

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕС-
КИЙ ИНСТИТУТ. КАФЕДРА МАРКСИСТСКО-ЛЕНИНСКОЙ ФИЛОСОФИИ.

Категория физической реальности в квантовой механике и
"квантовая логика".

Панов Александр Дмитриевич, Институт Атомной Энергии имени
И.В. Курчатова.

Преподаватель: Кайдаков Станислав Васильевич.

План.

I. Физическая реальность в квантовой механике.

1. Понятие физической реальности.
2. Постановка вопроса о физической реальности в квантовой механике.
3. Физическая реальность в ортодоксальной копенгагенской интерпретации и ее критика.
4. Состояния и измерения – наблюдаемая физическая реальность квантовой механики.
5. Непоследовательность копенгагенской интерпретации в отношении ненаблюдаемости "индивидуальной истории".
6. Критика расщепления реальности на наблюдаемую и ненаблюдаемую в классической физике.

II. О статусе "квантовой логики".

1. Эмпирический статус логики.
2. Постановка задачи о квантовой логике.
3. Аппарат квантовой логики.
 - 3.1. Двухзначные наблюдаемые и квантовые высказывания.
 - 3.2. Квантовые логические связи, нарушение законов дистрибутивности.
4. Статус "квантовой логики".
 - 4.1. Философские аспекты и критика позиции Бора о ненужности квантовой логики.
 - 4.2. "Квантовая логика" – не логика.
5. Постановка вопроса о скрытых параметрах как вопроса о "скрытой логике".
6. О возможности отражения неклассической логики в человеческом сознании.

III. Резюме.

I. Физическая реальность в квантовой механике.

Категория физической реальности не вполне эквивалентна философской категории объективной реальности. Физическая реальность вводится для обозначения "совокупности теоретических объектов, репрезентирующих свойства объективно реального мира в рамках данной физической теории" [1]. Таким образом, физическая реальность в этом понимании связывается с некоторой конкретной физической теорией. Мы под этим термином будем понимать также те аспекты объективной реальности, которые находят отражение в этой теории.

Предметом нашего обсуждения в этом разделе будет физическая реальность квантовой механики. Постановка этого вопроса в квантовой механике связана с особой ролью измерительного прибора и процесса измерения в познании квантовых закономерностей. Применительно к квантовой механике проблема может быть сформулирована следующим образом: Что именно описывает и предсказывает квантовая теория — поведение макроскопических приборов при взаимодействии с квантовыми объектами или квантовые объекты "сами по себе", их "индивидуальную историю"? Можно ли познать "объективный мир микрообъекта" или только реакцию внешнего макросреды на его существование?

В классической физике аналогичный вопрос никогда не ставился явно. Считалось самоочевидным, что система может быть описана в отрыве от средств наблюдения. Относительность движения к системе отсчета не играет роли, так как связь различных описаний осуществляется простым пересчетом координат и никак не затрагивает сам объект. Переход от нерелятивистской физики к теории относительности ничего не меняет по существу. Такое положение в классической физике связано с допущением, что обратное воздействие процесса измерения на эволюцию объекта может быть либо сделано как угодно малым, либо полностью учтено или скомпен-

сировано. Кроме этого предполагается, что в любой момент времени с произвольной точностью могут быть измерены какие угодно величины, характеризующие систему. Предположение о возможности изучения системы "самой по себе" известно как абсолютизация физического объекта [2].

Хорошо известно, что в квантовой механике ситуация в корне отличается от классической физики. Воздействие измерительных приборов на микрообъект в принципе не может быть сделано ни пренебрежимо малым, ни контролируемым. Это положение представляет собой фундаментальный закон природы, что выражается в том, что обратное воздействие измерительных приборов на объект измерения регулируется новой мировой постоянной — квантом действия \hbar . Если бы было $\hbar = 0$, то воздействие измерительных приборов на объект могло бы быть сделано как угодно малым и абстракция абсолютизации физического объекта соответствовала бы реальному положению вещей и в микрофизике. Однако $\hbar \neq 0$, что находит свое выражение в том, что, во-первых, любое измерение нарушает свободную эволюцию системы, во-вторых — в существовании пар так называемых дополнительных друг к другу физических величин (терминология Нильса Бора), которые одновременно не могут быть измерены с произвольной точностью. Для точного измерения дополнительных величин требуются взаимно исключаящие экспериментальные условия, что не имеет аналога в классической физике. Это положение известно как принцип дополнительности Бора, точнее говоря, это одна из возможных его формулировок.

Основная трудность в определении того, что следует считать физически реальным в квантовой механике, связана с неустранимостью воздействия измерения на объект. Так как измерения проводятся приборами, поведение которых описывается классической физикой (только такие объекты и считаются приборами) и показания которых воспринимаются непосредственно, ни у кого не вызывает сомнений, что все, что непосредственно касается поведения приборов в микрофизическом эксперименте, определенно нужно считать физически реальным. Иначе обстоит дело с

"индивидуальной истории" квантового объекта. С момента возникновения квантовой теории берет свое начало дискуссия вокруг этого вопроса, которую нельзя считать законченной и в настоящее время. Более того, можно отметить обострение и непрерывное нарастание дискуссии вокруг этого и других вопросов, касающихся оснований квантовой механики, в течение последних примерно пятнадцати лет.

