

ДОПОЛНЕНИЕ¹

Ряд положений квантовой механики чрезвычайно сильно отличается от того типа положений, к которым мы привыкли в классике. Это отличие настолько велико, что часто говорят о новом физическом мировоззрении. Я хотел бы уже сейчас отметить (к этому я вернусь ниже), что, по моему мнению, *принципы* построения квантовой теории, или, если так можно выразиться, структура той рамы, которой квантовая теория обрамляется, та же, что и в любой другой физической теории. Но нельзя отрицать, что структура самой картины весьма отлична от классики, и утверждение, что мы здесь имеем дело с новым физическим мировоззрением, вряд ли можно считать преувеличением. Именно поэтому небезынтересно постараться, во-первых, проанализировать те моменты, которые определяют новизну квантовой концепции, и, во-вторых, уяснить себе связь между отдельными ее положениями. Такой анализ, мне кажется, не лишен интереса и сам по себе. Но, кроме того, он дает ответ на следующий вопрос, который всегда возникает и, естественно, должен возникать. Это вопрос относительно того, насколько тесно связаны те стороны теперешней, фактически построенной квантовой теории — я имею в виду в основном нерелятивистскую теорию, — которые обуславливают ее бесспорную силу и громадное значение для решения конкретных проблем, с теми ее общими положениями, которые придают ей ее революционный характер. Среди физиков встречается мнение, что эти последние лишь провизорны и что в будущем удастся, не нарушая действительности квантовой теории, свести ее общие положения к положениям классического типа. Ответ на поставленный выше вопрос должен внести здесь ясность.

Я хотел бы указать, что этот вопрос по существу был поставлен и разрешен Нейманом. Результаты его работы обычно приводят без доказательства и в чрезвычайно схематичной форме. Например, говорят, что Нейман *доказал* невозможность построения физической теории на детерминистической основе. По моему мнению, такая и ей подобные формулировки мало что говорят. Так как, насколько я могу судить, исследования Неймана мало известны, то я считал бы не бесполезным вернуться к этому и аналогичным вопросам. Базируясь в основном на работах Неймана, я, однако, в ряде доказательств, а также в выборе для рассмотрения тех или иных вопросов не всегда буду придерживаться его изложения.

Но предварительно я хотел бы сделать следующее замечание. Квантовая теория, во всяком случае в ее современном виде, по

¹ [См. примечание на стр. 325.]

существо теории атомистическая в том смысле, что она относится к явлениям в микромире, которые, согласно атомистической гипотезе, лежат в основе явлений макромира. Здесь не место останавливаться на вопросе о том, почему мы кладем в основу физического мирозерцания именно атомистическую теорию. Несомненно, что в настоящее время атомизм считается обоснованным больше, чем когда бы то ни было прежде, и по этому поводу никаких вопросов, вообще говоря, не возникает. Возражение вызывает лишь отсутствие в относящейся к микромиру квантовой теории того, что называется наглядностью. Это отсутствие наглядности есть одна из причин, заставляющих иногда считать всю квантовую концепцию, как это уже указывалось выше, провизорной. Однако, на мой взгляд, эта точка зрения весьма поверхностна и основана на недоразумении. Не «ненаглядность» сама по себе придает квантовой теории ту новизну, специфичность и то отличие от классики, о которых идет речь в дальнейшем.

По поводу отсутствия наглядности я хочу все же заметить следующее. Понятие наглядности вообще чрезвычайно условно. В него входят, по существу, два элемента. Во-первых, чтобы что-нибудь было наглядно, оно должно быть привычно; в этом и лежит условность этого понятия. Затем необходимо, чтобы наглядная концепция связывалась с вещами, могущими быть непосредственно чувственно воспринятыми.

