

УДК 165; 501

Квантовая механика как раздел теоретической физики. Формулировка системы исходных понятий и постулатов¹

А.И. Липкин

Московский физико-технический институт, Москва

"Если вы хотите кое-что выяснить у физиков-теоретиков о методах, которые они применяют, я советую вам твердо придерживаться одного принципа: не слушайте, что они говорят, а лучше изучайте их действия..." - А.Эйнштейн "О методе теоретической физики" (1933).

Исходя из постулатов Гейзенберга, Борна, Бора, Шредингера, дана свободная от "парадоксов" формулировка базовой системы исходных понятий и постулатов квантовой механики, в центре которой находится понятие "квантовой частицы", обладающей как корпускулярными, так и волновыми свойствами, и вероятностным типом поведения. При этом состояние физической системы существует независимо от каких бы то ни было измерений, а состояния в разные моменты времени однозначно связаны уравнением движения (уравнением Шредингера). Главная особенность этих состояний состоит в том, что они определяются не значениями, а распределениями вероятности значений соответствующих измеримых величин. Утверждается, что физика (подобно геометрии) с конца XIX в. перешла к более сложной процедуре введения исходных понятий, что привело к формированию "теоретической физики". Дана общая структура базовой системы исходных понятий и постулатов раздела физики. Указана особая роль процедур приготовления и измерения, в этой структуре, неучет которой ведет к появлению псевдопарадоксов в квантовой механике.

1. Введение

Эйнштейн мечтал об изложении оснований квантовой механики столь же четком и стройном, как в его теории относительности [19, с. 137]. Я собираюсь показать что все,

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 03-06-80091.

что необходимо для реализации этой мечты Эйнштейна, было сделано в 1925-27 гг., когда и были созданы основания современной квантовой механики². Только это осталось неотрафелированным должным образом³.

Вследствие этого возникло несколько конкурирующих “интерпретаций” квантовой механики. Во-первых, это наиболее популярная “боровская” или “копенгагенская” интерпретация. Во-вторых, - “эйнштейновская” позиция, вокруг которой объединился ряд отцов квантовой механики недовольных своим детищем. Главными претензиями Эйнштейна к “копенгагенцам” были, во-первых, копенгагенское решение вопроса о соотношении между состоянием физической системы и измерением: “Состояние системы в момент времени t , когда не предельвается никаких наблюдений, не может служить предметом рассмотрения” – говорит “копенгагенец” М.Борн [5,171] (т.е. до измерения нет состояния). Во-вторых, - вероятностный тип описания. Свою позицию они выразили в виде ряда “парадоксов”, якобы возникающих в формулировке квантовой механики и говорящих о ее неполноте и незаконченности (классический набор состоит из парадоксов “кота Шредингера”, “редукции (коллапса) волновой функции” и мысленного эксперимента Эйнштейна, Подольского, Розена (ЭПР) [1]). В попытках решения этих

² Последнюю следует отличать от “старой квантовой теории”, основанной на искусстве использования постоянной Планка для получения выражений для описания ряда явлений: формулы Планка для спектра теплового излучения черного тела, формулы Бора для спектральных линий атома водорода и ряда др. явлений. “До 1925 г. квантовая теория..., при всей пышности названия и многочисленных примерах успешного решения задач атомной физики, с методологической точки зрения представляла собой скорее внушающее жалость скопление гипотез, принципов, теорем и вычислительных рецептов, чем логически последовательную теорию... Фактически квантовая теория стала полем действия неких специальных изощренных или даже артистических приемов”. Это “было делом искусных догадок и интуиции, а не процессом дедуктивных и последовательных рассуждений”. “Старая квантовая теория по существу была всего лишь модификацией классической физики” [10, с. 196, 217].

³ Это было связано, с одной стороны, со сложным процессом формирования основных положений квантовой механики, который шел параллельно несколькими путями и начинался с математических выражений – “математического формализма” и его интерпретаций. С другой стороны, при осмыслении этого процесса использовались механицистские (в духе П. Лапласа) и позитивистские (в духе Э. Маха или логических эмпиристов) философские конструкции, в рамках которых этот процесс адекватно осмыслить нельзя.

парадоксов сегодня доходят до “шизометрии” (от греч. schizo – расщепляю) “многомировой интерпретации” или введения сознания в основания квантовой механики [17]⁴. В-третьих, это, так называемая, “минимальная” феноменалистическая интерпретация, в которой ограничиваются математическим формализмом и возможностью вычислять результаты. Ее часто приписывают работающим в квантовой механике физикам, которые не обращают внимание на споры первых двух групп и упомянутые “парадоксы” (о них они часто просто не знают)⁵.

Ниже представлена четкая формулировка постулатов квантовой механики, в которой не возникает никаких “парадоксов” и из которой вытекает положительный ответ на первую претензию Эйнштейна и отрицательный – на вторую. Эта формулировка оправдывает третью позицию в плане игнорирования проблемы “парадоксов”, но выстраивает модели квантовой частицы и образуемых с ее помощью квантовых систем.

Эта формулировка основана на осознании существенного изменения в построении оснований физики, которое происходит с появлением электродинамики Фарадея-Максвелла в последней трети XIX в. Эти изменения в построении оснований физики были связаны с введением более сложных и менее наглядных понятий (электромагнитного поля). Не случайно именно это время ознаменовано “рождением профессии теоретика, появлением кафедр теоретической физики” [6, с. 9].

Именно теоретическая физика стала адекватной формой построения новых физических сущностей, причем, используемый при этом более сложный математический аппарат (то, чем занималась “математическая физика”) носил подчиненную, служебную функцию.