Наиболее известна позиция сторонников так называемой копенгагенской интерпретации квантовой механики, главным идеологом которой был Нильс Бор, и которая в той или иной степени принимается большинством физиков. Главным руководящим принципом в решении вопроса о том, что следует считать физически реальным, у сторонников копенгагенской интерпретации является принцип наблюдаемости. По иронии судьбы этот принцип впервые ясно был сформулирован Эйнштейном, который позже стал последовательным противником копенгагенской интерпретации. Принцип наблюдаемости сам допускает различные формулировки и толкования, но основное его содержание сводится к тому, что физически реальным является только то, что можно измерить непосредственно, в реальном или хотя бы в мысленном эксперименте. В этом смысле, например, одновременное существование дополнительных величин не является физически реальным, так как они не могут быть измерены одновременно. В наиболее ортодоксальном варианте копенгагенской интерпретации индивидуальная история микрочастицы также не признается физически реальной. Основанием для этого служат примерно следующие рассуждения. Действительно, индивидуальная эволюция является физически реальной, если ее можно пронаблюдать. Пронаблюдать — это значит в последовательные моменты времени определить, в каком состоянии находится система. Но для этого необходимо произвести какие-то измерения, которые немедленно нарушат ее естественную эволюцию и последующие измерения не дадут представления об индивидуальной истории. Тем, что состояние полностью характеризуется только взаимно дополнительными величинами аргументируется также и то, что состояние невозможно определить и для одного-единственного момента времени. ~~Следовательно~~ Следовательно индивидуальная история ненаблюдаема,

а потому и не является частью физической реальности. Тогда кроме поведения приборов не остается никакой другой квантовой физической реальности, и именно поведение приборов (и только его) призвана описывать физическая теория. Словами Нильса Бора [3]: "Это обстоятельство* очевидно исключает всякую возможность описания судьбы отдельного фотона как причинного события в пространстве и времени. Однако это никоим образом не предполагает отказа от всестороннего описания опыта, которое полностью исчерпывается статистическими законами..." Это была одна из причин, которая привела к полемике Эйнштейна с представителями копенгагенской школы (главным образом с Бором, см. [4, стр. 51-94]), один из главных мотивов которой так сформулировал Гейзенберг *Бор* [5, стр. 116]: "...Эта [копенгагенская] интерпретация все-таки не дает никакого описания того, что происходит на самом деле, независимо от наблюдений или между нашими наблюдениями. Что-нибудь должно, ведь, однако, происходить — в этом мы можем не сомневаться".

Ниже мы постараемся показать, что заключение о том, что только поведение приборов представляет физическую реальность неприемлемо с философской точки зрения, а заключение о ненаблюдаемости индивидуальной истории микросистемы критикуемо по существу.

Для нашего анализа интерес представляет следующее высказывание В.А. Фока [2]: "...В категорию средств наблюдения входят как органы чувств человека, так и приборы. И между тем и другим нет принципиальной разницы... Можно сказать, что приборы являются расширением органов чувств человека. Или, если угодно, ту же мысль можно выразить так: органы чувств являются приборами, вмонтированными в организм

* Имется в виду корпускулярно-волновой дуализм, который является одним из частных выражений принципа дополнительности.

человека". Хотя в одном пункте эта мысль представляется несколько спорной (за показаниями прибора могут одновременно следить несколько человек и тем они объективизируются, "показания" же органов чувств воспринимаются всегда субъективно), сходство приборов и органов чувств очевидно. Отсюда следует, что трактовка, согласно которой квантовая механика не описывает ничего кроме поведения приборов при воздействии на них квантовых объектов, чрезвычайно близка субъективному идеализму, согласно которому наука призвана лишь упорядочивать чувственные восприятия. Заметим, все-таки, что ее нельзя считать тождественной субъективному идеализму.

Необходимо, правда, отметить, что внутри копенгагенской интерпретации существует широкий спектр оттенков мнений, и ортодоксальная позиция в отношении физической реальности характерна в основном для ранней копенгагенской школы. Позже наметилось определенное смягчение ~~и~~ позиций, которое можно, в частности, проследить по работам Бора разных лет, собранным в книге "Атомная физика и человеческое познание".

Каков же выход из создавшегося положения? По-видимому его дают следующие соображения (в этом пункте наша трактовка близка к работе [6]).

