
Две методологические революции в физике – ключ к пониманию оснований квантовой механики¹

А.И. ЛИПКИН

Дана свободная от “парадоксов” формулировка базовой системы понятий и постулатов квантовой механики. Показывается, что основания “проблем” “квантовых измерений” и “редукции волновой функции” являются философскими, а не физическими, и их решение состоит в правильной постановке вопроса и учете теоретико-операциональной гетерогенности структуры физики, а не во введении сознания в основания квантовой механики.

Free of “paradoxes representation of the basic system of the concepts and foundations of the quantum mechanics is done. It is shown that foundations of ‘problems’ of “quantum measurements” and “reduction (collapse) of wave function” are philosophical, not physical. Their solution lies in working out a correct question statement and also taking into account theoretic-operational heterogeneity of structure of physical knowledge, but not in introducing conscience in the foundations of quantum mechanics.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: научная революция, теоретическая физика, основания квантовой механики, интерпретации квантовой механики, парадоксы квантовой механики, коллапс (редукция) волновой функции, измерения в квантовой механике, место наблюдателя, структура физического эксперимента, соотношения неопределенностей, принцип дополнительности.

KEYWORDS: scientific revolution, theoretical physics, foundations of quantum mechanics, interpretations of quantum mechanics, collapse (reduction) of wave function, measurement in quantum mechanics, place of observer, structure of physical experiment, uncertainty relations, complementarity principle

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

Современная физика является продуктом двух научных революций – XVII в. и границы XIX–XX вв. Обычно вторая рассматривается как революция в физической картине мира, произведенная появлением теории относительности и квантовой механики. Я хочу указать на более глубокую революцию, революцию методологическую.

Увидеть эту методологическую революцию проще всего на фоне проходившей параллельно подобной революции в геометрии. В геометрии объекты можно разделить на два класса или типа: “первичные”, к которым относятся точка и прямая и “вторичные”, к которым относятся составленные из них фигуры. “Вторичные” *явным* образом определяются через “первичные”. Проблема оснований геометрии состоит в определении “первичных”. До середины XIX в. они рассматривались как неопределимые, но интуитивно ясные (очевидные) понятия². Однако во второй половине XIX в. в связи с появлением неэвклидовых геометрий опора на очевидность перестала удовлетворять (работать). В результате в геометрии возникла *проблема оснований*. Д. Гильберт решил ее, введя неявный тип совместного определения системы исходных (“первичных”) понятий – точки, прямой и др. – через систему аксиом геометрии, в каждую из которых входило несколько исходных понятий (например, “через две точки всегда можно провести прямую и только одну”).

То же имело место и в физике. Здесь объекты (идеальные, поскольку речь идет о теории) можно разделить на два класса (типа): “первичные идеальные объекты” (ПИО), к которым относятся частица (тело) в механике, жидкость в гидродинамике и т.п., и “вторичные идеальные объекты” (ВИО), к которым относятся модели различных сложных объектов и явлений. Сначала “первичные идеальные объекты” считались интуитивно ясными (этот подход лежит в основе курсов “общей физики”). Для Галилея и Ньютона главным предметом поиска был закон движения, объект движения был очевиден. Ситуация меняется во второй половине XIX в. в связи с появлением электродинамики и термодинамики, где вопрос стоял уже и о самом объекте.

Для выхода из возникшего в результате этого кризиса оснований физики (и связанного с ним “гносеологического кризиса”) был сделан фактически тот же ход, что и в геометрии (поскольку физика ориентировалась на заданный в математике уровень строгости) – переход к *неявному типу определения* “первичных идеальных объектов”. В результате в физике произошли существенные перестроения структуры ее оснований, которые приобрели наиболее четкое выражение в современных курсах теоретической физики, первым среди которых является многотомник “Теоретической физики” Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица (в этом мировое значение этого издания). К сожалению, этот переход не нашел адекватного описания в методологии и философии науки и не очень четко осознан самими физиками. Отсутствие этого осознания лежит в основании мнимых “парадоксов” квантовой механики (для решения которых предлагают включить сознание в ее основания [Менский 2000, 2004, 2005; Wheeler 1977]) и ее “непонимания”: «Квантовую механику никто не понимает», – утверждает нобелевский лауреат по квантовой механике Р. Фейнман [Фейнман 1987, 117].

1. Теоретическая физика как осуществление неявного типа определения основных понятий в физике. Современная теоретическая физика – главный продукт научной революции границы XIX–XX вв. – предстает как совокупность разделов (классической механики, квантовой механики, электродинамики...), каждый из которых имеет свои четкие основания в виде “ядра раздела физики” (ЯРФ), где посредством *неявного типа определения* строго (неявный не значит нечеткий или неясный) задаются все основные понятия, включая “первичные идеальные объекты”³. С помощью “ядра раздела физики” осуществляется *неявный* тип определения “первичных идеальных объектов”, с помощью

которых *явным* образом определяются “вторичные идеальные объекты”, представляющие собой модели физических объектов и явлений.

Наличие двух типов идеальных объектов (“первичных” и “вторичных”) ведет к наличию двух уровней (и типов) работы в естественных науках: первый уровень отвечает созданию новых первичных идеальных объектов, второй отвечает построению вторичных идеальных объектов из уже существующих первичных идеальных объектов. Это различие аналогично делению на “нормальную” и “анормальную” (революционную) фазы науки Т. Куна и эйнштейновскому различению на “конструктивные” и “принципиальные” (“фундаментальные”) теории (подробнее см. [Липкин 2006]). Серьезным недостатком многих современных вариантов структуры физического знания, выдвигаемых реалистами различных направлений [Boyd 2002; Ladyman 2007] (и их критиками), является использование одноуровневых представлений физического знания, где единицей является “теория”. Они не позволяют отличить, скажем, квантовую механику от теории какого-либо явления внутри раздела физики, скажем, теории сверхпроводимости, представляющей собой два разных уровня, фиксируемых здесь и в постпозитивистских моделях Т. Куна и И. Лакатоса.

Введение неявного типа определения дало возможность работать с более сложными и менее наглядными объектами (понятиями), которые нельзя получить простым абстрагированием из эмпирических объектов (как получали понятие “материальной точки”⁴ или “идеального маятника”). 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 функцию⁵.

Основания всех разделов физики имеют сходную структуру, в которой можно выделить *теоретическую и операциональную части*⁶.

Теоретическая часть состоит из двух слов: физической модели и ее математического представления. Основными элементами физической модели являются “*физическая система*” – то, что не меняется (в классической механике – механическая частица), и ее “*состояния*” – то, что меняется (в классической механике – положение и скорость механической частицы). Эта пара понятий является центральной в современной теоретической физике [Липкин 2007а; 2001а]. Она описывает физический процесс (движение) как переход физической системы (представляющей собой первичный или вторичный идеальный объект) из одного состояния в другое. При этом связь между состояниями физической системы (“закон природы (движения)”) задается с помощью “уравнения движения” (например – уравнения Ньютона), для чего вводится “*математическое представление*”, состоящее из математических образов физической системы, внешних воздействий (сил и т.п.), состояний физической системы и самого “уравнения движения”. Без математического описания нельзя работать, нельзя предсказывать поведение физической системы.

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.

В *операциональную часть* входят операции приготовления системы и ее начального состояния и измерения. Основу последнего составляют эталон и операции сравнения с эталоном.