2. Подход “теоретической физики”

Понимание того, в чем состоит новый более сложный тип задания исходных (“первичных”) понятий облегчается тем, что ситуация в физике во многом аналогична той, что имела место в то же время в геометрии, которая более проста. В геометрии есть исходные (первичные) понятия (точка, прямая, плоскость, ...), с помощью которых образуются (и определяются) остальные “вторичные” понятия (фигуры). Вторые определяются через первые явным образом (треугольник – это фигура, образованная пересечением трех прямых), но как определить первые (“первичные”)? До второй половины XIX в. эти первичные понятия считались “неопределимыми понятиями”,

⁴ В результате этого квантовую механику используют как “темный чулан”, куда можно спрятать концы бредовых или недоделанных теоретических псевдонаучных построений.

⁵ Эти темы в более развернутом виде неплохо освещены в [1].

которые интуитивно ясны (очевидны). Но после появления неевклидовых геометрий стало сложно говорить об интуитивной ясности, скажем, понятия “прямая”. В 1899 г. великий математик Давид Гильберт для решения этой проблемы ввел новый “неявный” тип совместного определения исходных понятий геометрии с помощью аксиом геометрии. В аксиомах геометрии фигурирует несколько понятий (например, “через две точки можно провести прямую и только одну”). Эти понятия нельзя явным образом вывести друг через друга, используя определения типа “прямая – это...”. Но “неявно” и “совместно”, не значит “нечетко”. Если аксиом достаточно количество, то все исходные понятия оказываются определенными четко и однозначно.

Аналогичный процесс имел место и в физике. Многие из основных понятий классической механики Ньютона до последней трети XIX в. имели статус неопределяемых интуитивно ясных понятий (которые можно получить путем абстрагирования, например, абстрагируясь от размеров тела получить механическую частицу или “математический маятник”). Но в связи с появлением электродинамики Максвелла и на фоне повышения уровня строгости определений в математике, эта “интуитивная ясность” перестала срабатывать⁶. В итоге физика фактически пошла по тому же пути, что и геометрия – исходные понятия стали задаваться неявным образом в рамках системы понятий и постулатов, образовавших основания различных разделов физики. Т.е. целостной единицей становится “зрелый” “раздел физики”, который уже сформировал свои основания и исходные (“первичные”) понятия и состоит из этой базовой системы исходных понятий и постулатов (в [15] она называется “ядро раздела науки”) и различных теорий, которые строятся с помощью “первичных” понятий типа механической частицы или электромагнитного поля (в [15] они называются “первичные идеальные объекты”). Это и отложилось в структуре теоретической физики, которая распадается на отдельные разделы⁷. Центральными понятиями раздела при этом оказываются указанные “первичные” понятия, а не “законы”, которые превращаются в атрибуты этих “первичных” понятий.

Важной особенностью, отличающей физику от математики, является то, что теоретические объекты физики (например, механические частицы, движущиеся с определенной скоростью) должны воплощаться в материальные эмпирические частицы.

⁶ В результате в конце XIX в. возник так называемый “гносеологический кризис в физике”.

⁷ Это совпадает с разделами, выделяемыми в теоретической физике (механика (классическая), электродинамика, специальная теория относительности, общая теория относительности, квантовая механика (нерелятивистская),...[13]).

Поэтому в физике, наряду с теоретическими объектами (Т) входят процедуры приготовления ($\langle\P|$) физической системы в исходном состоянии и процедуры измерения ($|I\rangle$), суть которых состоит в процедуре сравнения с эталоном. Все вместе они образуют структуру эксперимента $\langle\P|T|I\rangle$ (близкое нашему различие на процедуры приготовления и измерения, с одной стороны, и теоретическую часть – с другой, можно найти у Фока [21]).⁸.

Хочу подчеркнуть, что процедуры приготовления и измерения входят как элементы особого типа в базовую систему исходных понятий и постулатов раздела теоретической физики, и в курсах теоретической физики эти элементы присутствуют наряду с теоретическими элементами (особенно четко процедуры измерения фиксируются в специальной теории относительности⁹). Т.е. теоретическая физика оперирует как теоретическими, так и нетеоретическими (процедуры) элементами.

Наличие процедур в базовой системе исходных понятий и постулатов составляет одно из важных отличий физики от математики. В математике аксиоматизация оставляет содержание в стороне. В физике благодаря процедурам приготовления и измерения происходит фиксация содержаний таких понятий, как “частица” (классическая или квантовая”), электромагнитное поле и т.п., превращающая их в объекты, из которых строятся объектные (физические) модели явлений.

В теоретической части надо отличать физическую модель и ее математическое описание (представление). Основу физической теории составляет физическая модель явления (или объекта)¹⁰. Понимание физической теории наступает после создания

⁸ Это структура “осмысленного” эксперимента, когда есть теория (или гипотеза), которая определяет, что в эксперименте приготовить и что измерять. В “слепом” эксперименте (без теории), часто имеющем место на ранних стадиях развития науки, ведущими являются крайние члены этой триады $\langle\P|O|I\rangle$, где О – исследуемый объект. “Наблюдению”, характерному, например, для астрофизики, отвечает неполная структура – без левой части (“приготовления”).

⁹ Одним из важнейших изменений произошедших при переходе от ньютоновской механики к эйнштейновской СТО было изменение в процедурах измерения ($|I\rangle$): если главным эталоном классической механики был эталон метра, т.е. длины твердого тела, которая считалась не меняющейся при перемещении с места на место и не зависящей от скорости, то у Эйнштейна такой неизменностью наделяется скорость света.