Вообще говоря, нет никакого основания требовать от новой теории, чтобы она удовлетворяла этим двум условиям. Насколько такого рода требование не обоснованно, с одной стороны, и подвержено эволюции — с другой, хорошо видно на известном примере развития классических теорий. Здесь механические явления были прежде других изучены, сделались привычными. Эти же явления легко воспринимаются зрением, осязанием и т. д. И вот, начиная примерно со времен Ньютона, ко всякой теории, хотя бы она относилась уже явно к немеханическим явлениям, как-то: к оптической теории, теории тепла и т. д., — предъявлялось требование наглядности, выражавшееся в конечном счете в требованиях сведения оптических, тепловых и т. д. явлений к явлениям механическим. В своем знаменитом «*Traité de la lumière*» Гюйгенс, например, писал: «... au moins dans la vraie philosophie, dans laquelle on conçoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mécanique. Ce qu'il faut faire à mon avis, ou bien renoncer à toute esperance de ne jamais rien comprendre dans la physique». (Изд. Gautier-Villars, 1920, стр. 3)¹.

¹ [«... по крайней мере в истинной философии, в которой источник всех явлений природы усматривают в механических причинах. На мой взгляд, это и нужно делать или же отказаться от всякой надежды когда-либо понять что-нибудь в физике.»]

Ньютон в предисловии к первому изданию «Principia» говорит (перевод А. Н. Крылова, стр. 3): «Было бы желательным вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел вследствие причин, покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы не известны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы и остались бесплодными». То, что Ньютон имеет здесь в виду и световые явления, становится ясным в отделе XIV первой книги «Principia», где он подробно излагает с этой точки зрения отражение и преломление света, а в отделе VIII второй книги опять упоминает о свете в связи с теорией распространения волн.

И в XX в. лорд Кельвин говорил, что для него понять физическое явление — значит построить механическую его модель.

Если вдуматься в это требование, которое казалось естественным в течение ряда веков, то трудно найти для него какое бы то ни было обоснование. Действительно, теоретическая механика — по существу это механика Ньютона — это система некоторых определенных дифференциальных уравнений второго порядка между математическими величинами (x, y, z, t) в связи с рецептами для сопоставления этих величин с физическими объектами.

И то и другое, т. е. и указанные выше специальные дифференциальные уравнения, и специальные рецепты, приурочено к определенному классу явлений, именно к тем, которые мы называем механическими, т. е. к явлениям, связанным с перемещениями, скоростями и т. д. макроскопических тел.

Оптические, тепловые и другие явления заведомо в этот класс не входят. Весьма естественно, что и для этих явлений могут быть построены теории по такому же принципу, как и в механике, т. е. могут быть найдены математические соотношения между некоторыми величинами в связи с рецептами измерений соответственных величин. Но совершенно не очевидно, и более того — маловероятно, чтобы эти соотношения, например дифференциальные уравнения, регулирующие оптические явления, были тождественны с механическими уравнениями Ньютона. А ведь именно на это сводится требование «наглядности», т. е. механического объяснения оптических и других явлений¹.

И действительно, как известно, в классике от такого требования, которое является чистым предрассудком, отказались совер-

¹ Известное замечание, что в конце концов все наши измерения сводятся на констатацию пространственных и временных совпадений, к этим вопросам непосредственного отношения не имеет.

пенно. Пример — максвелловская теория электромагнитных и оптических явлений.

Я думаю, всякий физик теперь согласится с тем, что максвелловская теория автономна (она вполне удовлетворяет тем требованиям, которые мы разумным образом к теории можем предъявлять), мы к ней привыкли и никакой дальнейшей дополнительной наглядности, как-то: сведения на механику, которое оказалось невозможным, — не требуем; в этом смысле мы считаем ее совершенно равноценной механике Ньютона.