Таким образом, в центре внимания физики теперь оказывается физическая система (объект) и ее состояния, а “закон движения” (“закон природы”) превращается в характеристику физической системы, задающую связь между состояниями, отображаемую уравнени-

ем движения. В результате для различных разделов физики мы получаем единую структуру – базовую систему исходных понятий и постулатов раздела физики – “ядра (постулатов) раздела физики” [Липкин 2001а; 2007а]. Все элементы этой структуры взаимосвязаны и определяются (как и основные понятия геометрии) совместно. При этом основу физической теории составляет физическая модель явления (объекта), которая по сути отсутствует в стандартном представлении позитивистов [Suppe 1974, 10–12, 3–4]⁷. Понимание физической теории наступает после создания соответствующей физической модели⁸. Центральное место физической модели в физике проявляется и в том, что одна и та же физическая модель может обслуживаться разными эквивалентными “математическими представлениями” (в классической механике – это представления Ньютона, Лагранжа, Гамильтона, а в квантовой – Шредингера, Гейзенберга, взаимодействия и др.). 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, с одной стороны, связана с математическим представлением, а с другой – с процедурами приготовления и измерения.

2. Научная революция XVII в. и место измерений в структуре оснований раздела физики. *Операциональная часть* является принципиально важным элементом структуры. Именно она отличает возникшую в XVII в. естественную науку от натурфилософии, и именно неадекватная фиксация этой части в “копенгагенской” интерпретации ведет к несуществующим “парадоксам” в квантовой механике.

В Древней Греции натурфилософия (строившая умозрительные онтологические модели Космоса и его элементов в духе атомизма Демокрита) и физика Аристотеля не имели ничего общего с техникой (механикой машин). Со времен Древней Греции до Нового времени господствовали представления, что “область механики – область технической деятельности, тех процессов, которые не протекают в природе, как таковой, без участия и вмешательства человека. Предмет механики – явления, происходящие “вопреки природе”, т.е. вопреки течению физических процессов, на основе “искусства” (τέχνη) или “ухищрения” (μηχανή)... “Механические” проблемы... представляют самостоятельную область, а именно – область операций с инструментами и машинами, область “искусства”...” [Григорьян, Зубов 1962, 9–11]. В начале XVII в. мы находим две отдельные области. Математизированная натурфилософия искала законы естественного движения – “законы природы”, не зависящие от деятельности человека (руководствуясь метафорой “книга Природы, написанная на языке математики”). Не случайно знаменитый труд Ньютона называется “Математические начала натуральной философии”, а не “механика”, как этот раздел физики стали называть позже. Машинные же создавались искусством инженеров-механиков (порой с использованием механики-физики, как это было у Гюйгенса при расчете механизма часов), суть машины определялась людьми и сводилась к определенным функциям. Таким образом, *действия людей* противопоставлялись *природным явлениям*, это были две разные области – области “второй” и “первой” природы.

В результате “научной революции XVII века”, зафиксированной в теориях падения тела Галилея и динамики (механики) Ньютона, возникает гетерогенная “*теоретико-операциональная*” структура физического эксперимента (приводимая Фоком [Фок 1951] в контексте спора с Бором)⁹:

$\langle \Pi | T(Y) | I \rangle$.

Здесь средняя часть отвечает теоретической модели явления (объекта или процесса) или самому явлению, если модели нет, и идет чисто экспериментальное исследование (которое нас пока интересовать не будет). Крайние члены составляют операции приготовления ($\langle \Pi$) физической системы и ее исходного состояния (например, гладкой наклонной плоскости, шарика, его помещения на определенной высоте) и измерения ($| I \rangle$) соответствующих величин (времени, расстояния, скорости), которые предполагают наличие эталонов и операций *сравнения с эталоном*. Эти операции – особый материал, они были заимствованы из техники, это *не явления природы, а технические операции*, действия человека, причем любого человека или даже автомата. Операции приготовления и измерения

обеспечивают *приближенное* воплощение в материале (материализацию) соответствующего *первичного идеального объекта*, который в этом случае *первичен*, а его воплощение вторично (этот процесс адекватно описывается рационалистической эпистемологической моделью [Липкин 2007, 2001]). Именно операционные части $\langle\Pi\rangle$ и $\langle I\rangle$, которые включают использование различных приборов (что отличает адекватное физике понятие “приготовляемого” и “измеряемого” от позитивистского “наблюдаемого”) отличают физику от умо-зрительной натурфилософии.

В случае же, когда $T(Y)$ – это вторичный идеальный объект, то *первично явление* (объект), а вторичный идеальный объект – приблизительно описывающая его теоретическая модель (теория). Это замечание относится к любому разделу физики.

3. Три “интерпретации” квантовой механики. В силу сложности процесса формирования основных положений квантовой механики, который шел параллельно несколькими путями и начинался с математических выражений – “математического формализма” и его “интерпретаций”, к 1930-м годам возникло несколько конкурирующих “интерпретаций” (в современных понятиях правильнее было бы говорить о “парадигмах”¹⁰) квантовой механики. Во-первых, это наиболее популярная “*боровская*” или “*копенгагенская*” *интерпретация*. Во-вторых, противостоящая ей “*эйнштейновская*” позиция, вокруг которой объединился ряд отцов квантовой механики недовольных своим детищем¹¹. Главными претензиями Эйнштейна к “копенгагенцам” были: 1) 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 (т.е. до измерения нет состояния, что для Эйнштейна было неприемлемо, в физике состояние не может зависеть от наблюдения); 2) *вероятностный тип описания отдельного объекта* (он не верил, что “Бог играет в кости” со Вселенной). Из этого следовало отрицание 3) тезиса о *полноте*, завершенности “новой” (современной) квантовой механики. Свою позицию Эйнштейн и его соратники 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) [Аккарди 2004]). В-третьих, так называемая “минимальная” феноменологическая интерпретация, которую ограничивают математическим формализмом и возможностью вычислять результаты. Ее придерживаются некоторые *работающие в квантовой механике физики*, которые не обращают внимания на споры первых двух групп и упомянутые “парадоксы” (о них они часто просто не знают). На самом деле, эта группа совсем не ограничивается вычислением и “минимальной интерпретацией”, а имеет полноценную “интерпретацию” (“парадигму”), которая вместе с ее постулатами под именем “теорфизическая” описана ниже (в п. 4). В ней дается положительный ответ на первую претензию Эйнштейна и отрицательный – на вторую. При этом как и “копенгагенцы”, “работающие физики” исходят из полноты (законченности) квантовой механики.

4. Основания квантовой механики – “теорфизическая” парадигма. Систему исходных понятий и постулатов, задающей первичный идеальный объект этого раздела физики – “квантовую частицу”, можно представить как совокупность постулатов Э. Шредингера, М. Борна, “процедуры квантования затравочной классической системы” Гейзенберга–Бора и “принципа тождественности” квантовых частиц для многочастичных систем¹².

1) *Постулаты Шредингера*¹³ задают математическое представление, вводят *математический образ* состояния квантовой системы в виде “*волновой функции*” $\Psi_A(t)$ (ее часто называют Ψ -функцией)¹⁴ и *уравнение Шредингера* в качестве уравнения движения, куда входит *оператор Гамильтона* H^{kb} , являющийся математическим образом квантово-механической системы (и внешних условий). При этом связь состояний здесь, как и в классической физике, абсолютно детерминистична. В силу того, что уравнение Шредингера – уравнение волнового типа, эти постулаты ответственны за волновые свойства пространства квантовых частиц.