¹⁰ Ее построение основывается на особом навыке схематизации-моделирования, который приобретается при изучении курсов “общей физики”. После того, как модель составлена, в соответствии с ней составляется уравнение движения, которое затем решается. Основной

(выделения и понимания) соответствующей физической модели¹¹. Основными элементами физической модели являются “физическая система” (A) – то, что не меняется (в классической механике – механические частицы), и ее “состояния” (S_{Aj}) – то, что меняется (в классической механике – положения и скорости механических частиц). Физический процесс (движение) представляется в физике как переход физической системы из одного состояния в другое:

$$S_{A1} \rightarrow S_{A2} .$$

При этом связь между состояниями физической системы задается с помощью “уравнения движения” (например – уравнения Ньютона), для чего вводится “математическое представление”, состоящее из математических образов физической системы (A) (принадлежность математическому слою будем обозначать подчеркиванием), внешних воздействий (сил и т.п.), состояний физической системы (S_A) и самого “уравнения движения”. Без математического описания нельзя работать, в частности, нельзя предсказывать поведение физической системы.

То, что центральное место в физике занимает физическая модель, проявляется в том, что одна и та же физическая модель может обслуживаться разными эквивалентными “математическими представлениями” (в классической механике – это представления Ньютона, Лагранжа, Гамильтона). Выбор математического представления в физике во многом аналогичен выбору разных систем координат (декартовой, цилиндрической, сферической и т.п.) в аналитической геометрии. В обоих случаях этот выбор исходит из соображений удобства. Физическая модель составляет центральную часть физической

областью физической работы является построение самой модели явления (особо следует рассматривать “научные революции” типа создания новой базовой системы исходных понятий и постулатов [15]). Характерный для математики дедуктивный вывод (например, вывод “соотношения неопределенностей” из постулатов Борна и Шредингера в квантовой механике) – в физике явление не столь уж частое.

¹¹ В статье “Что такое “понимание” в теоретической физике?” [7], В.Гейзенберг, ссылаясь на пример теории Птолемея с ее высокой “предсказательной ценностью” подчеркивал, что несмотря на это “большинство физиков согласятся, что лишь после Ньютона удалось добиться “реального понимания” динамики движения планет. Приводимые им примеры теории турбулентного движения в жидкости, сверхпроводимости показывают, что ощущение “понятности” возникает у физиков после построения соответствующих моделей. Более развернуто эта тема обсуждается в [12; 15].

теории. Она, с одной стороны, связана с математическим представлением, а с другой – с процедурами приготовления и измерения¹².

В результате для различных разделов физики мы получаем единую структуру (1) базовой системы исходных понятий и постулатов раздела физики [15].

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Теор. часть (Т)} & & \\
 \text{Мат: } \underline{S_{A1}} & \xrightarrow{\text{-УД}} & \underline{S_{A2}} \\
 \uparrow & & \downarrow \\
 \text{Мод: } S_{A1} & & S_{A2}
 \end{array}
 \quad \langle \Pi | \quad | \text{И} \rangle \quad (1)$$

Все элементы структуры (1) взаимосвязаны и определяются (как и основные понятия геометрии) совместно¹³. Так уравнение движения (а, следовательно, и весь математический слой) влияют на то, что представляет собой состояние физической системы (то, что в классической механике состояние частицы описывается ее положением и скоростью связано с тем, что уравнение Ньютона – дифференциальное уравнение 2-го порядка).

Уравнение движения определяет не только связь между состояниями (диахронический или динамический аспект), но и сам набор (спектр) возможных состояний физической системы (синхронический аспект). Состояние физической системы – одно из центральных понятий физики (хотя в курсе общей физики и в школе, этого понятия избегают). Знание состояния задает полную возможную информацию о системе в данный момент времени, а посредством уравнения движения – и в другие моменты времени. Так в классической механике, где уравнением движения является уравнение Ньютона, для случая физической системы, состоящей из одной частицы, зная положение и скорость частицы с помощью уравнения движения, можно ответить на любой вопрос про движение частицы, как в этот момент времени, так и в любой другой. Поэтому знание положения и скорости частицы и задает состояние частицы в классической механике.

¹² Многие физики в своих мировоззренческих (идеологических) высказываниях следуют идущим из позитивизма второй четверти XX в. представлениям, в которых нет модельного слоя, а есть только уравнения, содержащие величины, которые имеют физический смысл и измеряются. Но это противоречит существованию в теоретической физики таких теоретических объектов как электрон, атом, и другие.

¹³ Правда, часто (но не всегда) процедуры приготовления и измерения определяются отдельно от теоретической части.

Понятия физической системы и ее состояний задаются совместно в рамках базовой системы исходных понятий и постулатов. Этих двух понятий – физическая система и ее состояния – достаточно, чтобы описать физический процесс. Процесс движения частицы (и классической, и квантовой) в физике представляется как переход во времени физической системы (A) из одного состояния ($S_A(t_1)$) в другое ($S_A(t_2)$), а набор возможных состояний является важнейшей характеристикой физической системы.

Итак, понятия физики, возникшие начиная с электродинамики Максвелла, нельзя адекватно воспринять, не используя явно или неявно структуру базовой системы исходных понятий и постулатов раздела физики (1), т.е. структуру оснований раздела физики, которая естественным образом возникает в теоретической, а не “общей” физике. Причем речь идет об основных модельных понятиях, которые можно отделить от сложной математики. В центре оказывается физическая система, состоящая из “первичных” объектов, в механике – частиц.

3. Основания квантовой механики

В разных разделах физики речь идет о разных процессах и физических системах (объектах), и в них будет разным содержательное наполнение структуры (1). Нас интересует раздел физики под названием “квантовая механика” (в нерелятивистском варианте), которая была создана в 1925-27 гг. “Квантовая частица” – базовое (“первичное”) понятие этого раздела физики, которое определяется базовой системой исходных понятий и постулатов квантовой механики. Последнюю можно представить как совокупность постулатов Э. Шредингера, М. Борна, “процедуры квантования затравочной классической системы” (Гейзенберга-Бора) и “принципа тождественности” квантовых частиц для многочастичных систем.