Возвращаясь к квантовой механике, мы видим, что здесь повторяется *mutatis mutandis*, аналогичная ситуация. Прежняя, доквантовая, классическая атомистика молчаливо всегда предполагала (по-видимому, в угоду наглядности), что в микромире справедливы те же соотношения, какие воспринимаются нами в макромире. Те, кто жалуется на «ненаглядность» квантовой механики, полагают, по-видимому, справедливым требование, чтобы этому пути следовала атомистическая теория, и считают недостатком квантовой теории то, что она по этому пути не идет. Я думаю, это неправильно. Не недостатком, а достоинством квантовой механики следует считать то, что она порвала с предрассудком о тождественности закономерностей в микромире и закономерностей в макромире и тем самым и с предрассудком о желательности «наглядности» в описании явлений в микромире.

Всякая атомистическая теория, в том числе и квантовая, ставит себе в основном задачу объяснить наблюдаемые закономерности в макромире искомыми закономерностями в микромире. Почему такое сведение нас удовлетворяет, почему мы его называем объяснением процессов макромира, — это другой вопрос. На нем я останавливаться здесь не могу. Скажу только, что, по моему мнению, для такой точки зрения веские основания привести можно. Но как бы там ни было, а из этой формулировки задачи мы должны исходить. Нельзя отрицать, что атомная теория может в известном смысле, по крайней мере частично, решать эту задачу и в том случае, если эта теория исходит из положения, что атомы и молекулы подчиняются тем же законам, как и макротела, т. е., например, что они упруги, что для них справедливы законы движения Ньютона и т. д. На этой основе строилась, например, классическая кинетическая теория газов. Правда, нужно оговориться, что кинетическая теория газов вводит существенные статистические *дополнительные* предположения, которые чужды механике Ньютона (по и на этом вопросе я сейчас останавливаться не буду). Как бы там ни было, *предполагалось*, что для молекул справедлива механика Ньютона и что в основном она определяет явления.

Нельзя, конечно, отрицать, что классическая кинетическая теория дала много интересных результатов. Но, с другой стороны,

нужно признать, что всякая атомистическая теория, оперирующая в качестве молекул или атомов объектами, которым приписываются свойства и поведение макротел, не может быть признана удовлетворительной. Мы ведь ставим себе в этих теориях задачу — объяснить свойства и поведение макротел поведением и свойствами конституирующих их микротел. Но тогда непоследовательно этим последним приписывать свойства, которые мы намереваемся объяснить.

Если же — и это делает квантовая теория — признать, что микротела подчиняются другим законам, чем макротела, для объяснения свойств которых эти микротела вводятся, такой regressus¹ по существу ad infinitum² отпадает. Конечно, можно и здесь спросить себя, нельзя ли ввести в рассмотрение дальнейшие микро-микротела. Однако никакой необходимости в такой постановке вопроса здесь уже нет, в то время как при доквантовой постановке она неизбежно возникает.

Резюмируя, можно сказать следующее.

Уже в классике долго держался предрассудок, что задача теоретической физики заключается в сведении всех явлений к механическим. Мы видели, что это действительно не что иное, как предрассудок, возникший благодаря тому, что механические явления были раньше других изучены и поэтому более привычны.

Как и следовало ожидать, механическая интерпретация оптических, электромагнитных и других явлений фактически оказалась невыполнимой. Мы привыкли, например, к максвелловской теории и уже никакой потребности в таком сведении не ощущаем.

По отношению к квантовой теории ситуация аналогична. Выставляется требование свести законы микромира на привычные классические законы, относящиеся к макромиру. Это требование, переходящее в конечном счете в требование, чтобы здесь были справедливы те же дифференциальные уравнения и те же рецепты перехода к физическим объектам, как в классике, так же беспочвенно, как было беспочвенно требование свести оптику на механику. Более того, не только нет оснований считать такое сведение возможным, но, наоборот, есть основание считать его, если бы оно даже было возможным, неудовлетворительным.

Итак, сам факт отличия квантовых законов от классических не требует оправдания. Отличие естественно и ни в коем случае не есть минус теории.

Совершенно другой вопрос: насколько отличаются и отличаются ли вообще общие принципы построения квантовой теории от тех принципов теоретико-познавательного характера, которые ле-

¹ [Процесс сведения.]