Во-первых, несмотря на то, что ощущения действительно являются источником всех наших знаний о мире, наши знания не являются только описанием взаимосвязи наших ощущений, но являются отображением объективной реальности. Точно так же, из того, что приборы являются единственным источником ~~первичной~~ информации о микромире не следует, что квантовая теория должна рассматриваться как описание связи показаний приборов. Напротив, мы должны признать, что наблюдения и измерения отражают объективную картину того, что происходит независимо от наших приборов и ощущений.

Во-вторых, неверным представляется утверждение, что физически реальным может считаться только то, что непосредственно измеримо и наблюдаемо. Понятие ненаблюдаемой физической реальности совсем не яв-

ляется философским нонсенсом, так как ненаблюдаемость того или иного аспекта физической реальности еще не означает, что он не дан в практике и, следовательно, непознаваем. Напротив, и ненаблюдаемая объективная реальность может быть дана человеку в практике ее теоретического описания на языке математических моделей или каком-нибудь другом; соответствует ли полученное таким образом знание истине может показать проверка предсказаний построенной теории и использование ее в практической деятельности. В частности, даже если индивидуальная эволюция и ненаблюдаема, ее все-таки следует признать физически реальной в квантовой механике, так как она находит свое отражение в математическом аппарате теории, а все ее предсказания хорошо подтверждаются экспериментом.

И, наконец, третье. С одной стороны, процесс измерения можно трактовать как взаимодействие субъекта и объекта, так как приборы, с принципиальной точки зрения, можно рассматривать как продолжение органов чувств [2]. Но, с другой стороны, сам субъект в то же время является и объектом, поэтому в данном случае взаимодействие происходит по тем же законам, что и между квантовым объектом и объектом макроскопических размеров в отсутствие человека. В действительности процесс измерения следует трактовать как один из типов взаимодействия, имеющих место в природе. Это положение в корне противоречит, например, предположению фон Неймана [7, стр. 306-309], согласно которому основную роль в так называемой редукции волновой функции, имеющей место в процессе измерения, играет включение на заключительной стадии сознания человека. Это, однако, неприемлемо даже с практической точки зрения. Действительно, например излучение света атомом сопровождается редукцией волновой функции точно такого же типа, что и в процессе измерения, в то время как для этого, очевидно, вовсе не требуется присутствие человека, процесс протекает спонтанно (светили звезды и до нас). Таким образом, даже если и отрицать физическую реальность эволюции квантовой системы самой по себе, все же неверно трактовать кван-

товую механику, как описывающую только наблюдения, но скорее как описывающую "взаимодействия типа измерений", основной отличительной чертой которых является, как известно, то, что они сопровождаются необратимыми процессами в макроскопических объектах.

Одним из следствий проведенного анализа является, в частности, следующая альтернатива в отношении индивидуальной истории микрообъекта: (а) индивидуальная история физически реальна но ненаблюдаема и (б) индивидуальная история физически реальна и наблюдаема. Альтернатива (а) принимается, например, в упомянутой выше работе [6]. Обсудим проблему индивидуальной эволюции микросистемы с точки зрения ее наблюдаемости.

Знать эволюцию системы — это значит знать ее состояние в любой момент времени. А что значит "знать состояние системы"? В квантовой механике состояние системы считается полностью заданным, если задана ее волновая функция Ψ . Однако волновая функция не является непосредственно измеримой величиной, значит просто "измерить" состояние системы вообще нельзя. То, что реально можно измерить — только значения наблюдаемых величин, характеризующих систему, причём многие такие измерения являются взаимно исключающими. Более того, значения наблюдаемых величин не предсказываются однозначно состоянием системы, над которым проводятся измерения. Состоянием определяются только вероятности получения тех или иных значений, и в этом заключается принципиальная статистичность и акаузальность квантовой механики. Значит максимум, что может интересовать экспериментатора — это распределения вероятностей для всех физических величин, которые могут быть измерены для данной системы. В этом смысле задание распределения вероятностей всех физических величин (в том числе и взаимно дополнительных, которые не могут быть измерены одновременно) однозначно характеризует состояние системы в данный момент времени. Действительно, можно показать, что все эти распределения однозначно (с точностью до не-существенного постоянного множителя) определяют волновую функцию Ψ ,

а значит такое описание эквивалентно описанию с помощью волновой функции, исчерпывающему с точки зрения квантовой механики. Фок охарактеризовал такое положение вещей сказав, что состояние системы — это совокупность всех потенциальных возможностей при измерениях

[2; 8, стр. 15-17]. Но нетрудно видеть, что за эволюцией потенциальных возможностей во времени в принципе можно проследить (по крайней мере в мысленном эксперименте). Для этого в начале промежутка времени, который нас интересует, надо многократно воспроизводить одну и ту же систему (например электрон) в одинаковых состояниях, что допускается квантовой механикой. Многократное воспроизведение системы позволяет для любого интересующего нас момента времени после приготовления системы измерить все интересующие нас распределения вероятностей и, тем самым, воспроизвести состояние системы (как полный набор потенциальных возможностей). Такую процедуру можно провести для любого интересующего нас момента времени, что и означает наблюдение эволюции системы. Таким образом, индивидуальная история системы наблюдаема. На основании аналогичных рассуждений такой вывод со всей определенностью делает Дж. М. Яух: "Состояние — измеримая величина" [9, стр. 93]. Однако в действительности вывод не столь очевиден.

