бесконечных множеств, а для других взаимодействий континуум-гипотеза может стать экспериментально проверяемым в этой общей теории фактом — для множеств, возникающих в результате этих взаимодействий, мощности счетной бесконечности и континуума будут непосредственно следовать друг за другом без каких-либо промежуточных «ступенек» бесконечности.

Исторически, кстати говоря, основным стимулом развития Кантором общей теории множеств как раз была его идея о том, что различные виды физических объектов (поле и вещество, тепловые и электромагнитные явления) могут иметь совершенно различные теоретикомножественные свойства, которые он надеялся положить в основу теоретического объяснения качественного своеобразия различных, известных к тому времени разделов физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Акчурина. Развитие понятийного аппарата физики элементарных частиц. — «Вопросы философии», 1966, № 10.
2. Н. Komatsu. — «Math. Ann.», 176, 77—86, 1968.
3. «Residues and duality», ed. R. Hartshorne. Berlin, 1966.
4. Ю. И. Манин. Лекции по алгебраической геометрии. М., 1968.
5. M. Artin. Grothendieck topologies. Harvard, 1962.

В. С. Барашенков

О ВОЗМОЖНОСТИ «ВНЕПРОСТРАНСТВЕННЫХ» И «ВНЕВРЕМЕННЫХ» ФОРМ СУЩЕСТВОВАНИЯ МАТЕРИИ

Когда обсуждается вопрос о возможности «внепространственных» и «вневременных» форм существования материи, необходимо прежде всего иметь в виду, что в настоящее время нет совершенно никаких эксперимен-

тальных оснований говорить о неприменимости пространственно-временных представлений в какой-либо области исследованных нами явлений, вплоть до самых малых достижимых с помощью современных ускорителей расстояний $\Delta x \sim 5 \cdot 10^{-15}$ см и длительностей $\Delta t \sim 2 \cdot 10^{-25}$ сек. В частности, совершенно неверным является утверждение о том, что рождение новых частиц при высоких энергиях делает невозможной пространственно-временную локализацию событий с точностью $\Delta x \sim \lambda$, $\Delta t \sim \lambda/c$ (напомним, что дебройлевская длина волны $\lambda \sim 1/E \rightarrow 0$ когда энергия E возрастает). Наличие неупругих процессов порождает особый тип упругого рассеяния — так называемое дифракционное рассеяние, анализ которого позволяет получить сведения о свойствах явлений в интервалах $\Delta x \sim \lambda$ $\Delta t \sim \lambda/c$.

Если пространство и время понимать как такие формы существования материи, которые выступают как определенное выражение соответственно устойчивости и изменчивости ее бытия, то, поскольку весь мир — движущаяся материя, пространство и время — *всеобщие* формы бытия материи.

Наряду с этим под пространством и временем часто (а в физике — практически всегда) понимают формы, выражающие структурные соотношения *сосуществования* явлений и *смены* состояний. Это предполагает, что на данном материальном уровне имеет смысл различие двух *соседних* точек (объектов) A_1 и A_2 и двух *последующих* моментов (состояний) T_1 и T_2 . Однако свойства «соседства» и «следования» — это конкретные и весьма специфические свойства структуры, которые могут существовать далеко не всегда. С этой точки зрения можно ставить вопрос о «внепространственных» и «вневременных» формах существования материи; микро- и макроскопические формы ее бытия могут существеннейшим образом различаться. Изучение возможных обобщений привычного нам образа пространства — времени представляет собой важную задачу единого философско-физического исследования.

*К ДВУМ ПРОТИВОПОЛОЖНЫМ ВЗГЛЯДАМ
НА ПРОСТРАНСТВО — ВРЕМЯ*

В настоящей дискуссии имели место два противоположных подхода к истолкованию природы пространства — времени. Большинство выступавших признавало всеобщий характер пространственно-временной структуры взаимодействий в материальном мире (Д. И. Блохинцев, В. С. Барашенков, А. А. Тяпкин, В. И. Свидерский, Р. А. Аронов и др.). Отдельные выступающие (И. С. Алексеев и др.) настаивали на макроскопической природе пространства — времени, исключая пространственно-временной характер движения в микромире на том уровне, который исследуется квантовой механикой.

В этой связи нам представляется целесообразным выделить одну сторону проблемы, которая не попала в поле зрения выступавших.

Если соотношение неопределенностей квантовой механики интерпретируется отдельными исследователями в духе отрицания пространственно-временного характера взаимодействий на уровне микромира (Дж. Чу), то общая теория относительности, напротив, истолковывается иногда в духе абсолютизации пространства — времени на уровне макромира (Дж. Уилер).

Ссылаясь на авторитет отдельных зарубежных физиков, И. С. Алексеев, например, утверждает, что пространство — время в микромире играет ту же роль, какую играл эфир в классической физике: их существование нельзя ни опровергнуть, ни доказать.