² [Продолжающийся до бесконечности.]

жали в основе физических теорий классического периода? На этот вопрос, о котором я упомянул в самом начале, мне кажется, нужно ответить отрицательно.

Всякая физическая теория может быть расчленена на следующие этапы.

Прежде всего теория вводит, в зависимости от той или иной области физических явлений, к которым она относится, те или иные математические величины. Например, в механике такими величинами являются координаты, скорость, время и т. д.; в учении о теплоте — температура, количество тепла, энтропия и пр.; в электродинамике — электрическое и магнитное поля. Между этими величинами устанавливаются математические соотношения, например, в виде дифференциальных уравнений: механические уравнения Ньютона, электродинамические — Максвелла. Этот этап, который иногда сам по себе носит название физической теории, ею ни в коем случае не является, так как вообще не содержит никаких высказываний, относящихся к физическим явлениям.

Второй этап состоит в сопоставлении математических величин с физическими объектами. Это достигается тем, что для каждой величины дается определенный рецепт, указывающий, при помощи какого приема мы можем данному физическому объекту сопоставить то или иное численное значение этой величины. Мы называем это рецептом измерения данной физической величины. Наконец, те же рецепты служат для обратного перехода от новых значений величин, полученных из первых при помощи указанного выше формального математического аппарата, опять к физическим объектам.

Пример лучше всего пояснит сказанное. Мы измеряем, например, положение планеты в данный момент времени. Рецепт таков: мы отсчитываем соответственные деления лимба трубы, когда пересечение окулярных нитей совпадает с данной планетой, и одновременно положение стрелки часов, т. е. мы определяем значение угловых координат в данный момент времени. Затем мы подставляем полученные таким образом числа в соответственные уравнения в качестве начальных условий. Уравнения дадут нам новые совместные значения координат и времени (t , φ , ψ). Высказывание теории заключается в утверждении, что, установив трубу соответственно с полученными из этих уравнений значениями делений кругов, мы увидим планету на пересечении нитей одновременно с прохождением стрелки часов через число на циферблате, равное t .

Только совокупность всех указанных этапов и составляет теорию.

Формализм, т. е. математические соотношения между символами, сами математические символы и рецепты сопоставления их с физическими объектами от теории к теории различны; но указан-

ные этапы и их совокупность характерны для всякой теории. Под эту структуру подходит и классика, и квантовая теория.

На одно, правда, принципиально мало² существенное различие я хотел бы еще указать. Исторически в классике установление рецептов измерения значений величин обычно предшествовало установлению формализма, т. е. уравнений. Больше того, мы так сжились с этими рецептами издавна, что почти не замечаем их условности и принципиального значения. Поэтому-то их часто вовсе не причисляют к составным частям теории, что, конечно, как сказано, ошибочно. В противоположность этому в современной теоретической физике и особенно в квантовой теории рецептурная часть гораздо менее привычна и занимает большее место.

Более того, в современной теории квантов дело обстоит исторически так, что на основании некоторых довольно расплывчатых соображений установили сначала формализм — я имею в виду уравнение Шрёдингера — по отношению к некоторому символу, к так называемой функции ψ . И только после этого поставили себе вопрос: какой нужно дать рецепт для сопоставления ψ объектам природы? Как известно, современный рецепт этой связи был установлен не сразу, а только после некоторых проб, оказавшихся неудачными.

После этих предварительных замечаний, которые, как мне кажется, дают некоторую характеристику того положения, которое занимает квантовая теория как физическая теория вообще, без учета специфичных, присущих специально ей сторон, я хотел бы перейти к намеченным вначале проблемам, касающимся как раз тех сторон квантовой концепции, которые так резко отличают ее от всех предыдущих теоретических концепций.