Постулаты Шредингера¹⁴ вводят математический образ состояния квантовой системы в виде “волновой функции” $\Psi_A(t)$ (ее часто называют Ψ -функцией) и уравнение Шредингера в качестве уравнение движения, куда входит оператор Гамильтона H^{KB} , являющийся математическим образом квантовомеханической системы (включая внешние условия).

Т.е. в (1) надо математический образ S_{Aj} заменить на $\Psi_A(t)$ и вместо уравнения движения подставить уравнение Шредингера. В постулаты Шредингера следует включить и принцип суперпозиции, утверждающий, что если есть два состояния, описываемые

¹⁴ Можно исходить из постулатов Гейзенберга, которые эквивалентны постулатам Шредингера. Но в представлении (математическом представлении) Шредингера излагать проще.

волновыми функциями Ψ_1 и Ψ_2 , то есть состояния, описываемые волновыми функциями $(a\Psi_1 + b\Psi_2)$ с любыми коэффициентами a и b . В силу того, что уравнение Шредингера – уравнение волнового типа, эти постулаты ответственны за волновые свойства распространения состояний. При этом связь состояний здесь, как и в классической физике, абсолютно детерминистична.

Постулаты Борна, которые часто называют “вероятностной интерпретацией волновой функции”, ответственны за появление в квантовой механике вероятности и за сочетание корпускулярных и волновых свойств. Это центральные постулаты квантовой механики. Именно из-за нечеткости их формулировки и существует множество “интерпретаций” квантовой механики. Предлагаемая здесь формулировка звучит так: 1) в квантовой механике состояние физической системы определяется не значениями, а распределениями вероятности значений соответствующих измеримых величин (это естественное обобщение понятия состояния в физике); 2) из этого следует, что одно измерение ничего не говорит о состоянии системы, и чтобы определить распределение вероятности, требуется достаточно длинная серия измерений¹⁵; 3) задаются правила, позволяющие по математическому образу состояния $\Psi_A(t)$, определить распределения вероятности соответствующих измеримых величин¹⁶. Измерение в квантовой механике, как и в других разделах физики, проявляет, а не создает существующее состояние. Оно ничего не говорит о том, что будет с системой или ее состоянием после измерения (это

¹⁵ Значения же этих величин в отдельном акте измерения сопоставить с состоянием системы (если оно не приготовлено в особом “собственном” состоянии) нельзя ни до, ни после этого акта измерения.

¹⁶ Часто постулаты Борна сводят к третьему из перечисленных выше пунктов. По Л. де Бройлю, чья формулировка “вероятностной интерпретации волновой функции” Борна наиболее адекватна действиям современного физика-теоретика, она сводится к “принципу квантования” (не путать с “условиями (правилами) квантования” в “старой квантовой теории”) – “точное измерение какой-либо механической величины может дать в качестве значения этой величины лишь одно из собственных значений соответствующего оператора”, дополненному “принципом спектрального разложения”, утверждающим, что “вероятности различных возможных значений некоторой механической величины, характеризующей частицу, полная Ψ -функция которой известна, пропорциональны квадратам (точнее квадратам модуля – А.Л.) амплитуд соответствующих компонент спектрального разложения Ψ -функции по собственным функциям рассматриваемой величины” [9, с. 173-174].

прерогатива процедур приготовления, использующих фильтры и другие приборы). И, как и в классической физике, не надо сюда примешивать ни сознание, ни многомировые интерпретации, ни довольно мутное (когда оно используется в расширительном смысле) понятие информации (в физике этого понятия вводить не надо).

Постулаты Шредингера и Борна определяют основные свойства квантовых систем: вероятностный тип поведения и корпускулярно-волновой дуализм¹⁷. Сочетание корпускулярных и волновых свойств здесь хорошо иллюстрируется на примере известного двухщелевого эксперимента: микрочастицы падают на экран с двумя щелями, за которым стоит фотопластинка, которая эти частицы поглощает. В соответствие с постулатами Борна каждое отдельное измерение даст локальную точку на втором экране-фотопластинке (корпускулярное свойство), но если провести достаточно много измерений, то проявится дифракционно-интерференционная картина (волновые свойства), соответствующая прохождению волны через две щели (при этом вопрос “через какую щель проходит частица?” на самом деле оказывается неадекватным, у микрочастицы, как и у волны, нет локализованной траектории).

Однако, чтобы задать квантовомеханическую систему, состоящую из одной или многих квантовых частиц, надо указать способ построения математического образа физической системы – квантовый оператор Гамильтона $H_{кв}$, который входит в “уравнение движения”. Стандартную процедуру его построения можно представить в виде “процедуры квантования затравочной классической системы”.