2) *Постулаты Борна* – центральные постулаты квантовой механики – ответственны за появление в квантовой механике *вероятности* и за *сочетание корпускулярных и волновых свойств*. Во многом именно из-за отличий в их формулировке и существует множество “интерпретаций” квантовой механики. В “теорфизической” интерпретации главным для понимания квантовой механики является то, что *состояние* физической системы определяется не значениями, а *распределениями вероятностей значений* соответствующих измеримых величин¹⁵ (это естественное обобщение понятия состояния в физике)¹⁶. Из этого вытекает, что одно измерение (наблюдение) ничего не говорит о состоянии системы, и чтобы определить распределение вероятностей, требуется достаточно *длинная серия измерений*¹⁷ (это существенное изменение операций измерения по сравнению с классической механикой). Эти утверждения отличают “теорфизическую” интерпретацию от “копенгагенской”¹⁸. Они логически следуют из общепринятой “*вероятностной интерпретации волновой функции*” М. Борна, задающей правила, позволяющие по математическому образу состояния – волновой функции $\Psi_A(t)$, определить распределение вероятностей различных измеримых величин¹⁹ (часто акцент делают на положении частицы, хотя эти правила относятся к любой измеримой величине). *Волновая функция Ψ_A задает распределение вероятностей всех измеримых величин, отвечающих данному состоянию системы*. Если мы знаем волновую функцию Ψ_A , то мы можем узнать распределение вероятностей любой измеримой величины²⁰.

Постулаты Шредингера и Борна определяют основные свойства квантовых систем: вероятностный тип поведения и корпускулярно-волновой дуализм²¹. *Сочетание корпускулярных и волновых свойств* хорошо иллюстрируется на примере известного *двухщелевого эксперимента*: микрочастицы падают на экран с двумя щелями, за которым стоит фотопластинка, которая эти частицы поглощает. В соответствии с постулатами Борна каждое отдельное измерение даст локальную точку на втором экране-фотопластинке (корпускулярное свойство), но если провести достаточно много измерений, то *в распределении вероятностей* 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 еще способ построения математического образа физической системы – квантовый оператор Гамильтона $H^{кв}$, который входит в уравнение Шредингера. Стандартную процедуру его построения можно представить в виде “*процедуры квантования затравочной классической системы*”. Эта общая процедура состоит в следующем. Сначала берется 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 операторы²². В результате этого получают квантовый гамильтониан $H^{кв}$, т.е. математический образ квантовой системы, отвечающий квантовомеханической физической модели. Итогом будет квантовомеханическая модель атома с делокализованными состояниями (“орбитами”) электронов. Она в такой форме (но без такого особого названия) была сформулирована в фундаментальных работах 1927–30 гг. Джона фон Неймана и Поля Дирака [Нейман 1964; Дирак 1979, 156], а у Луи де Бройля она существует под именем “автоматический вывод волнового уравнения” [ДеБройль 1986, 45]. По сути, она является 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” [Бор 1971 2, 404–405]. Последние есть не что иное, как операторы в современной терминологии. При этом, по утверждению Джеммера, “фундаментальной особенностью, характерной для подхода Гейзенберга, был способ использова-

ния принципа соответствия Бора... Гейзенберг... рассмотрел... возможность “угадать” – в согласии с принципом соответствия (Бора. – *А.Л.*) – *не решение частной квантовомеханической задачи, а математическую схему новой механики* (курс. мой. – *А.Л.*)” [Джеммер 1985, 199]. Поэтому рассматриваемую “процедуру квантования затравочной классической системы” в “новой квантовой теории” можно считать *гейзенберговским обобщением боровского “принципа соответствия” “старой квантовой теории”*²³. В предлагаемой в данной работе формулировке указанная процедура *возводится в ранг теоретического постулата*, входящего в базовую систему исходных постулатов квантовой механики, подобно тому, как Бор возводил в ранг “чисто теоретического закона” свой “принцип соответствия” в старой квантовой теории” [Бор 1971 1, 505]²⁴.

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 величины²⁵, а вследствие этого и те же типы процедур измерения, что и в классической физике (так измерение положения микрочастицы осуществляется с помощью фотопластинки и метра (микрометра)). То же можно сказать и про “процедуры приготовления”: приготовление частиц с определенным импульсом, состояния которых описываются волновой функцией типа плоской волны, осуществляется по логике классической модели с помощью нагретой спирали, их излучающей, и соответствующего классического фильтра по импульсу. Благодаря процедуре квантования затравочной классической системы классическая физика оказалась встроенной в основания квантовой физики²⁶.

Указанная система постулатов дает неявное определение нового физического первичного идеального объекта – квантовой частицы. Модель конкретной 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 спином²⁷ 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 (фотоны) и фермионов (электроны, протоны, нейтроны), обладающих разными коллективными свойствами (“статистиками”). Это холистский²⁸ принцип. Из-за него система частиц не сводится к совокупности частиц. В многочастичных системах квантовой теории поля этот принцип проявляется в процедуре “временного упорядочения” в математическом слое²⁹. Без него нельзя описать явления сверхпроводимости и сверхтекучести при низких температурах и многие другие квантовые эффекты.

5. “Соотношение неопределенностей” Гейзенберга и “принцип дополнительности” Бора. Естественно, что свойства квантовой частицы 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 вероятностей) отвечает условию $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$. *“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 (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 [Джеммер 1985, 324–325]. Соответственно соотношению неопределенностей есть *свойство не измерения, а состояния*³⁰. Это главное содержание соотношения неопределеннос-

тей. Состояние, полностью описываемое волновой функцией, определяет распределение вероятностей для всех измеримых величин, включая взаимодополнительные.

Однако при обсуждении оснований квантовой механики часто выпячивают вопрос об отсутствии траектории у микрочастицы и объяснении этого отсутствия с помощью “соотношения неопределенности”. Вообще говоря, цель измерения – проявление (определение) состояния – может быть достигнута и при разрушении состояния системы или даже самой системы. Поэтому Паули ввел особый разряд “неразрушающих” измерений (обычно это достигается с помощью введения “пробного тела” в виде дополнительных частиц, взаимодействующих с системой, и т.п.). Только так можно измерять траекторию частицы. В классической физике предполагается, что при любой точности измерений можно сделать воздействие пробного тела сколь угодно малым. В квантовой механике этому мешает соотношение неопределенностей Гейзенберга для пробной частицы. В этом смысл “ γ -микроскопа Гейзенберга” (пробная частица – фотон, чтобы дать точное положение измеряемой микрочастицы, должна иметь состояние с маленьким Δx и вследствие этого с большим Δp_x , что ведет к сильному воздействию на измеряемую микрочастицу). Это рассуждение можно рассматривать как “отрицательный принцип соответствия”, объясняющий со стороны измерения, почему логика классической механики не противоречит отсутствию траектории у квантовой микрочастицы. Это вторичное следствие соотношения неопределенностей, обсуждение которого *значимо* и осмысленно лишь *в контексте “копенгагенской интерпретации”* (где отдельный акт измерения (наблюдение) связывают с состоянием). Оно часто формулируется в виде утверждения “измеряя одну величину, возмущаем другую”. Благодаря Н. Бору эта формулировка в “копенгагенской интерпретации” вытеснила основное значение соотношения неопределенностей.