С точки зрения так называемой московской интерпретации квантовой механики, главным проводником которой являлся Д.И. Блохинцев [10, 11], подобный мысленный эксперимент должен трактоваться по-другому. Согласно этой точке зрения квантовая механика вообще не описывает индивидуальных квантовых системы ни в смысле их индивидуальной эволюции, ни в смысле предсказания результатов измерений, но описывает только ансамбли квантовых систем. Поэтому та информация, которая получается в описанном выше эксперименте описывает не индивидуальную эволюцию квантовой системы, но "индивидуальную" коэволюцию ансамбля одинаковых квантовых систем. Истинно же индивидуальная эволюция не только не наблюдаема, но и вообще не имеет смысла. Однако и распределения вероятностей значений физических величин (т. е. показаний приборов), характеризующих систему, и индивидуальная эволюция системы ~~состояния~~

с точки зрения московской интерпретации являются наблюдаемыми величинами в совершенно одном и том же смысле, никакой принципиальной разницы здесь нет. Поэтому если мы признаем предсказания о поведении макроскопических приборов соответствующими наблюдаемым величинам, то точно так же мы должны признать наблюдаемой индивидуальную эволюцию квантовых систем. Таким образом, как поведение макроприборов, так и индивидуальную историю квантовых систем видимо следует признать физически реальными и относящимися к одному и тому же типу физической реальности — а именно, к наблюдаемой физической реальности (в терминологии работы [6]).

Теперь отметим, что позиция ортодоксальной копенгагенской интерпретации по вопросу о наблюдаемости индивидуальной эволюции микросистемы представляется непоследовательной. Действительно, вывод о ее ненаблюдаемости фактически делается на том основании, что эволюцию нельзя пронаблюдать имея дело с одним экземпляром квантовой системы всего один раз. Но с этой точки зрения и распределение вероятностей любой физической величины нельзя признать наблюдаемым, так как его невозможно установить в одном измерении над единственной системой. Однако распределения вероятностей признаются наблюдаемыми. Фактически здесь без какой либо мотивировки используются разные критерии наблюдаемости.

Мы не можем согласиться с выводом работы [6] о расщеплении физической реальности квантовой механики на два типа: наблюдаемую — соответствующую измерениям и ненаблюдаемую — соответствующую состояниям. Тем более мы не можем согласиться с выводом этой работы, что такое расщепление реальности имеет место уже в классической физике, именно, что поле и вещество являются соответственно ненаблюдаемым и наблюдаемым типом физической реальности. Автор [6] делает такой вывод на основании того, что поле "не наблюдается непосредственно", а только лишь с помощью пробных тел. Неверно, что наблюдение с помощью пробных тел не является непосредственным наблюдением. С помощью пробных тел поле можно измерить сколь угодно точно в каждой точке простран-

ства, т.е. точно определить его величину, что и является точным смыслом понятия непосредственного наблюдения, идеалом наблюдаемости, как в классической так и в квантовой физике. Пробные тела же просто играют роль приборов.

II. О статусе квантовой логики.

В связи с тем, что в концептуальном отношении квантовая теория обладает значительно более сложной структурой чем классические разделы физики и понятие физической реальности в квантовой механике отличается неоднозначностью трактовки, всегда относительно большой удельный вес в исследованиях занимало изучение оснований квантовой теории. Одно из трех наиболее заметных направлений в основаниях квантовой механики — так называемая квантовая логика, (кроме того известны "выпуклый подход" и "алгебры наблюдаемых" [12]). Под именем квантовой логики в настоящее время объединяются огромное количество течений (см. обзорные статьи [13,14], монографию [15]), эта область не имеет четких границ. Нет никакой возможности в работе небольшого объема рассмотреть хотя бы самые основные аспекты этого направления. Мы коснемся только нескольких магистральных идей, общих для большинства подходов, в связи с обсуждением статуса квантовой логики.

Логика — наука о приемлемых способах рассуждения [16]. Логика как наука имеет несколько разделов, для нас интерес будет представлять то, что называется математической логикой. Математическая логика призвана формально описать допустимые в математике способы верного рассуждения. Однако она имеет отношение не только к математике, так как фактически формализует законы здравого смысла. Кроме того, мы рассматриваем логику как одно из двух оснований математики, наряду с понятием множества, так как с формальной точки зрения математика есть не что иное, как исследование структур на множествах с помощью аппарата доказательств, основанного на математической логике. Каково происхождение математики? Имеют ли математическая логика и понятие мно-