Эта общая процедура состоит в следующем. Исходной точкой здесь является классическая модель системы (например, планетарная модель атома). Для нее строится классический математический образ – классический гамильтониан $H(x,p)$ в декартовой системе координат (являющийся функцией от положений (x) и импульсов (p) частиц). Затем проводится процедура квантования в виде замены импульсов на соответствующие операторы (например, компоненту импульса частицы p_x меняют на оператор $(-i\hbar/4\pi)\partial/\partial x$). В результате этого получают квантовый гамильтониан $H_{кв}$, т.е. математический образ квантовой системы, отвечающий квантовомеханической физической модели (так получается квантовомеханическая модель атома с делокализованными состояниями (“орбитами”) электронов в атоме)¹⁸. Эта процедура постоянно используется в современной

¹⁷ В “старой” квантовой теории акцент делался на дискретность характеристик (энергии, момента количества движения и др.) квантовых объектов (систем), но квантовая система в “новой квантовой теории” может обладать и непрерывными характеристиками

¹⁸ Эта процедура, которую мы назвали “квантованием затравочной классической модели”, может быть проведена с разной степенью полноты. Ею, в частности, определяется выбор

физике. Она в такой форме, но без такого особого названия (например, у Луи де Бройля она существует под именем “автоматический вывод волнового уравнения” [8, с. 45]) была сформулирована в фундаментальных работах 1927-30 гг. Джона фон Неймана и Поля Дирака [18; 11, с. 156]. По сути, она появляется уже в первых основополагающих работах Гейзенберга (1925). В 1949 г. Бор излагает дело так: “Гейзенберг (1925) заложил основы рациональной квантовой механики, которая получила быстрое развитие благодаря важным вкладам Борна и Иордана, а также Дирака. Теория вводит формальный аппарат, в котором кинематические и динамические переменные классической механики заменяются абстрактными символами, подчиняющимися некоммутативной алгебре” [4, т.2, с. 404-405]. Последние есть ни что иное, как операторы в современной терминологии. При этом по утверждению Джеммера, “фундаментальной особенностью, характерной для подхода Гейзенберга, был способ использования принципа соответствия Бора... Гейзенберг... рассмотрел... возможность “угадать” – в согласии с принципом соответствия – не решение частной квантовомеханической задачи, а математическую схему новой механики” [10, с. 199]. Поэтому рассматриваемую “процедуру квантования затравочной классической системы” в “новой квантовой теории” можно считать гейзенберговским обобщением боровского “принципа соответствия” “старой квантовой теории”¹⁹. В предлагаемой в данной работе формулировке указанная процедура возводится в ранг

 квазиклассического или последовательного квантовомеханического описания электромагнитного поля или фильтров (типа экрана с щелью). Так часто некоторые явления описываются с помощью сочетания “первичных идеальных объектов” квантовой механики и классической электродинамики. В этом случае говорят о квазиклассическом приближении. По такой схеме вводится спин квантовой частицы (в первую очередь у электрона) в нерелятивистской квантовой механике: квантовой частице приписывается классический механический и магнитный моменты, которым затем приписываются квантовые характеристики по аналогии с орбитальным моментом. Так поступают в опыте Штерна и Герлаха и эффекте Зеемана, где сталкиваются с взаимодействием электрона с магнитным полем. Электрон со спином здесь не является новым “первичным” объектом по сравнению с электроном без спина, поскольку здесь спин добавляется по квазиклассической логике. Другое дело электрон со спином в последовательной релятивистской квантовой механике Дирака. Там речь идет об электроном со спином как новом по сравнению с электроном в нерелятивистской квантовой механике Шредингера – Борна – Бора “первичном” объекте. “Метод затравочной классической модели”, широко используется в физике XX в. Аналогичная процедура имела место и в теории относительности [15].

теоретического постулата, входящего в базовую систему исходных понятий и постулатов квантовой механики, подобно тому, как Бор возводил в ранг “чисто теоретического закона” свой “принцип соответствия” в старой квантовой теории” [4, т.1, с. 505]²⁰.

“Вследствие этого, - говорит Дирак о рассматриваемой процедуре, - мы можем в большинстве случаев употреблять для описания динамических систем в квантовой теории тот же язык, что и в классической теории (например можем говорить о частицах с определенными массами, движущихся в заданном поле сил), и если нам дана система в классической механике, то обычно можно придать смысл понятию “той же самой” системы в квантовой механике” [11, с. 156]. Так затравочной классической моделью квантовой частицы является классическая механическая частица. Именно поэтому “первичным” объектом квантовой механики является “квантовая частица”, обладающая волновыми свойствами (а в квантовой теории поля – квантованная волна, обладающая корпускулярными свойствами) ²¹. Т.о., благодаря процедуре квантования затравочной

¹⁹ “Принцип соответствия” Бора заключался в “требовании непосредственного перехода квантотеоретического описания в обычное в тех случаях, когда можно пренебречь квантом действия” [4, т. 2, с. 66]. За счет этого определялись неизвестные параметры в формулах “старой” квантовой теории.

²⁰ Отметим, что в формулировке П.Дирака (1930) обсуждаемая процедура содержит ряд дополнительных оговорок (мы их выделяем подчеркиванием): “Обычно можно предполагать, что гамильтониан в классической и квантовой механике является одной и той же функцией канонических координат и импульсов (... в декартовой системе координат...). При этом могло бы возникнуть затруднение, если бы классический гамильтониан содержал произведение множителей, квантовые аналоги которых не коммутируют между собой, ибо тогда было бы неизвестно, в каком порядке расположить эти множители в квантовом гамильтониане. Однако для большинства простейших динамических систем, изучение которых важно в атомной физике, такое затруднение не возникает” [10, с. 156]. Указанное “затруднение”, решается введением соответствующего оператора (типа оператора временного упорядочения в представлении чисел заполнения). Что касается осторожного “обычно”, то никаких других общих процедур построения гамильтониана для квантовомеханических систем выдвинуто не было. В моем варианте формулировки оснований квантовой механики указанная процедура возводится в ранг теоретического постулата, и, соответственно, слово “обычно” становится неуместным (оно заменяется на “всегда”).

²¹ “Вследствие этого, - говорит Дирак о рассматриваемой процедуре, - мы можем в большинстве случаев употреблять для описания динамических систем в квантовой теории

классической системы классическая физика оказалась встроенной в основания квантовой физики²².