Что касается “принципа дополнителности” Бора, то его суть сводится к фиксации корпускулярно-волнового дуализма (хотя существуют и другие более спорные, с нашей точки зрения, формулировки³¹). В этом плане действительно Бор и Борн исходили из учета обоих типов проявлений, в то время как их молодые коллеги Гейзенберг и Шредингер пытались свести дело к одной из сторон (соответственно корпускулярной или волновой) [Данин 1981]³². Бор пытался этот дуалистический подход использовать как новый тип определения для новых не наглядных понятий, т.е. решить ту проблему, которую в “теорфизическом” подходе выполняет гильбертовский неявный тип определения базовых понятий с помощью “ядра раздела физики” для квантовой механики. Ему казалось, что ему это удалось. Эйнштейну так не казалось, и он был прав. Боровского принципа дополнителности, идущего от эмпирических проявлений квантовых объектов, явно недостаточно, чтобы четко определить понятия квантовой механики.

6. Миф о “редукции (коллапсе) волновой функции” и особой роли наблюдателя. История формулировки “проблемы” начинается с Бора, который рассматривает измерение не как особую техническую операцию (сравнения с эталоном), а как физическое явление, как взаимодействие “между предметом и средством наблюдения”: “каждое наблюдение этих явлений связано с взаимодействием, которым нельзя пренебречь” [Бор 1971 2, 56]. К этому он добавляет приведенное выше “копенгагенское” прочтение “соотношения неопределенностей” Гейзенберга. Применяя его к измерению, он утверждает существование “неизбежного влияния на атомные явления при их наблюдении” [Бор 1971 2, 60]. Эту линию продолжил фон Нейман в [Нейман 1964], который, “руководствуясь статьей Бора о кванте действия и описании природы (1929 г.)... 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” [Джеммер 1985, 357]. Последнее есть не что иное, как так называемая проблема “редукции (коллапса) волновой функции”³³.

Для удобства анализа разобьем формулировку проблемы “редукции (коллапса) волновой функции” на следующие утверждения:

утверждение 1: измерение есть явление, которое должно описываться квантовой теорией;

утверждение 2: на языке квантовой теории это явление описывается как мгновенное изменение волновой функции системы, от суперпозиции $\Psi = (c_1\psi_1^u + c_2\psi_2^u + c_3\psi_3^u + \dots)$ (где совокупность $\{\psi_k^u\}$ представляет собой математический образ измеряемой величины U^{34}) к $\psi_{k_0}^u$ с вероятностью $|c_{k_0}|^2$ (в соответствии с правилами Борна); этот скачок и называется “редукцией (или коллапсом) волновой функции”;

утверждение 3: такой переход не описывается уравнением Шредингера и поэтому оказывается “незаконным” с точки зрения уравнений стандартной квантовой механики. Выводимая из последнего утверждения (опирающегося на два первых) неполнота современной квантовой механики и необходимость дополнительного развития ее оснований и составляет суть того, что со времен фон Неймана имеют в виду под “проблемой редукции (коллапса) волновой функции”.

Центральным утверждением, на котором основывается вся эта “проблема”, является “утверждение 1”, которое многим кажется очевидным. Так, Нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург, как и многие физики, рассуждающие на эти темы, утверждает: “Если описывать состояние электрона после его взаимодействия с атомами в фотопластинке с помощью волновой функции, то эта функция будет, очевидно, отлична от первоначальной и, скажем, локализована в “точке” на экране. Это и называют обычно редукцией волновой функции” (цит. по [Менский 2005, 414]). В этом “очевидно” и состоит корень всей проблемы. Поэтому проанализируем, что же за ним стоит. Что здесь считается “очевидным”? Очевидно, что измерение – это взаимодействие, это явление, которое можно теоретически описать, причем все без остатка. Очевидно “утверждение 1” (из приведенных выше трех утверждений). Но здесь делается неоправданный скачок: “появилась точка” и “произошел коллапс волновой функции” – не равнозначные утверждения. Первое – экспериментальный факт, второе – лишь возможная интерпретация этого факта.

Неверность введенной Бором и фон Нейманом постановки вопроса – “утверждения 1” – связана с игнорированием принципиальной разницы между процедурами измерения (и приготовления) как “внезауретическими” элементами (“строительным материалом”), используемыми в физике, и явлением (взаимодействием) как объектом теории. Это игнорирование лежит в основании “утверждения 1”, которое носит фактически не физический, а философский (натурфилософский) характер.

В начале XIX в. П. Лаплас порождает натурфилософию нового типа, в которой использует, вроде бы, понятия механики Ньютона, но без крайних операциональных частей. В результате чего по внешнему впечатлению базовые элементы его рассуждений как бы физические, а по сути – типичные натурфилософские (чисто умозрительные). Эта натурфилософия стала называться механицизмом. Этот механицизм имеет несколько аспектов. Среди них – всеобщий детерминизм, отрицающий свободную волю и случайность³⁵. Но самая главная для нас черта механицизма – *редукционизм*, состоящий в сведении всего к механике (в XIX в. – классической). Суть этого редукционизма и одновременно отношение к этому физиков очень ярко выразил видный физик и философ конца XIX в. Э. Мах: “Как бы вдохновенным тостом, посвященным научной работе XVIII ст., – говорит он, – звучат часто цитируемые слова великого Лапласа: “Интеллект, которому были бы даны на мгновение все силы природы и взаимное положение всех масс и который был бы достаточно силен для того, чтобы подвергнуть эти данные анализу, мог бы в одной формуле представить движения величайших масс и мельчайших атомов; ничего не было бы для него неизвестного, его взорам было бы открыто и прошедшее и будущее”. Лаплас разумел при этом, как это можно доказать, и атомы мозга... В целом идеал Лапласа едва ли чужд огромному большинству современных естествоиспытателей...” [Мах 1909, 153]. В результате этого редукционизма в механицизме забывается принципиальная разница между техническими операциями, связанными с деятельностью человека, и естественными явлениями природы. Лапласовская натурфилософия, которая, по сути, превращала измерение (и приготовление) в явление, разрушала структуру эксперимента. Это не имело серьезных последствий для физики того времени, где никто всерьез не рассматривал вопрос об опи-

сании с помощью уравнений Ньютона операции измерения длины стержня. Иная ситуация возникла в квантовой механике XX в. Здесь Шредингер (в “кошке Шредингера”) и многие другие физики, повторив рассуждение Лапласа (с точностью до замены механики Ньютона на квантовую механику)³⁶, породили “проблему измерения в квантовой механике”. “Проблемы” и “парадоксы” квантовой механики, включая “редукцию волновой функции”, основываются на этой механицистской натурфилософии³⁷.

Если убрать это ложное обоснование и четко зафиксировать границу между теоретической и операциональной частями, то становится ясно, почему неверно говорить, что “измерительный аппарат” есть “другая независимо приготовленная система”, т.е. физическая система того же уровня, что и “объектная система А, приготовленная в состоянии S” [Busch et al. 1991, 27]. Неверно говорить, что “изменение состояний вызывается измерением”, т.е. их “контакт” [Busch et al. 1991 4, 27] берется как взаимодействие двух систем, как естественное явление. Дело не в макроскопичности прибора, как утверждали Бор и др. [Аккарди 2004, 84] (в теории элементарных частиц стабильные микрочастицы являются “приборами” для измерения нестабильных микрочастиц), а в том, что это прибор, т.е. он осуществляет технические операции. *Измерения* (по определению, по своему функциональному месту) *проявляют состояние, изменение состояний – дело фильтров*.

Поясню этот тезис на примере “экрана со щелью”. Экран со щелью может выполнять различные функции. В области приготовления он будет выполнять роль “классического” фильтра, приготавливающего исходное состояние (в соответствии с “затравочной классической моделью”). Он может быть и элементом измерительного прибора. Но в обоих этих случаях он включен в технические операции и находится вне области применимости языка волновых функций, который корректен лишь для описания состояний и предназначен только для описания “первой” природы. Только находясь внутри исследуемой системы, экран со щелью будет “квантовомеханическим” фильтром, описываемым введенными фон Нейманом и Дираком проекционными операторами.