жества эмпирическое основание или же это, скорее, априорные формы мышления? Диалектический материализм дает недвусмысленный ответ на этот вопрос. Словами В.И. Ленина "Законы логики суть отражение объективного в субъективном сознании человека" [17, стр. 165]; "...практика человека, миллиарды раз повторяясь, закрепляется в сознании человека фигурами логики. Фигуры эти имеют прочность предрассудка, аксиоматический характер именно и только в силу этого миллиардного повторения" [17, стр. 198]. С этим трудно не согласиться, но можно добавить, что фундаментальное понятие множества (совокупности) имеет, конечно, такое же происхождение. Таким образом и логика и вся математика имеют в своей основе эмпирическое происхождение; математика отнюдь не произвольна, не является априорной формой сознания, но отражает объективную реальность, что, по-видимому, и является причиной эффективности математики в естественных науках. Логика фактически отражает наиболее общие закономерности в структуре событий и в причинной связи их друг с другом, относясь, таким образом, к объективному миру. Мы фиксируем это говоря, что логика имеет эмпирический статус. Несколько утрируя ситуацию можно сказать, что законы логики "следуют из эксперимента", так же как законы физики и других естественных наук. Под экспериментом только надо понимать всю общественно-историческую практику человечества.

Но "...практика человека, миллиарды раз повторяясь..." всегда имела существенно макроскопический характер. Наш мир, однако, не ограничен макроскопическими масштабами. Где уверенность, что при переходе к изучению квантового микромира наша "макроскопическая" логика не окажется неадекватной реальному положению вещей? Ведь наша логика сложилась в полном отрыве от "квантовой практики". Допустимо предположить, что существующий способ математического мышления окажется неприменим вне той области, внутри которой он сформировался, точно так же как геометрия Евклида неприменима для описания искривленного пространства общей теории относительности. Примерно такие мотивы дви-

гали фон Нейманом и Биркгоффом, когда они выдвинули концепцию квантовой логики [18], которая позже формулировалась и как квантовая теория множеств, и даже как квантовая математика [19]. С квантовой логикой связывалась надежда преодолеть многочисленные парадоксы квантовой механики [20, гл. I]. Эти надежды основывались на предположении, что парадоксы являются результатом некорректного применения классической логики к области квантовых явлений, и что парадоксами они являются только с точки зрения классической логики, но не логики, адекватной квантовому миру [21].

Для того, чтобы сделать обсуждение предмета более конструктивным, нам придется рассмотреть несколько понятий из аппарата квантовой логики. При этом мы в основном будем следовать работам [9, 21, 22] в некоторых пунктах отбрасывая несущественные детали, но и не вульгаризируя.

Главным программным требованием квантовой логики является последовательная формулировка квантовой механики исключительно на языке наблюдаемых величин, т.е. "...пытаясь остаться как можно ближе к явлениям и вводя теоретические концепции только когда они прямо и убедительно мотивируются экспериментальными фактами" [21, стр. 167].

Исходным понятием при построении квантовой логики является понятие двузначной наблюдаемой или, что то же самое — двузначного измерения. Под двузначным измерением понимается такое измерение над квантовой системой, которое может иметь только два исхода — произошло что-нибудь или не произошло. Наиболее типичным примером такого измерения является проверка, принадлежит ли значение измеряемой величины A некоторому подмножеству множества всех возможных значений этой величины, или нет. Измерения будем обозначать греческими буквами α, β, \dots . Ясно, что двузначное измерение — понятие, абсолютно недвусмысленно связанное с экспериментом.

Основным объектом, которым оперирует квантовая логика является квантовое высказывание. Квантовое высказывание — это высказывание в обычном смысле

в обычном смысле слова об исходе двузначного измерения. Например, если измерение \mathcal{A} представляет собой измерение некоторой физической величины A , которая может принимать всего два значения A_1 и A_2 (например, проекция спина электрона на произвольную ось может принимать только значения $+\hbar/2$ и $-\hbar/2$), то примером квантового высказывания будет

$$\text{"величина } A \text{ принимает значение } A_1 \text{"} \quad (1)$$

Если в результате измерения величина A действительно приняла значение A_1 , то это высказывание будет истинным, в противном случае — ложным. Квантовые высказывания будем обозначать малыми латинскими буквами a, b, \dots . Наша цель — построить исчисление высказываний о квантовой системе, которое должно составить ядро квантовой логики. Оно строится по аналогии с исчислением высказываний классической логики.