Если у Дж. Чу пространство — время имеет право на существование лишь в макромире и макровзаимодействиях, то в теории гравитации Уилера пространство — время как бы поглощает собой все многообразие материального мира, не оставляя места реальному существованию масс, полей и их взаимодействий. Заметим попутно, что сам человек в таком случае окажется лишь всплеском пространственно-временной кривизны.

Исключение пространства — времени из взаимодействий микромира, в одном случае, сведение мира к структуре пространства — времени, в другом, несмотря на

свою, казалось бы, взаимоисключающую противоположность, ведут к некоторым общим онтологическим и гносеологическим выводам, а именно — к возведению пропасти между движущейся материей и пространством — временем, к отрыву субстанции мира от всеобщих форм своего существования, или наоборот; кроме того, они ведут к преувеличению роли субъективного момента в представлениях человека об окружающей его действительности, к разделению мира на «вещь в себе» и «вещь для нас», которые между собой не имеют ничего общего.

Рассматриваемые позиции, несмотря на их односторонность и противоположность, по-видимому имеют ряд общих причин. На некоторых из них мы остановимся. Главная, по всей вероятности, состоит в том, что уровень теоретического освоения объективной действительности, достигнутый в современной науке, в физике и астрономии в частности, перестает укладываться в привычную, давно устоявшуюся категориальную структуру, при помощи которой объективная действительность отражается в ее основных, самых фундаментальных чертах. Имеется в виду структура связи таких категорий, как материя, движение, пространство и время.

Попытаемся выдвинутому тезису дать более конкретное обоснование. Если в ньютоновой механике и классической физике абсолютное пространство (при абсолютно равномерном течении времени) в качестве привилегированной системы отсчета, правда, неизвестно каким способом, активно воздействовало на движение материальных систем, вызывая возникновение внутренних сил инерции при ускорении, определяло их конкретные параметры движения, то в теории относительности роли переменились. Состояние движения материальных систем стало определять пространственно-временную структуру взаимодействия и сами свойства пространства — времени.

Далее, в геометродинамике Дж. Уилера ничему не остается места, кроме пространства — времени той или иной структуры; по представлениям И. С. Алексеева, следующего за Дж. Чу, в микромире нет места пространству — времени. При всей странности и взаимоисключаемости этих взглядов они, с нашей точки зрения, выражают собой абсолютизацию мысленного расчленения мира на субстанциальную «начинку» и пространственно-вре-

менной «каркас» (терминология Г. И. Наана), благодаря которой каждая из указанных сторон может рассматриваться не только в отрыве от другой, но и исключать одна другую.

Исторически познание начиналось, видимо, с чувственно-конкретного восприятия мира в его пространственно-временной целостности. Следующим шагом было выделение протяженности тел и длительности процессов в качестве разных сторон природы, каждая из которых существует сама по себе. Только в итоге большого и трудного пути практического и мысленного освоения мира были выработаны, наконец, такие научные абстракции, как материя, движение, пространство и время. Многовековой опыт обращения с этими абстрактными понятиями превратил их в само собой разумеющиеся, привычные категории «здорового рассудка», которые стали входить теперь во все обыденные и научные представления о природе. Человек со временем начинает думать о содержании этих категорий как о некоторых друг от друга независимых элементах объективной физической реальности, а затем пытается уловить их в отдельности при помощи физических экспериментов. Подобные попытки обречены на неудачу по той причине, что в самой природе они сами по себе, вне связи и взаимоопределения, не существуют. Развитие экспериментальной физики не раз нас в том убеждало. Опыт Майкельсона — Морли по установлению скорости движения Земли относительно мирового эфира и абсолютного пространства потому, видимо, дал «отрицательный» результат, что абсолютного пространства вне и независимо от движения материи не существует. Прав был Ф. Энгельс, когда говорил о пространстве и времени, что обе эти формы существования материи без материи суть ничто, пустые представления, абстракции, существующие только в нашей голове.

В природе движущаяся материя (материальное движение) и пространство — время совершенно нераздельны, они находятся не во внешней друг к другу связи, а представляют собою некоторое внутреннее единство и взаимопроникновение. Поэтому, хотя в математических моделях теоретически и можно выражать одно через другое, следует помнить, что здесь огрубляется сложная взаимосвязь пространства — времени с движущейся материей.