Итак, при правильном определении операций измерения нет места для явления “аказального и мгновенного изменения, обусловленного вмешательством наблюдателя”, а следовательно, нет места ни для “коллапса волновой функции” и других “парадоксов”, для решения которых у самого фон Неймана (в его классической книге [Нейман 1964]) предлагается введение в формулировку квантовой механики наблюдателя, а во второй половине XX в. – введение сознания и такой экзотики как многомировая интерпретация Эверетта – Уиллера – ДеВитта³⁸. В этих и других весьма характерных для философии квантовой механики рассуждениях имеет место забавная ситуация – вместо того чтобы, следуя структуре физики, возникшей в XVII в., с самого начала поместить измерение вне теории как техническую операцию, делают следующее: сначала наблюдатель растворяется в квантовой механике с помощью натурфилософии Лапласа, это порождает “проблемы измерения”, для решения которых призывается сознание наблюдателя, помещаемое на этот раз вне теории.

В предисловии к статье М.Б. Менского В.Л. Гинзбург пишет: “Не понимаю, почему так называемая редукция волновой функции как-то связана с сознанием наблюдателя. Например, в известном дифракционном опыте электрон проходит через щели и затем на экране (фотопластинке) появляется “точка”, т.е. становится известно, куда попал электрон... Разумеется точки на экране наблюдатель увидит и на следующий день после осуществления опыта, и при чем здесь какая-то особая роль его сознания, мне непонятно” [Менский 2005, 413–414]. Это – последовательная физическая позиция: физик имеет дело с объектами и операциями (измерения и приготовления), которые оторваны от конкретного “наблюдателя” и его (или их) сознания, т.е. объективированы. Эти операции четко описываются и неважно, кто их будет выполнять – Петров, Иванов или автомат.

“На сегодняшний день, – по словам Д.Н. Клышко, – по-видимому, все известные эксперименты количественно описываются стандартными алгоритмами квантовой теории и постулатом Борна³⁹. Снова и снова подтверждается лишь адекватность квантового формализма (при правильном выборе модели) и постулата Борна... “проблема редукции волновой функции” является лишь некоторой гипотезой (или постулатом), предложенной Дираком и фон Нейманом (1932 г.) и представляет собой типичный пример “порочного круга”:

сперва принимается на веру, что волновая функция по неизвестной причине уничтожается вне области регистрации (для измерения типа определения положения частицы), а потом это принимается за закон природы, согласно известному англоязычному выражению – “adopted by repetition” [Клышко, Липкин 2000, 761–762]. Часто редукцию представляют как “реальное” событие [Садбери 1989; Braginsky 1992]. В ряде учебников и монографий редукция объявляется одним из основных постулатов квантовой механики, как это делается, например, в [Садбери 1989] (но при этом на с. 294 делается следующее знаменательное примечание: “...При проведении тщательного различия между процедурой приготовления и процедурой измерения проективный постулат не нужен”). Проекционный постулат фон Неймана–Дирака фактически не нужен и никогда не используется для количественного описания реально наблюдаемых эффектов⁴⁰. Поэтому неудивительно, что в ряде работ понятие редукции и его необходимость подвергается сомнению (см. [Ballentine 1988; Home 1988; Margenau 1963; Namiki 1993; Quantum mechanics without reduction 1990])⁴¹. Даже среди копенгагенцев не все признавали наличие проблемы “коллапса волновой функции”⁴².

7. О “квантовой теории измерений”. В связи с попытками решения “проблемы” “редукции (коллапса) волновой функции” создается так называемая “квантовая теория измерения”, отцом которой является опять же фон Нейман. Чтобы разъяснить положение дел с последней, обратимся к анализу современного ее описания. “Квантовая теория измерений... основывается на “расщеплении” эмпирического мира на четыре “части”: (1) объекты системы А (которые наблюдаются), (2) аппараты Р (приготавливающие и регистрирующие приборы)⁴³, (3) окружение (“остатки” физического мира, которые намереваются игнорировать), (4) наблюдатель (О)” [Busch et al. 1991, 1]. Третий, как “остаток”, который не включают в физическую систему, находится, по своему определению, вне физической модели как в квантовом, так и в классическом случае. Четвертый находится вне физики со времен Галилея, у которого это место занимают безличные операции сравнения с эталоном.

Сравнение с эталоном является операцией, актом деятельности людей, а не естественным природным явлением (в обсуждаемом выше двухщелевом эксперименте можно включить в систему взаимодействие квантовой частицы с атомом фотопластинки, но фиксация положения этого атома фотопластинки производится каким-то прибором типа микрометра, и эта фиксация является операцией, которая не может рассматриваться как естественное явление). Аналогичным качеством обладают и операции приготовления. Это свойство “операциональных” элементов можно назвать “нетеоретичностью” (но не в позитивистском смысле чистого “эмпирического факта”, а в смысле принадлежности техническим операциям). В физике граница проходит между теоретическим описанием и операциями, а не между “наблюдаемым” и “ненаблюдаемым” (электрон – ненаблюдаем, но “приготавливаем”, его параметры ненаблюдаемы, но измеряемы), и не между микромиром и “классическим языком”⁴⁴ или “классическим прибором” Бора⁴⁵. Эту принципиальную границу фиксирует и фон Нейман. Но он, фиксируя ее как границу между “наблюдаемым” и “наблюдателем”⁴⁶, интерпретирует это в духе позитивизма Э. Маха: “Опыт может приводить только к утверждениям этого типа – наблюдатель испытал определенное (субъективное) восприятие, но никогда не к утверждениям таким, как: некоторая физическая величина имеет определенное значение” [Нейман 1964, 308]. Я же утверждаю, по сути, обратное: измеримая “физическая величина” имеет объективную вероятность “определенных значений”, а “наблюдатель” может быть заменен автоматом. Никакой “проблемы измерения” в смысле [Busch et al 1991] нет.

Наряду с такой “квантовой теорией измерения” существует теория измерений, которая, как и в классической физике, занимается вопросами отличия идеального измерения, фигурирующего в физической теории, от реального, выполненного в данной материальной реализации на основе имеющихся материалов и приборов. 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 подносящий этот метр человек (или машина-автомат). То же

имеет место и в квантовой механике. При этом возможно рассмотрение составной системы из объекта и части прибора, выступающего при этом аналогом “пробного тела”. Но эта процедура, как видно из более аккуратной формулировки Неймана, не приводит к принципиальным трудностям и описывается обычной квантовой механикой. “Редукция волновой функции” приписывается руками как ad hoc гипотеза в конце (на основании лишь механицистской натурфилософии)⁴⁷.

“Принципиальная разница” в месте, занимаемом измерением в квантовой и классической механике – миф. Отцами этого мифа являются Бор и фон Нейман. Формулировка этой “проблемы” связана отчасти с обсуждавшимся выше неверным утверждением “копенгагенцев” – что одно измерение определяет состояние квантовой системы, отчасти – с “копенгагенскими” попытками с помощью этой “особости” выйти из-под эйнштейновской критики.