В классической логике исчисления высказываний служит средством формализации допустимых способов рассуждений вне зависимости от содержания этих рассуждений. Оно строится на основе аксиом — высказываний, которые считаются истинными не в силу своего содержания, но уже в силу своей формы, например:

$$\mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A} \quad - \quad (2)$$

из \mathcal{A} следует \mathcal{A} , \rightarrow — знак импликации, "влечет";

$$\neg \neg \mathcal{A} = \mathcal{A} \quad - \quad (3)$$

неверно, что неверно \mathcal{A} влечет истинность \mathcal{A} и обратно, \neg — знак отрицания, $=$ — знак логической эквивалентности;

$$\neg(\mathcal{A} \wedge \mathcal{B}) = \neg \mathcal{A} \vee \neg \mathcal{B} \quad (4)$$

$$\neg(\mathcal{A} \vee \mathcal{B}) = \neg \mathcal{A} \wedge \neg \mathcal{B}$$

законы де Моргана, \wedge означает логическую связку "и" (конъюнкцию), \vee означает логическую связку "или" (дизъюнкцию);

$$\begin{aligned} \mathcal{A} \vee (\mathcal{B} \wedge \mathcal{C}) &= (\mathcal{A} \vee \mathcal{B}) \wedge (\mathcal{A} \vee \mathcal{C}) \\ \mathcal{A} \wedge (\mathcal{B} \vee \mathcal{C}) &= (\mathcal{A} \wedge \mathcal{B}) \vee (\mathcal{A} \wedge \mathcal{C}) \end{aligned} \quad (5)$$

законы дистрибутивности, и т.д. Кроме того, постулируется правило вывода, в качестве которого обычно выбирается "modus ponens":

$$\frac{\mathcal{A}, \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}}{\mathcal{B}}$$

(6)

которое означает просто, что если \mathcal{A} — истинно, и истинно, что из \mathcal{A} следует \mathcal{B} , то и \mathcal{B} — истинно. Выражения типа \mathcal{A} , \mathcal{B} , $\neg \mathcal{A}$, $\neg(\mathcal{A} \wedge \mathcal{B})$, $\neg(\mathcal{A} \rightarrow (\mathcal{B} \vee \mathcal{C}))$ и т.д. называются формулами исчисления высказываний. Те формулы, которые могут быть получены из аксиом с помощью правил вывода называются теоремами. Нетрудно видеть, что в этой схеме просто формализуются обычные законы здравого смысла.

Для построения исчисления высказываний о квантовой системе необходимо определить понятия, являющиеся эквивалентом для логических связок "влечет", "неверно что", "и", "или".

Импликация квантовых высказываний определяется следующим образом. Считается, что $\mathcal{A} \subset \mathcal{B}$ (\subset — знак квантовой импликации) если всякий раз, когда высказывание \mathcal{A} оказывается истинным, истинным оказывается и высказывание \mathcal{B} . В то время как такой способ введения импликации представляется довольно естественным, мы этого не можем сказать об остальных квантово-логических связках. Поэтому дальнейшее изложение уже будет иметь оттенок критического анализа квантовой логики.

Казалось бы, в качестве отрицания для квантовых высказываний можно использовать отрицание в обычном смысле слова: отрицанием высказывания \mathcal{A} называется высказывание $\neg \mathcal{A}$, которое ложно всякий раз, когда \mathcal{A} истинно и наоборот. Такое определение вполне законно, мы его назовем "естественным определением", но оно имеет и недостаток. Если вернуться к нашему примеру (I), то уточнением содержания этого высказывания в действительности является следующее: "измерение величины A произведено и результат измерения дал значение A_1 ". Таким образом, оно состоит из двух утверждений, связанных конъюнкцией. Если утверждение "величина A измерена" обозначить \tilde{A} , а утверждение "измерение дало значение A_1 " обозначить \tilde{a} , то все утверждение (квантовое высказывание) \mathcal{a} будет иметь вид $\mathcal{a} = (\tilde{A} \wedge \tilde{a})$. Более того, квантовыми высказываниями считаются только утверждения,

которые имеют такую структуру. Отрицание^М же этого утверждения, в соответствии с законами де Моргана (4), будет

$$\neg a = \neg(\tilde{A} \wedge \tilde{a}) = \neg \tilde{A} \vee \neg \tilde{a}$$

Последнее означает, что измерение не произведено или результат не A_1 . Но это означает, что отрицание является утверждением другого типа по сравнению с исходным утверждением, оно не является утверждением об исходе какого-то измерения, но подразумевает возможность, что какое бы то ни было измерение вообще отсутствует ($\neg \tilde{A}$). В то же время квантовая логика строится над множеством высказываний о проведенных измерениях, а все другие типы утверждений искусственно отбрасываются. Таким образом отрицание в "естественном определении" выводит из множества квантовых высказываний. Однако все же желательно определить отрицание так, чтобы оно не выводило и исходного множества. Выход состоит в том, что в качестве отрицания используется искусственная конструкция под названием к"ортодополнение", которая в нашей терминологии определяется как $a' = (\tilde{A} \wedge \neg \tilde{a})$. Ортодополнение, очевидно, снова является квантовым высказыванием. Надо, однако, признать, что ортодополнение не является отрицанием в обычном смысле и связано с ним достаточно косвенным образом.