“Квантовая частица” - новый “первичный” физический объект, определяемый базовой системой исходных понятий и постулатов квантовой механики, созданной в 1925-27 гг. Естественно, что ее свойства существенно отличаются от свойств классической частицы. Наиболее яркое отличие, являющееся проявлением ее волновых свойств, является “соотношение неопределенностей” Гейзенберга, которое утверждает, что для двух “взаимодополнительных” величин (например, компонент положения x и импульса p_x) произведение их неопределенностей (квадратных корней дисперсий соответствующих функций распределения) отвечает условию $\Delta x * \Delta p_x \geq h/4\pi$. “Взаимодополнительность” - новое для физики свойство, утверждающее, что измеримые величины, отвечающие затравочной классической модели системы, содержат пары взаимодополнительных величин. Математическим выражением этого свойства является некоммутативность математических образов (так называемых операторов) измеримых величин (т.е. $ab \neq ba$), а физическим выражением свойства взаимодополнительности является само “соотношение неопределенностей”, которое представляет собой не дополнительный постулат (принцип), а следствие постулатов Шредингера и Борна: оно теоретически выводится из них [10, с. 324-325] (это редкий в физике пример дедуктивного вывода). Соответственно соотношение неопределенностей есть свойство состояния, а не измерения (якобы “мера одну величину, возмущаем другую”). Состояние, полностью описываемое волновой функцией, определяет распределение вероятностей для всех измеримых величин, включая взаимодополнительные. Измерения (по определению, по своему функциональному месту в (1)) проявляют состояние, а не изменяют его (это делают процедуры приготовления, используя различные фильтры и т.п.). Соотношение неопределенностей является следствием волновых свойств квантовых частиц (состояние с заданным положением частицы можно приготовить с помощью экрана с маленькой щелью, но в силу дифракции после прохождения щели будет большая неопределенность по направлению импульса; тот же язык, что и в классической теории (например, можем говорить о частицах с определенными массами, движущихся в заданном поле сил), и если нам дана система в классической механике. То обычно можно придать смысл понятию “той же самой” системы в квантовой механике” [11, с. 156].

²² Квантовая механика, как и теория относительности, как бы надстраиваются над классической физикой, существенным образом используя ее физические модели, изменяя их. В более ранний "классический" период этот прием не использовался. Новые разделы физики создавали свои собственные модели.

состоянию с определенным импульсом отвечает плоская волна, характеризующаяся полной нелокализованностью в пространстве).

Модель физической системы в квантовой механике строится, во-первых, путем конкретизации измеримых величин, характеризующих квантовую частицу и ее состояния. В результате этого квантовая частица превращается в электрон со спином или без спина, протон, фотон и т.д. Во-вторых, в квантовой механике, как и в классической, возможно построение многочастичных систем.

В последнем случае требуется добавить к перечисленным выше постулатам принцип тождественности квантовых частиц, который определяет правила сборки многочастичных систем в квантовой механике. Из него следует “принцип Паули” для заполнения орбит электронов в атоме. Из него также следует наличие двух типов частиц – бозонов (фотон) и фермионов (электрон, протон, нейтрон), обладающих разными коллективными свойствами (“статистиками”). Это холистский²³ принцип. Из-за него система частиц не сводится к совокупности частиц²⁴. Без него нельзя описать явления сверхпроводимости и сверхтекучести при низких температурах и многие другие квантовые эффекты.

Такова предлагаемая в данной работе формулировка базовых понятий и постулатов квантовой механики. Основная новизна ее состоит во введении в формулировке постулатов Борна *понятия состояния, которое объективно существует независимо от каких бы то ни было измерений, но определяется не значениями, а распределениями вероятности значений* соответствующих измеримых величин. Эти состояния, как и в классической физике, однозначно связаны уравнением движения и существуют независимо от измерения и наблюдателя. Поэтому, по-прежнему, вопреки тому, что

²³ От слова ‘whole’ – целый. В противоположность атомизму (или элементаризму), утверждающему, что свойства целого вытекают из свойств его элементов (включая взаимодействие), холизм утверждает, что есть существенные свойства целого, которые не вытекают из свойств его элементов.

²⁴ Ярким примером этого являются введенные в рассмотрение Эйнштейном Подольским и Розеном “перепутанные” состояния двух частиц, корреляция в состоянии которых не меняется при разлете их на сколь угодно большое расстояние (этому есть классический аналог: разность фаз двух лучей света, полученных разделением одного луча полупрозрачным зеркалом и фазовой пластинкой, не будут меняться, как бы далеко лучи не ушли друг от друга). Это свойство легло в основу разрабатываемых последние десятилетия проектов квантовой криптографии (шифрования) и квантового компьютера. В многочастичных системах квантовой теории поля этот принцип проявляется в процедуре “временного упорядочения” в математическом слое.

утверждал Бор, речь в квантовой механике идет о причинном и объективном описании явлений²⁵. Однако, в силу той путаницы²⁶, которая, с легкой руки Бора, образовалась вокруг вопроса о месте измерения в квантовой механике, этот вопрос требует отдельного обсуждения.

4. Место измерений в структуре оснований квантовой механики

Из места “затравочной классической модели” в базовой системе исходных понятий и постулатов квантовой механики вытекает то, что в нерелятивистской квантовой механике фигурируют те же измеримые величины, а вследствие этого и те же типы процедур измерения, что и в классической физике (то же можно сказать и про “процедуры приготовления”). Так измерение положения квантовой частицы (микрочастицы) осуществляется с помощью фильтра или фотопластинки и метра (микрометра). Приготовление частиц с определенным импульсом, состояния которых описываются волновой функцией типа плоской волны, осуществляется с помощью нагретой спирали, их излучающей и соответствующего фильтра (в рамках классической модели). Именно из этого использования “затравочной классической модели”, а не из психологической сущности наблюдения, как полагал Бор, вытекает справедливость для нерелятивистской квантовой механики боровского утверждения о том, что результаты наблюдения “окончательно должны выражаться с помощью классических понятий” [4, т.2, с.57].