* * *

Итак, в созданной в 1925–1927 гг. “новой” квантовой механике в “теорфизической” формулировке, изложенной выше (в п. 4), нет никаких “парадоксов” и она полна, ибо в противоположность [Busch et al. 1991, 27] *полнота квантовой механики* состоит не в теоретическом квантовомеханическом описании всех операций измерения (и приготовления), а так же как и в других разделах физики, в формулировке непротиворечивых оснований квантовой механики, включающих операции измерения (и приготовления). Именно поэтому после 1925–1927 гг. квантовая механика успешно развивается как “нормальная наука”, и большинство физиков мало обеспокоено проблемой “редукции волновой функции”, зачастую даже не зная о ней вовсе⁴⁸.

Причина упомянутого во введении непонимания, о котором говорит Р. Фейнман и другие – 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). И это естественно: если бы в старых понятиях можно было описать новые объекты, то не надо было бы создавать новые разделы физики. Такой объект как “квантовая частица”, которая распространяется сразу через две щели и описывается вероятностно, трудно наглядно представить (но то же можно сказать и про электромагнитную волну). Что делать, с конца XIX в. физики стали работать с более сложными объектами, но для них строят физические модели явлений (и объектов) так же, как это делают в классической механике или гидродинамике. Теоретическая модель явления в квантовой механике, как и в классической, обладает физическим, а не условным смыслом. И этот смысл можно понять, если понять суть двух методологических революций в физике, имевших место в XVII и на границе XIX и XX вв.

ЛИТЕРАТУРА

- Аккарди 2004 – Аккарди Л. Диалоги о квантовой механике. М., 2004.
Алексеев 1995 – Алексеев И.С. Избранные труды по методологии физики. М.: РУССО, 1995.
Бом 1965 – Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, 1965.
Бор 1971 – Бор Н. Избранные труды: в 2 т. М., 1970–1971.
Вопросы причинности 1955 – Вопросы причинности в квантовой механике. М., 1955.
Гейзенберг 1989 – Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука, 1989.
Гейзенберг 1971 – Гейзенберг В. Что такое “понимание” в теоретической физике // Природа. 1971. № 4.
Григорьян, Зубов 1962 – Григорьян А.Т., Зубов В.П. Очерки развития основных понятий механики. М.: Наука, 1962.

- Гринштейн, Зайонц 2008 – *Гринштейн Дж., Зайонц А.* Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. Долгопрудный, 2008.
- Данин 1981 – *Данин Д.* Вероятностный мир. М., 1981.
- Де Бройль 1965 – *Де Бройль Луи.* Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М., 1986.
- Джеммер 1985 – *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. М.: Наука, 1985.
- Дирак 1979 – *Дирак П.* Принципы квантовой механики. М., 1979.
- Клышко, Липкин 2000 – *Клышко Д.Н., Липкин А.И.* О “коллапсе волновой функции”, “квантовой теории измерений” и “непонимаемости” квантовой механики // *Электронный журнал “Исследовано в России”*. 2000. № 53. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/053.pdf>.
- Лаплас 1908 – *Лаплас П.С.* Опыт философии теории вероятностей. М., 1908.
- Легетт 1986 – *Легетт А.Дж.* Шредингерова кошка и ее лабораторные сородичи // *Успехи физических наук*. 1986. Т. 148. В. 4.
- Липкин 2007а – *Липкин А.И.* Объектная теоретико-операциональная модель структуры научного знания // *Философия науки* (под ред. А.И. Липкина). М.: ЭКСМО, 2007.
- Липкин 2007б – *Липкин А.И.* Философские проблемы квантовой механики // *Философия науки* (под ред. А.И. Липкина). М.: ЭКСМО, 2007.
- Липкин 2006 – *Липкин А.И.* Парадигмы, исследовательские программы и ядро раздела науки в физике // *Вопросы философии*. 2006. № 6.
- Липкин 2001 а – *Липкин А.И.* Основания современного естествознания. Модельный взгляд на физику, синергетику, химию. М.: “Вузовская книга”, 2001.
- Липкин 2001б – *Липкин А.И.* Существует ли явление “редукции волновой функции” при измерении в квантовой механике? // *Успехи физических наук* 2001. Т. 171. № 4.
- Мах 1909 – *Мах Э.* Популярно-научные очерки. СПб.: Образование, 1909.
- Менский 2004 – *Менский М.Б.* Квантовая механика, сознание и мост между двумя культурами // *Вопросы философии*. 2004. № 6.
- Менский 2000 – *Менский М.Б.* Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов // *Успехи физических наук*. 2000. Т.170. Вып. 6.
- Менский 2005 – *Менский М.Б.* Концепция сознания в контексте квантовой механики // *Успехи физических наук*. 2005. Т. 175. № 4.
- Нейман 1964 – *Нейман фон И.* Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964.
- Садбери 1989 – *Садбери А.* Квантовая механика и физика элементарных частиц. М.: Мир, 1989.
- Ballentine 1988 – *Ballentine L.E.* // *Int. J. Theor. Phys.* 1988. 27, 211.
- Фейнман 1987 – *Фейнман Р.* Характер физических законов. М.: Наука, 1987 с. 117.
- Фок 1951 – *Фок В.А.* Критика взглядов Бора на квантовую механику // *Успехи физических наук* 1951. Т. 45. № 1.
- Aspect 2002 – *Aspect A.* Bell’s Theorem: The Naive View Of An Experimentalist // “Quantum [Un] speakables – From Bull to Quantum information”, edited by R.A. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer, 2002.
- Ballentine 1970 – *Ballentine L.E.* The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics // *Rev. Mod. Phys.* 1970. V. 42. № 4.
- Braginsky 1992 – *Braginsky V.B., Khalili F.Y.* Quantum Measurement. 1992. Cambridge Univ.Press.
- Busch et al. 1991 – *Busch P., Laht, P.J., Mittelstaedt P.* The Quantum Theory of Measurement Berlin, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1991.
- Compton at al. 1925 – *Compton A.H., Simon A.W.* Directed Quanta of Scattered X-rays // *Phys.Rev.* 1925. V. 26.
- Dunn 1995 – *Dunn T.J., Walmsley I.A., Mukamel S.* Experimental Determination of the Quantum-Mechanical State of a Molecular Vibrational Mode Using Fluorescence Tomography // *Phys. Rev. Lett.* 1995. V. 74. № 6.
- Einstein A. 1949 – Albert Einstein : Philosopher-Scientist, Evanson, 1949.
- Home 1988 – *Home D., Whitaker M.A.B.* Interpretations of Quantum Measurement without the Collapse Postulate // *Phys. Lett.* 1988. V. A 128.
- Kurtsiefer 1997 – *Kurtsiefer Ch., Pfau T., Mlynek J.* Measurement of the Wigner function of an ensemble of helium atoms // *Nature* 1997. V. 386/13.
- Margenau 1963 – *Margenau H.* Measurement in Quantum Mechanics // *Annals of Physics* (N.Y.). 1963. V. 23.
- Namiki 1993 – *Namiki M., Pascazio S.* Fundamental Problems in Quantum Theory // *Phys. Rev.* 1993. V. A 44.
- Peres 1984 – *Peres A.* What is a state vector? // *Amer. J. of Physics.* 1984. V. 52.

Quantum mechanics 1990 – Quantum mechanics without reduction. Eds. M Sini, J. Levy-Leblond. Bristol: Hilger, 1990.

Suppe 1974 – *Suppe F.* The Search for Philosophic Understanding of Scientific Theories // The Structure of Scientific Theories (Edited with a Critical Introduction by Frederick Suppe). Urbana, Chicago, London, 1974.

Wheeler 1977 – *Wheeler J.A.* Include the Observer in the Wave Function? // Quantum mechanics a half century later. Dordrecht, 1977.