С логической связкой "и" также возникают существенные трудности. В обычной логике конъюнкция $A \wedge B$ определяется как высказывание, которое истинно тогда и только тогда, когда истинны одновременно A и B . Можно точно так же определить конъюнкцию и в квантовой логике. С использованием введенных выше обозначений конъюнкция квантовых высказываний a и b должна в "естественном определении" означать $(\tilde{A} \wedge \tilde{a}) \wedge (\tilde{B} \wedge \tilde{b})$ что есть то же самое, что $(\tilde{A} \wedge \tilde{B}) \wedge (\tilde{a} \wedge \tilde{b})$. При этом $(\tilde{A} \wedge \tilde{B})$ можно трактовать как ~~высказывание~~ высказывание о том, что проведено одно сложное измерение, в котором A и B измеряются одновременно, а $(\tilde{a} \wedge \tilde{b})$ как высказывание о результате этого измерения, типа "сложная величина (A, B) принимает значение (A_1, B_1) ". На первый взгляд конъюнкция не выводит из множества квантовых высказываний,

но в действительности это не так. Дело в том, что в квантовой механике существуют измерения, которые исключают друг друга взаимно дополнительные. Для таких измерений сложного измерения, соответствующего высказыванию $\bar{A} \wedge \bar{B}$ не существует, поэтому $\bar{A} \wedge \bar{B}$ не соответствует какому-либо измерению и вся конъюнкция $(\bar{A} \wedge \bar{B}) \wedge (A \wedge B)$ не является квантовым высказыванием. С точки зрения обычной логики последняя конъюнкция в случае взаимно дополнительных измерений представляет из себя тривиальное тождественно ложное высказывание по той же самой причине, по которой нельзя ехать в метро и трамвае одновременно. В случае совместных измерений (и только в этом случае) обычное определение конъюнкции не выводит из множества квантовых высказываний и является вполне подходящим. Таким образом, конъюнкция в "естественном определении" не годится для квантовой логики. Как и в случае отрицания вместо обычной конъюнкции вводится новое искусственное понятие от которого требуется только, чтобы в случае совместных измерений оно переходило в обычное понимание связки "и". Оказывается что "конъюнкция", удовлетворяющая такому требованию даже не определена однозначно. Так, например, в работе [23] можно встретить толкование $a \wedge b$ (\wedge — знак квантовой конъюнкции) как "сначала a , потом b ". В этом случае $a \wedge b$ и $b \wedge a$ вообще говоря не одно и то же, что дает повод говорить о некоммутативности квантовой конъюнкции в отличие от классической. В работе [9] конъюнкция трактуется как бесконечная последовательность "сначала a , потом b , потом a , потом b, \dots ". Несмотря на то, что такая конъюнкция оказывается коммутативной, она, очевидно, чрезвычайно далека от интуитивного понимания "и". Но именно последнее определение является наиболее употребительным, т.к. приводит к изящным алгебраическим конструкциям. Такое определение мы и будем в дальнейшем иметь в виду.

После того, как конъюнкция определена, дизъюнкция обычно определяется формально с помощью законов де Моргана (4):

$$a \cup b = (a' \cap b')'$$

где, однако, штрих означает не отрицание в "естественном определении", а ортодополнение. Дизъюнкция оказывается искусственной конструкцией в той же мере, что и ортодополнение и квантовая конъюнкция.

На основе определенных таким образом логических связей можно строить исчисление квантовых высказываний, или квантовую логику. На эту конкретную систему мы будем ссылаться как на "квантовую логику" — в кавычках. При этом оказывается, что некоторые законы классической логики нарушаются. Нарушаются, в частности, законы дистрибутивности (5). Т.е. в "квантовой логике" вообще говоря

$$a \wedge (b \vee c) \neq (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$$

$$a \vee (b \wedge c) \neq (a \vee b) \wedge (a \vee c)$$

Это дает повод многим авторам говорить о том, что квантовая механика диктует новую логику, отличную от классической, точно так же как обобщая теория относительности показала, что геометрия мира является римановой а не евклидовой.

Однако, можно ли здесь действительно говорить о новой логике?

По этому поводу существует широкий спектр мнений, начиная от того, что никакой квантовой логики не может быть в принципе и кончая тем, что да, построенная система действительно является новой логикой.

Рассмотрим прежде всего философский аспект проблемы. Как мы уже отмечали в предыдущем разделе нашей работы, всю физическую реальность квантовой механики следует отнести к типу наблюдаемой физической реальности. Причем под наблюдаемостью понимается возможность описания исключительно на языке поведения существенно макроскопических приборов. Таким образом, физическая реальность квантовой механики, будучи выражена через поведение приборов, фактически входит в область той человеческой практики, под воздействием которой сформировалась классическая логика. То, что практика не была направлена на изучение квантового мира не представляется существенным, так как логика отражает наиболее общие связи в структуре событий, которые могут быть определены в любой области макроскопической деятельности, и которым подчиняется функционирование макроскопических приборов. Поэтому ни в

каких конкретных макроскопических проявлениях ~~в~~ квантовых объектов не следует ожидать нарушений классической логики.