“Принципиальная разница” в месте, занимаемом измерением в квантовой механике – миф, созданный “копенгагенцами” в ходе попыток ответить на критику Эйнштейна. Отцами этого мифа являются Бор и фон Нейман. Бор рассматривает измерение не как особую процедуру (процедуру сравнения с эталоном), а как физическое явление, как взаимодействие “между предметом и средством наблюдения”: “каждое наблюдение этих явлений связано с взаимодействием, которым нельзя пренебречь” [4, т.2, с. 56]. К этому Бор добавляет неадекватное прочтение “соотношения неопределенностей” Гейзенберга. Применяя его к измерению, он утверждает существование “неизбежного влияния на атомные явления при их наблюдении” [4, т.2, с. 60] (т.е., измеряя одну величину, мы возмущаем другую). Однако, о чем было сказано выше, “соотношения

²⁵ Появление вероятностного описания не означает, что в квантовой механике появляется место для “свободной воли” и т.п., как думают некоторые нефизики.

²⁶ Степень нечеткости формулировок этого спора характеризует то, что Эйнштейн в 1949 г., после четверти века споров с Бором, писал, что “несмотря на многочисленные попытки” он “так и не смог ... уяснить” “точной формулировки” “боровского принципа дополнительности” [23, p. 674].

неопределенностей” Гейзенберга, вытекающее из постулатов Шредингера и Борна, описывает свойства состояния квантовой системы, а не измерение.

Фон Нейман в [18], “руководствуясь статьей Бора о кванте действия и описании природы (1929 г.), - говорит Джеммер, - ... развил свою идею о том, что в каждом квантовомеханическом измерении наличествует неанализируемый элемент. Он постулировал, что волновая функция, помимо непрерывного каузального изменения, подчиняющегося уравнению Шредингера, при измерении претерпевает прерывное, акаузальное (т.е. не подчиняющееся уравнению Шредингера – А.Л.) и мгновенное изменение, обусловленное вмешательством наблюдателя, его воздействием на объект” [10, с.357]. Последнее есть не что иное как, так называемая, проблема “редукции (коллапса) волновой функции. В связи с попытками решения этой “проблемы” создается, так называемая, “квантовая теория измерения”, отцом которой является опять же фон Нейман. Она состоит из решения различных вариантов стандартной квантовомеханической задачи о составной системе, состоящей из исследуемой квантовомеханической системы и части измерительного прибора, которые рассматриваются в рамках обычной квантовой механики. И здесь нет проблем. Но после этого в конце добавляется скачок “коллапса волновой функции” (то же можно сказать и про «микроскоп Гейзенберга», который, по сути, описывает эффект Комптона).

В основе этой картины лежит недостаточно обоснованное философское по своей сути утверждение Дж. фон Неймана, Д. Бора и др., что "если квантовая теория способна дать полное описание всего, что может произойти во вселенной, то она должна иметь возможность описать также сам процесс наблюдения через волновые функции измерительной аппаратуры и исследуемой системы. Кроме того, в принципе, квантовая теория должна описать и самого исследователя, наблюдающего явления при помощи соответствующей аппаратуры и изучающего результаты эксперимента ... через волновые функции различных атомов, составляющих этого исследователя"[3, с. 668] (то же найдем в [18, с. 307-308]). Отсюда возникает миф о “невозможности строгого разделения явлений и средств наблюдения” и о том, что “нельзя строго разграничить объект и субъект” [4, т.2, с. 58].

Подобные утверждения являются безусловными с точки зрения Лапласа (или Шредингера с его кошкой [14]), согласно которой "поскольку все, включая человека, состоит из атомов, а атомы описываются механикой, то все действия и мысли человека можно описать с помощью механических законов". На этот мировоззренческий, а не физический довод нечего возразить, кроме того, что системный подход выдвинул противоположный тезис, утверждающий, что система обладает свойствами, которые не

сводятся к свойствам ее элементов, вследствие чего ни жизнь, ни поступки людей, в том числе процедуры измерения, включающие процедуру сравнения с эталоном, не могут быть сведены к физическим явлениям.

Неверность введенной Бором и фон Нейманом постановки вопроса связана с игнорированием зафиксированной на сх. (1) принципиальной разницы между процедурами измерения (и приготовления) как элементами (“строительным материалом”), используемыми в теоретической физике, и явлением (взаимодействием) как объектом теоретического моделирования. Эта особая функция измерения серьезно обсуждалась Галилеем (в связи с использованием подзорной трубы), потом потеряла актуальность и была забыта, и снова всплыла в теории относительности и, особенно, в квантовой механике, но в неадекватном виде: как противопоставление макроскопического (прибора) и микроскопического (частицы) объектов [1, с. 84]. Дело не в макроскопичности прибора (в теории элементарных частиц стабильные микрочастицы являются “приборами” для измерения нестабильных микрочастиц), а в том, что это прибор, т.е. он осуществляет процедуры (подробнее см. [12; 15, 16]).

При представленной выше формулировке квантовой механики процедуры измерения – это особый строительный материал теоретической физики, а не явление. Поэтому в этой формулировке нет места для явления “акаузального и мгновенного изменения, обусловленного вмешательством наблюдателя”, а, следовательно, нет места ни для “коллапса волновой функции” и других “парадоксов”, ни для связанной с ними, “квантовой теории измерений”.