Wigner 1963 – *Wigner E.P.* The Problem of Measurement // Amer. J. of Physics. 1963. V. 31.

Примечания

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ N 08-06-00229а.

² По сути это следование первому методологическому принципу Декарта.

³ Ядро раздела физики в физике выполняет роль, аналогичную той, которую у Гильберта выполняла система аксиом в геометрии. Посредством ядра раздела физики осуществляется неявный тип определения первичных идеальных объектов.

⁴ Поэтому в логике теоретической физики, основанной на неявном определении, корректнее говорить как о “первичном идеальном объекте”, не о “материальной точке”, а о “механической частице”, подчеркивая зависимость первичного идеального объекта от других понятий данного раздела физики.

⁵ Это декартовский взгляд на место математики. У Пифагора был другой – математические объекты (числа, фигуры) – это первоэлементы мира. Некоторые физики и математики, занимающиеся общей теорией относительности и стремящиеся к “теории всего”, придерживаются пифагорейского взгляда.

⁶ Состоящий из “первичных идеальных объектов” “вторичный идеальный объект” дает физическую теорию явления, имеющую ту же структуру.

⁷ Многие физики в своих мировоззренческих (идеологических) высказываниях следуют идущим от 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 плохо сочетается с существованием в физической теории таких теоретических объектов, как электрон, атом, и другие.

⁸ В статье “Что такое “понимание” в теоретической физике?” [Гейзенберг 1971], 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 и др. показывают, что ощущение “понятности” возникает у физиков после построения соответствующих моделей. Более развернуто эта тема обсуждается в [Липкин 2001а; 2007а].

⁹ Подобное членение можно найти и у Гейзенберга [Гейзенберг 1989, 20], а также у Г. Маргенау [Margenau 1963], но там оно трактуется по-другому.

¹⁰ То, что речь идет о “парадигмах”, т.е. разных “несоизмеримых” подходах, подтверждает сделанное Эйнштейном в 1949 г., после четверти века споров с Бором, заявление, что, “несмотря на многочисленные попытки”, он “так и не смог ... уяснить” “точной формулировки” “боровского принципа дополненности” [Einstein 1949, 674].

¹¹ Точнее, речь идет о двух семействах интерпретаций, более или менее единых в отношении указанных далее трех пунктов.

¹² Речь идет о “новой квантовой теории” – нерелятивистской квантовой механике, созданной в 1925–27 гг. 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 других явлений.

¹³ Можно исходить из постулатов Гейзенберга, которые эквивалентны постулатам Шредингера. Но в представлении (математическом представлении) Шредингера проще излагать физику дела.

¹⁴ Поэтому у нее нет собственного физического смысла, поиском которого занимаются некоторые авторы, например [Peres 1984].

¹⁵ Понятие “распределение вероятностей” можно дать на примере стрельбы по цели. В силу ряда случайных факторов (качества оружия, меткости стрелка, силы ветра и т.п.) будет иметь ме-

сто случайное отклонение пули от центра мишени. На основании достаточно длинной серии из N выстрелов можно построить распределение вероятностей положений x попаданий пули (рассмотрим одномерную модель) такое, что вероятность попадания пули в диапазоне от x_k до x_{k+1} будет пропорциональна площади соответствующего сегмента под кривой распределения вероятностей. В простейшем (но широко распространенном) случае это распределение вероятностей представляет собой колоколообразную кривую, которую можно охарактеризовать двумя величинами: положением ее максимума (характеризующего среднее значение) и “мерой неопределенности” Δx (квадратный корень дисперсии), характеризующей отклонение от него. Но возможны сколь угодно сложные формы, например соответствующие интерференции от двух щелей.

¹⁶ Очень часто при изложении квантовой механики акцент делают на средних значениях, а не на распределении вероятностей.

¹⁷ Значения же этих величин в отдельном акте измерения (наблюдения) сопоставить с состоянием системы (если оно не приготовлено в особом “собственном” состоянии) нельзя ни до, ни после этого акта измерения.

¹⁸ “Копенгагенская” интерпретация в этом месте не совсем последовательна: утверждая вероятностное описание состояния квантового объекта, нельзя говорить про состояние на основе единичного акта измерения.

¹⁹ Согласно этой процедуре измеримой величине U можно поставить в соответствие математический образ в гильбертовом пространстве волновых функций в виде оператора u^{op} или набора его собственных функций $\{\psi_k^u\}$. Согласно борновским правилам результат отдельного акта измерения дает определенное собственное значение u_k оператора u^{op} . Вероятность этого результата пропорциональна квадрату абсолютной величины амплитуды соответствующей компоненты разложения волновой функции в базисе собственных функций $\{\psi_k^u\}$ (т.е. $|c_k|^2$, если $\Psi_A = \sum_k c_k \psi_k^u$). Такая формулировка приведена, например, у Луи де Бройля, где эта процедура 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” [ДеБройль 1965, 173–174].

²⁰ И наоборот, набор распределений вероятностей определенных величин в современных томографических методах измерения состояний в квантовой механике (см. [Dunn 1995; Kurtsiefer 1997]) определяет состояние системы и ее математический образ (в виде аналога волновой функции).

²¹ 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.

²² Например, компоненту импульса частицы p_x меняют на оператор $(i\hbar/4\pi)\partial/\partial x$.

²³ “Принцип соответствия” Бора заключался в “требовании непосредственного перехода квантотеоретического описания в обычное в тех случаях, когда можно пренебречь квантом действия” [Бор 1971 2, 66]. За счет этого определялись неизвестные параметры в формулах “старой” квантовой теории.

²⁴ Если классический гамильтониан содержит произведение множителей, квантовые аналоги которых не коммутируют между собой [Дирак 1979, 156], то требуется введение дополнительных операторов упорядочения.

²⁵ “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” [Дирак 1979, 156].

²⁶ В результате квантовая механика (как и теория относительности [Липкин 2001а]) как бы надстраивается над классической физикой, существенным образом используя ее физические модели, хотя и изменяя их (в более ранний “классический” период этот прием не использовался).

²⁷ Речь идет о нерелятивистской квантовой механике. В квантовой электродинамике электрон со спином вводится по-другому.

²⁸ 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.

²⁹ Ярким примером этого являются введенные в рассмотрение Эйнштейном, Подольским и Розеном “перепутанные” состояния двух частиц, коррелиция 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 будет меняться, как бы далеко лучи не ушли друг от друга). Эти корреляции описываются в рамках существующей квантовой механики. “Парадокс” здесь получается, если рассматривать эту двухчастичную систему как две одночастичные, что неверно.

³⁰ Здесь мы имеем прямую аналогию с явлением дифракции у волн: если мы захотим локализовать волну в пространстве с помощью экрана с маленькой щелью, то в силу *дифракции* после прохождения щели будет большая неопределенность по направлению импульса; уменьшение последней требует увеличения щели, что ведет к увеличению неопределенности положения вплоть до полной нелокализации в плоской волне, отвечающей состоянию микрочастицы с определенным импульсом.

³¹ Сюда следует отнести и боровский миф о “невозможности строгого разделения явления и наблюдения” и о том, что “нельзя строго разграничить объект и субъект” [Бор 1971 2, 58], который более подробно анализируется в [Клышко, Липкин 2000; Липкин 2001; 2006].

³² Кроме того, если в боровском утверждении, что “только совокупность разных явлений может дать более полное представление о свойствах объекта”, слово “явление” заменить на “измерение”, и свести его к утверждению, что, для того чтобы путем измерения выявить состояние квантовой системы-объекта, необходимо произвести серии измерений взаимодополнительных величин, то это будет отвечать положению дел в современных томографических методах измерения состояний в квантовой механике.