Наука в отношении данной проблемы находится, видимо, на крутом повороте и переживает период *восхождения* от абстрактного к конкретному, когда делаются попытки синтезировать представления о «каркасе» и его «начинке». Две затронутые выше концепции и выражают собой попытки (правда, односторонние) преодолеть расчленение мира на две, по сути дела совершенно самостоятельные половины (движущуюся материю и ее пространственно-временную форму бытия) путем поглощения одной из них другой. Они представляют собой некоторые антиномии, которые должны быть сняты на ступени их единства, чему, безусловно, будут мешать как элементы метафизики, так и идеализма. Наряду с рассмотренными, крайними точками зрения вызревает третья, определяющая тенденцию развития физики в направлении установления более тесной связи между так называемой субстанциальной «начинкой» (движущейся материей) и пространственно-временным «каркасом» мира,— точка зрения, на которую настойчиво в своих работах обращает внимание, например, Г. И. Наан (подобную же постановку вопроса можно найти в работах Д. И. Иваненко и др.). Эта объективная тенденция намечается и в ряде философских исследований.

Рассмотрение этой важной, но все-таки частной научной проблемы, наряду с другими вопросами, показывает, что философия выполняет как онтологические, так и гносеологические функции.

У естествознания и философии есть некоторая общая область, область философских вопросов естествознания, которую нельзя отнести к «твоей» или только «моей» области, она — «наша». Разными путями, с разных сторон, при использовании специфических средств исследования, физики и философы должны приходить и в итоге приходят к единым общетеоретическим, методологическим результатам, в которых отражаются как закономерности объективного мира, так и особенности его мысленного освоения.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
-------------	---

Раздел первый

ИСТОРИЯ. ОБЩЕМЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Я. Г. Дорфман. Рождение квантовой механики	5
М. Э. Омеляновский. Идеи диалектики в квантовой физике	19
П. С. Дышлевый. Эволюция понятия «физическая реальность» в современной физике	47
Б. Я. Пахомов. Квантовая механика и познаваемость объективной реальности	67
Б. И. Спасский. Существует ли необходимость в использовании понятия «физическая реальность»?	79
А. М. Мостепаненко. «Дополнительность» в смысле Пуанкаре и квантовомеханическое описание	81
П. С. Исаев. Еще раз об объективной реальности и причинности	85

Раздел второй

ДЕТЕРМИНИЗМ И ВЕРОЯТНОСТЬ В КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

Ю. В. Сачков. Квантовая механика и природа вероятности	87
В. И. Куцзов. О характере вероятностных представлений в физике	97
В. С. Готт, А. Ф. Перетурич . О некоторых философских предпосылках определения физического смысла волновой функции	109
Б. М. Барбашов. Фейнмановский континуальный подход к квантовой механике	131
А. А. Тяпкин. К развитию статистической интерпретации квантовой механики на основе совместного координатно-импульсного представления	139

<i>Л. Г. Антипенко.</i> О сущности редукции волновых пакетов в свете законов сохранения энергии и импульса	180
<i>Н. М. Роженко.</i> Понятие вероятности и квантовая логика	184
<i>А. С. Кравец.</i> О природе вероятности	186

Раздел третий

ПРОБЛЕМЫ СТРУКТУРЫ И СИММЕТРИИ КВАНТОВЫХ ОБЪЕКТОВ

<i>В. С. Барашенков.</i> Современное состояние проблемы структуры элементарных частиц	188
<i>В. С. Готт,</i> <u><i>А. Ф. Перетури</i></u> <i>н.</i> Категории симметрии и асимметрии и физика микромира	206
<i>И. Т. Тодоров.</i> О групповом подходе в теории элементарных частиц	217

Раздел четвертый

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ФИЗИКЕ МИКРОМИРА

<i>Р. А. Аронов.</i> Проблема пространственно-временной структуры микромира	226
<i>И. С. Алексеев.</i> Пространство и квантовая механика	230
<i>И. А. Акчурин.</i> Информационная емкость и микромир	240
<i>В. С. Барашенков.</i> О возможности «внепространственных» и «вневременных» форм существования материи	248
<i>Л. Я. Станис.</i> К двум противоположным взглядам на пространство — время	250

ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

*Утверждено к печати
Институтом философии АН СССР*

Редактор *А. Г. Теников*
Художник *А. А. Кущенко*
Технический редактор *Н. Ф. Егорова*

Сдано в набор 27/XI 1969 г. Подписано к печати
10/IV 1970 г. Формат $84 \times 108^{1/32}$. Бумага № 1.
Усл. печ. л. 13,44. Уч-изд. л. 13,2. Тираж 7600.
Т-06717. Тип. зак. 5918.

Цена 1 р. 03 к.

Издательство «Наука». Москва К-62, Подсосен-
ский пер., д. 21. 2-я типография издательства
«Наука». Москва Г-99, Шубинский пер., 10

СПИСОК О П Е Ч А Т О К

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
115	10 сн.	Об объективной	⁴ Об объективной
125	14 св.	общей формой	в общей форме
138	9 сн.	$\dot{x}^2$	$\dot{x}^2$
164	7 сн.	$p(q)$	$p(q)$
189	5 сн.	Е. М. Лившица	Е. М. Лифшица
201	8 сн.	$+N$	$+\bar{N}$
219	6 сн.	имеют	имеют вид