Истинная “теория измерений”, что для квантовой, что для классической физики, относится к “зазору” между идеальными процедурами в (1) и реальными процедурами. Она изучает вопросы точности реальных измерений и анализирует конструкции приборов с этой точки зрения. При этом и там, и там возможно рассмотрение составной система из объекта и части прибора (выступающего при этом аналогом “пробного тела”). В классической физике теория измерений рассматривает, например, степень гладкости наклонной плоскости и влияние температуры на длину метра в опыте Галилея, а не измерение (или приготовление) как таковое, в которое входит человек (или машина!?) подносящий этот метр. То же имеет место и в квантовой механике.

Т.о., утверждение о принципиальном отличии измерений в квантовой механике – миф [12]. Именно поэтому, как справедливо отмечено в [1], большинство физиков, работающих в квантовой механике, игнорируют эти проблемы²⁷. Этот миф связан отчасти

²⁷ Сам я услышал о них уже после окончания МФТИ и защиты диссертации по квантовой механике.

с неадекватным прочтением “соотношения неопределенностей Гейзенберга”, отчасти – с “копенгагенскими” попытками с помощью этой “особости” выйти из-под эйнштейновской критики.

Итак, я совершенно не согласен с утверждением Р. Фейнмана "что квантовую механику никто не понимает, хотя многие считают, что в ней все "чисто" и очень хорошо" (по [2, с. 168]). Причина непонимания, о котором говорит Р. Фейнман и др. – это, в первую очередь, применение неадекватных для этого случая классических понятий. Так непонятность, даже парадоксальность "дуализма волна-частица" возникает при попытке понять квантовомеханическое явление (типа поведения электрона) в логике классических понятий, где понятия частицы и волны являются альтернативными. Но с той же ситуацией мы столкнемся, если в понятиях классической ньютоновской механики попытаемся описать электромагнитную волну (с ее поперечным характером колебаний, требующим чрезвычайно твердого эфира, который мы почему-то не ощущаем) или при описании поведения тел, движущихся с околосветовыми скоростями. И это естественно: если бы в старых понятиях можно было описать новые явления, то не надо было бы создавать новые разделы физики.

"Непонятность" - это исходное состояние, которое в ходе сложной работы преобразуется в новые "первичные" объекты и разделы физики. Для квантовой механики такой исходной непонятностью стал сформулированный А. Эйнштейном, Луи де Бройлем и др. "корпускулярно-волновой дуализм", который в 1925-1927 гг. трудами Шредингера, Гейзенберга, Борна, Бора, Дирака привел к созданию “первичного” идеального объекта квантовой механики – “квантовой частицы”, которая распространяется сразу через две щели и описывается вероятностно (но в рамках точных уравнений). Такой объект трудно наглядно представить (но то же можно сказать и про электромагнитную волну, и про прямую в неевклидовой геометрии). Его нельзя адекватно подать в рамках курса “общей физики”, идущего от “атомных явлений” (и потому называющегося “атомной физикой”, а не “квантовой механикой”), не используя (явно или неявно) характерную для теоретической физики структуру базовых понятий и постулатов (1). Что делать, с конца XIX в. физики стали работать со сложными объектами, но из этих объектов строят физические модели явлений (и объектов) так же, как это делают в классической механике или гидродинамике. Т.е. теоретическая модель явления в квантовой механике, как и в классической, это, в первую очередь, совокупность (система) физических объектов (частиц), а не уравнений, и эти модели обладают физическим, а не условным смыслом. И этот смысл можно понять.

Литература

1. *Аккарди Л.* Диалоги о квантовой механике. М. 2004.
2. *Алексеев И.С.* Деятельностная концепция познания и реальности. Избранные труды по методологии физики. М.: "РУССО, 1995.
3. *Бом Д.* Квантовая теория. М.: Наука, 1965.
4. *Бор Н.* Избранные научные труды. В 2 тт. М., 1971.
5. *Борн М.* Размышления и воспоминания физика. М., 1977.
6. *Визгин В.П.* Математика в классической физике //Физика XIX-XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XIX века. М., 1995.
7. *Гейзенберг В.* Что такое «понимание» в теоретической физике. Природа, N 4 (1971).
8. *ДеБройль Луи.* Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М., 1986.
9. Революция в физике (Новая физика и кванты). М., 1965.
10. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. М., 1985.
11. *Дирак П.* Принципы квантовой механики. М., 1979.
12. *Клышко Д.Н., Липкин А.И.* "О "коллапсе волновой функции", "квантовой теории измерений" и "непонимаемости" квантовой механики". Электронный журнал "Исследовано в России", 53, стр 736-785, 2000 г.
<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/053.pdf>.
13. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т.3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., 1974.
14. *Легетт А.Дж.* Шредингеровская кошка и ее лабораторные сородичи. Успехи физических наук, 1986, т. 148, в. 4, с. 671-688.

15. *Липкин А.И.* Основания современного естествознания. Модельный взгляд на физику, синергетику, химию. М.: "Вузовская книга", 2001.
16. *Липкин А.И.* Существует ли явление "редукции волновой функции"? //Успехи физических наук, 2001, т.171, N4, с. 437-441.
17. *Менский Б.М.* Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения, и новые формулировки старых вопросов. Успехи физических наук, 2000, т. 170, с.631.
18. *Нейман фон И.* Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964.
19. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989.
20. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 5. Атомная и ядерная физика М., 2002.
21. *Фок В.А.* Критика взглядов Бора на квантовую механику. // Философские вопросы современной физики. М., 1958.
22. *Шредингер Э.* Новые пути в физике. Статьи и речи. М.: Наука, 1971.
22. *Einstein A. In: Albert Einstein : Philosopher-Scientist, Evanson, 1949.*