³³ Разделяя основные тезисы копенгагенцев о вероятностном описании и о том, что акт измерения (наблюдение) порождает состояние, фон Нейман показывает, что последний из них приводит к новой проблеме, добавляя тем самым еще один широко обсуждаемый “парадокс” в копилку антикопенгагенцев, в поддержку их тезиса о неполноте (неокончателности) современной квантовой механики.

³⁴ Собственная функция для оператора измеряемой величины U .

³⁵ “Всякое имеющее место явление связано с предшествующим... мы должны рассматривать настоящее состояние вселенной как следствие ее предшествующего состояния и как причину последующего”. Случайность есть “лишь проявление неведения, истинная причина которого – мы сами” [Лаплас 1908, 8–9].

³⁶ “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” [Бом 1965, 668] (приблизительно то же говорит Нейман [Нейман 1964, 307–308]).

³⁷ Этому мировоззренческому (а не физическому) доводу XIX в. можно противопоставить другой мировоззренческий тезис, принадлежащий системному подходу XX в., утверждающему, что система обладает свойствами, которые не сводятся к свойствам ее элементов, вследствие чего ни жизнь, ни поступки людей, в том числе операции измерения (включающие процедуру сравнения с эталоном) не могут быть сведены к физическим явлениям.

³⁸ Предполагается, что каждая компонента в суперпозиции $\Psi = (c_1\psi_1^b + c_2\psi_2^b + c_3\psi_3^b + \dots)$ «соответствует отдельному миру. В каждом мире существует своя квантовая система и свой наблюдатель, причем состояние системы и состояние наблюдателя скоррелированы. Процесс же измерения можно назвать... процессом “расщепления” миров. В каждом из параллельных миров измеримая величина b имеет определенное значение b_i , и именно это значение и видит наблюдатель, “поселяющийся в этом мире»» [Аккарди 2004, 25]. Согласно М.Б. Менскому в этой интерпретации считается, что “сознание наблюдателя расслаивается, разделяется в соответствии с тем, как квантовый мир расслаивается на множество альтернативных классических миров” [Менский 2005, 423–424]. При этом “никакой редукции при измерении не происходит... Любой наблюдатель тоже оказывается в состоянии суперпозиции, т.е. его сознание “расщепляется” (“возникает “квантовое расщепление” наблюдателя”), в каждом из миров оказывается “двойник”, сознающий то, что происходит в этом мире” (такое расщепление сознания очень напоминает то, что в психиатрии называется шизофренией). К этому М.Б. Менский добавляет утверждение “что селекция альтернативы должна быть осуществлена сознанием” [Менский 2005, 425]. Кроме того, многомировая интерпретация содержит множество произвольных *ad hoc* гипотез и “принципиально... не может быть проверена экспери-

ментально”. Нет и связи многомировой интерпретации с “квантовой криптографией” и “квантовым компьютером”, которые используют свойства (идеи) не многомировой интерпретации, а “перепутанных” состояний, введенных в знаменитом мысленном эксперименте Эйнштейна, Подольского, Розена.

³⁹ Включая современные реальные экспериментальные реализации мысленного эксперимента Эйнштейна, Подольского, Розена (ЭПР) и “телепортации” состояний фотона.

⁴⁰ То же можно сказать и о применении в “квантовой теории измерений” концепции декогеренции [Менский 2000], действительной областью применения которой являются задачи по взаимодействию квантовой системы с термостатом и систем, состоящих из большого числа атомов (мезосистем) (подробнее в [Липкин 2001б]).

⁴¹ Те же корни имеет и “парадокс кота Шредингера”, его отсутствие связано с тем, что взрывное устройство и кот относятся к измерительному прибору и поэтому не описываются волновой функцией. Кроме того, он существует только в рамках копенгагенской интерпретации, где отдельный акт измерения (наблюдение) создает состояние. При этом делающееся сопоставление кота Шредингера с макроскопическими по размерам сверхпроводящими кольцевыми токами в SQUIDax [Blatter 2000; Гринштейн, Зайонц 2008, 217–227] неправомерно, поскольку эти токи (и их взаимодействие с окружением), в отличие от кота, выступают в качестве исследуемой системы, описываемой квантовой механикой, и никаких парадоксов здесь не возникает.

⁴² Под “копенгагенской интерпретацией” я имею в виду “копенгагенский дух” [Howard 2004], в рамках которого пункт о *соотношении между состоянием физической системы и измерением* имеет различные формулировки. Так, Бор формулировал его как “неразделимую пару из прибора и объекта” без “коллапса волновой функции или какой-либо другой глупости, которая из нее следует, такой как привилегированная роль для субъективного сознания наблюдателя” [Howard 2004, 669], в то время как другие версии включали подобные утверждения.

⁴³ Я заменил оригинальные обозначения S, A и T, обозначениями A, P и S, чтобы они соответствовали обозначениям, используемым мной в статье и ряде ссылок.

⁴⁴ Как у Бора: “Экспериментальная установка и результаты наблюдений должны описываться однозначным образом на языке классической физики” [Бор 1971 2, 406–407, 392–393]. Его обоснование необходимости “классичности” приборов опирается на утверждение, что иначе нельзя бы было “рассказать, что мы сделали и что узнали в итоге”. Но что такое “обычный язык” и “классическая физика”? И язык и физика развиваются. Новые понятия возникают вместе с новыми разделами физики. Так в конце XIX в. “неклассическим” и непонятным понятием было электромагнитное поле. Язык позволяет формулировать и новые “неклассические” понятия.

⁴⁵ Или его современными переложениями в виде “значений показаний указателя наблюдаемой” [Busch et al. 1991, 27].

⁴⁶ “Однако в любом случае, сколь далеко ни продолжали бы мы вычисления – до ртутного сосуда термометра, до его шкалы, до сетчатки или до клеток мозга – в некоторый момент мы должны будем сказать: а это воспринимается наблюдателем. Это значит, что мы *всегда должны делить мир на две части – наблюдаемую систему и наблюдателя*. В первой из них мы можем, по крайней мере принципиально, сколь угодно подробно исследовать все физические процессы; в последней это бессмысленно. Положение границы между ними в высокой степени произвольно... Однако это обстоятельство ничего не меняет в том, что при каждом способе описания *эта граница должна быть где-нибудь проведена*, если только все не проходит впустую, т. е. если сравнение с опытом должно быть возможным (курсив мой. – А.Л.)” [Нейман 1964, 307–308].

⁴⁷ К этому следует добавить, что так называемая “проблема квантовых измерений” часто рассматривается как смесь двух явлений: 1) взаимодействия квантовой частицы (системы) с квазиклассической системой или с квантовой статистической системой, которая описывается матрицей плотности, а не волновой функцией, и 2) собственно “редукции волновой функции”. Но первая не представляет каких-либо принципиальных проблем.

⁴⁸ Сам я услышал о ней уже после окончания МФТИ и защиты диссертации по квантовой механике. Поэтому, будучи уверен, что никаких проблем в основаниях квантовой механики нет, надо только правильно понять то, что изложено в курсе “Теоретической физики” Л.Д. Ландау и Е.М. Лившица, я по окончании МФТИ в середине 1970-х годов получил основные моменты того, что представлено здесь в качестве “теорфизической” интерпретации квантовой механики. В формировании последней очень важную роль сыграли академик И.В. Обреимов и профессор Г.П. Щедровицкий.