Подойти к основным вопросам квантовой механики можно с различных сторон. Для нашей цели лучше всего обратиться — причина этого будет видна дальше — к историческому развитию квантовой теории, или, вернее, к той ее черте, которая впервые была выдвинута Планком и определила сразу же совершенно своеобразную ее структуру. Я имею в виду утверждение о дискретности возможных значений энергии данной механической системы (например, линейного осциллятора), могущей с точки зрения классической механики обладать непрерывной последовательностью энергетических состояний. Планк, как известно, впервые выдвинул квантовую гипотезу в вопросе о черном излучении; ею воспользовался Эйнштейн в проблеме удельных теплот твердого тела и, наконец, Бор — в вопросе о спектральных сериях. В этих трех фундаментальных для физики вопросах, абсолютно не укладывающихся в рамки классических воззрений, гипотеза о дискретности допустимых состояний механической системы впервые дала возможность внести ясность и получить удовлетворительное, во

всяком случае в принципиальном смысле, согласие между теорией и опытом.

С другой стороны, хорошо известно, что в основных проблемах, связанных с колебаниями, например с колебаниями струн, мембран и т. д., мы имеем дело с дискретной последовательностью возможных частот. Математический формализм этих явлений, вытекающий из ньютоновских уравнений движения, хорошо изучен, — это так называемые краевые задачи. Сводится дело на то, что физический объект — «частота» — сопоставляется с собственными значениями определенных дифференциальных операторов.

Дальнейший этап — математический факт, состоящий в том, что при известных «краевых» условиях собственные значения оператора составляют дискретную последовательность. Шрёдингер сопоставил удачу гипотезы о дискретности энергетических состояний систем микромира и наличие готового математического аппарата, естественным образом выделяющего дискретную последовательность чисел. Ему пришла в голову мысль воспользоваться с соответствующими изменениями этим аппаратом для создания общей теории микросистем. Его первые основные работы соответственно этому озаглавлены: «Die Quantisierung als Eigenwertproblem»¹.

В свете того, что было сказано выше о структуре физической теории, дело обстоит так. В математических соотношениях, лежащих в основе проблемы собственных значений, типично естественное выделение дискретной совокупности чисел. В классике с этим математическим аппаратом были связаны величины, относящиеся к проблемам колебаний макротел. Шрёдингер постулировал положение, что теми же (с некоторыми изменениями) соотношениями связаны и совершенно другие величины, а именно, величины, относящиеся к поведению микросистем.

В эти математические соотношения входит ряд величин: собственные значения операторов, собственные функции и т. д. Шрёдингер постулировал далее, что некоторый определенный линейный дифференциальный эрмитов оператор соответствует энергии, а его собственные значения соответствуют возможным ее численным значениям. Уже этого, т. е. вида операторов, для некоторых «моделей» атома было достаточно, чтобы выявилась плодотворность такого построения. При этом вопрос о том, какое же содержание имеют другие математические величины, оставался открытым. Дальнейшее развитие теории, коротко говоря, состояло в следующем: был введен постулат, согласно которому не только энергии, но и другим физическим величинам сопоставляются определенные эрмитовы операторы (координате q — умножение

¹ [Квантование как задача о собственных значениях.]

на q , импульсу — оператор $\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial q}$ и т. д.) в сочетании с определением, что их собственные значения отвечают возможным значениям соответственной физической величины.

Конечно, спектр собственных значений как самой энергии, так и других величин, вообще говоря, не всегда дискретен. Есть случаи, когда и энергия может принимать непрерывную последовательность значений. Таким образом, произошло естественное расширение квантового формализма, которое и придало всей теории необходимую общность.

Следующий шаг состоял в постулате: состояние системы определяется некоторой нормированной к единице функцией от q и t , $\psi(q, t)$ [где q — спектр (непрерывный) оператора «координата», t — параметр], которая следующим образом связывается с физическими объектами. По определению, вероятность застать в момент времени t значение данной физической величины, равное i -му собственному значению соответствующего этой величине оператора, равняется квадрату коэффициента при i -ой собственной функции в разложении ψ по собственным функциям оператора.

Наконец, последний шаг, завершающий математическую часть теории, состоит в указании того дифференциального уравнения, которому подчиняется $\psi(q, t)$ как функция от q и t . Это уравнение — временное уравнение Шрёдингера — позволяет определить состояние системы в момент времени t , если задано состояние (т. е. ψ) в момент $t = 0$. Наряду с состояниями, определяемыми волновой функцией, так называемыми чистыми случаями, рассматриваются и другие совокупности — так называемые смеси. К этому формализму присоединяются рецепты для измерения значений соответственных величин в данный момент времени.

Таким образом, если сравнить структуру математической части квантовой теории с математической частью классической механики, то можно приблизительно сказать следующее. Сопоставление физических величин линейным операторам вместе с указанным выше толкованием их собственных значений и функций соответствует в классике тривиальному положению, сопоставляющему каждому значению физической величины определенное число.

Временное уравнение Шрёдингера соответствует в классике уравнениям движения, например уравнениям Ньютона.

Из изложенной здесь чисто схематически теории выводится уже чисто формальным путем ряд следствий, некоторые из которых имеют несомненно принципиальное значение. Одно из таких следствий — это соотношение неопределенностей Гейзенберга.

Из вышеизложенного ясно, что величины квантовой механики относятся не к индивидуальным случаям, а к совокупностям. Соотношение неопределенностей Гейзенберга показывает, что кван-

товомеханический формализм не противоречив только в том случае, если совокупности обладают некоторым свойством, а именно тем, что между стандартом импульса и стандартом координаты существует неравенство

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Иными словами, в теории отрицается содержательный смысл каких бы то ни было высказываний относительно таких совокупностей, в которых одновременно координата и импульс имеют определенное значение.

Классическая теоретическая механика в противоположность этому имеет дело преимущественно с индивидуальными явлениями, или, что в конце концов то же самое, с совокупностями, в которых обе величины — q , и p — имеют одновременно вполне определенные значения.

Мы склонны придавать этому различию огромное значение (оно-то и заставляет нас говорить о новом физическом мировоззрении). Для пояснения я хотел бы сказать следующее. Конечно, и в макромеханике у нас нет возможности практически создать такую совокупность опытов, чтобы в каждом из них точно повторялись начальные значения координат и импульсов. Поэтому мы и не ожидаем, что при помощи уравнений движения мы сможем *точно* предсказать координаты и импульсы в какое-нибудь более позднее время. Но мы принимаем как данное, что принципиально нет препятствий к тому, чтобы сделать разбросы начальных значений координат и импульсов как угодно малыми. Все дело за техническими средствами. Формализм классической механики приурочен именно к этому предельному случаю и позволяет предсказать будущие значения координат и импульсов с той же точностью, какую обладают начальные значения, т. е. в пределе — с абсолютной точностью.

Утверждение возможности беспредельного уточнения начальных условий и q , и p и соответственного беспредельного уточнения предсказания будущих значений этих величин при помощи соответствующего математического аппарата — характерная и существенная черта классической механики.

Соотношение Гейзенберга, как мы только что видели, показывает, что квантовая теория отрицает принципиальную возможность такого уточнения начальных условий, так как согласно этому соотношению произведение стандартов q и p не может быть меньше конечной величины $\hbar/2$. Тем самым отрицается, конечно, и точное предсказание дальнейших значений.

Все это противоположение классической теории и квантовой заставляет нас говорить о новом физическом мировоззрении, и

нужно признать, что это отличие действительно весьма существенно. Вопрос другой, насколько прежние классические теории были действительно последовательны до конца. Но это отдельный вопрос, разбор которого нас завел бы слишком далеко.

Тесно связана с указанной неопределенностью еще одна характерная черта квантовой механики, которая обуславливает ее своеобразие и тоже чужда классике. Я имею в виду воздействие процесса измерения на измеряемый объект, которое в квантовой механике, в противоположность классике, не может быть сделано меньше вполне определенной величины и не поддается учету

Как бы там ни было, нужно признать, что квантовая механика настолько отличается от того, чем мы, во всяком случае, считали все существовавшие до сих пор физические теории, что мы говорим о новом мировоззрении. Нет ничего удивительного в том, что при знании соотношения неопределенностей встречает сильное противодействие. Это выражается, между прочим, в стремлении считать эту сторону квантовой теории провизорной, а это стремление, в свою очередь, приводит естественным образом к следующему вопросу. Существуют ли основания утверждать, что нельзя дополнить или перестроить квантовую механику таким образом, чтобы сохранились те ее стороны, которые так блестяще оправдали себя в применении к истолкованию и предвидению физических явлений, и чтобы в то же время она не содержала соотношения неопределенностей?

На так поставленный вопрос трудно ответить, поскольку а priori нельзя сказать, что значит перестроить теорию. Я думаю, что на вопрос, поставленный в такой общей форме, ответа никто дать не может. Если иногда говорят, что Нейман доказал невозможность построения каузальной атомистической теории, то это неверно. Нейман сам никогда этого и не утверждал.

Но можно, сузив несколько вопрос, прийти к такой формулировке, которая еще достаточно обща, несомненно достаточно интересна и в то же время допускает точный ответ. Это и сделал, по существу, Нейман. Прийти к этой формулировке можно на основании следующих соображений. Несомненно и, как я думаю, ясно из предыдущего, что успех квантовой теории в первую очередь был обусловлен тем, что физическим величинам, в первую очередь энергии, были сопоставлены линейные операторы; ведь именно это и позволило применить математический аппарат задач о собственных значениях и т. д. Поэтому вполне целесообразно считать сопоставление физическим величинам линейных эрмитовых операторов тем основным моментом, которому обязана квантовая механика своей действенностью.

Это сопоставление ни в какой мере еще не предопределяло развития теории. Истолкование собственных значений операторов и

собственных функций, не говоря уже о форме уравнения движения, все эти дальнейшие постулаты — положения, которые составляют содержание специальной современной квантовой теории, — ни как не следуют из чрезвычайно общего первого постулата, допускающего, конечно, принципиально и другое развитие. Но, с другой стороны, если отказаться от первого постулата, то вообще ничего от современной квантовой механики не останется. Таким образом, мы его кладем в основу. Для исчерпывающей характеристики вопроса нужно предъявить еще некоторые дополнительные требования, и тогда мы получим ту постановку вопроса, которую дал Нейман и из которой я и хотел бы исходить.

Итак, схематически мы ставим, следуя Нейману, следующий вопрос:

Какие следствия могут быть выведены из предположения (с указанным ниже уточнением), что каждой физической величине соответствует линейный эрмитов оператор? Или еще так:

Можно ли построить теорию, в основе которой лежит (с некоторыми довольно существенными уточнениями) постулат, что каждой физической величине соответствует эрмитов оператор, и которая в то же время не содержала бы соотношения неопределенностей?

Насколько предопределены те черты квантовой механики, которые делают ее столь отличной от классики — соотношение неопределенностей и факт невозможности измерить что-нибудь без конечного воздействия, — тем постулатом, который собственно и определил ее успех и который в основном состоит в утверждении, что в формализме, наиболее подходящем для объяснения микроявлений, физическим величинам нужно сопоставлять линейные эрмитовы операторы и устанавливать между ними соотношения?

Нужно заметить для пояснения следующее: физическая величина *определена* и здесь тем, что предполагается данным рецепт для нахождения ее численных значений, рецепт для ее измерения. Но, в отличие от классики, формализм квантовой механики относится не к этим числам, а к представляющему величину оператору, с которым в силу определения эти числа приведены в строго сформулированное соответствие, например, являются его собственными значениями.