Это положение можно пояснить следующим образом. Мы никогда не наблюдаем квантовый объект "сам по себе", но всегда в определенной макроскопической обстановке, которая может быть как естественной, так и диктоваться экспериментальной установкой, которую мы используем. Определенная же макроскопическая обстановка диктует свой набор совместимых друг с другом наблюдаемых (измерений), квантовые высказывания о которых, как оказывается, полностью подчиняются классической логике. Поэтому имея перед собой сложную систему "квантовый объект + макроскопическая обстановка" (а ничего другого мы не можем иметь) мы никогда не столкнемся с нарушениями классической логики. Такое положение вещей привело Нильса Бора [4, стр. 145] (в связи с трехзначной логикой Рейхенбаха [24, стр. 53-98]) к следующему категоричному заключению: "...какие бы то ни было отклонения от общепринятого языка и обычной логики полностью устраняются, если употреблять слово "явление" только в смысле чего-то такого, о чем возможно однозначным образом информировать..." Однако нам представляется что приведенная аргументация ^евс-таки не является достаточной для такого вывода.

В самом деле, ведь квантовая система представляет собой единство ее экспериментальных проявлений, включая взаимно исключающие макроскопические условия. И увязка отдельных проявлений квантовой системы в единую картину — это та практика, которая действительно отсутствовала у человечества и не влияла на формирование его логики. Поэтому именно на этом этапе отступление от классической логики в принципе может иметь место. На это замечание можно предвидеть возражение, что и обычные "классические", макроскопические объекты тоже представляют собой единство их, порой взаимно исключающих, проявлений. Ниоткуда, однако, не следует, что в квантовом случае мы не встретим чего-то совершенно особенного, не укладывающегося в рамки классических способов описания. Как следует из проведенного выше краткого обзора по-

нятий квантовой логики, она возникает именно при увязывании в единую картину всевозможных проявлений квантового объекта, когда можно ожидать отступлений от классической логики. Следует ли из этого что "квантовая логика" действительно является новой, неклассической, логикой?

По мнению некоторых исследователей "квантовой логики", она не является логикой в собственном смысле этого слова (например, в смысле определения [16]), но, скорее, некоторой алгебраической системой, полезной в разъяснении структуры квантовой теории (см., например, [21]). При этом основной дефект видится в том, что, по ряду причин, импликация квантовых высказываний $a \subset b$ не может ~~быть~~ считаться высказыванием о квантовой системе в том смысле, что не может быть представлена никаким двузначным измерением и, следовательно, не может быть формулой исчисления высказываний квантовой логики. Т.е. определенная выше импликация выводит из множества квантовых высказываний точно также, как отрицание и конъюнкция в "естественном определении". Однако, в отличие от последних двух случаев, конъюнкцию вообще не удастся определить каким-нибудь разумным способом. Это же, в свою очередь, делает невозможным построение правил вывода типа

$$\frac{a, a \subset b}{b}$$

поэтому в квантовой логике не определено понятие логического вывода. Без этого никакая система не может считаться логикой. Это есть формальная причина, по которой "квантовая логика" не может считаться логикой.

По нашему мнению существует и содержательная причина. Она заключается в том, что, как уже указывалось, отрицание, конъюнкция и дизъюнкция в "квантовой логике" являются, по существу, произвольно определенными искусственными понятиями, имеющими мало общего с обычным пониманием этих терминов. Скорее они являются алгебраическими операциями, не имеющими прямого отношения к логическим связкам. Поэтому,

в частности, не следует удивляться нарушению закона дистрибутивности, так как в контексте "квантовой логики" он относится не к логическим связкам "и", "или", а к некоторым операциям, которые и не обязаны подчиняться этому закону.

Существуют, однако, работы, в которых обосновывается точка зрения, что "квантовая логика" — это логика, (например [22]). Но нетрудно видеть, что дело здесь просто в используемой терминологии. В таких работах под логикой понимается любая формальная алгебраическая система, которая построена над множеством элементов, которые в каком-то смысле могут считаться высказываниями или утверждениями. В этом смысле "квантовая логика" конечно логика, так что дело здесь в определении. Однако такие формальные системы могут не иметь никакого отношения к "отражению объективного в субъективном сознании человека" и потому не могут считаться логиками в собственном (философском) смысле этого слова.

Мы присоединяемся к выводу, что "квантовая логика" в принимаемом большинством исследователей смысле является лишь некоторой алгебраической системой, присущей квантовой теории, но не логикой, основанной на "квантовой практике". Означает ли это, что вопрос о реальном существовании некоторой неклассической логики, присущей квантовому миру, может считаться вообще снятым? По нашему мнению это не так.

Во-первых, несмотря на то, что "истинную квантовую логику", по-видимому, пока не удалось построить, не очевидно, что это не удастся сделать в будущем. В частности, так как искусственность вводимых в "квантовой логике" логических связей связана с произвольным ограничением понятия квантового высказывания, интересно посмотреть, к чему может привести расширение множества квантовых высказываний до "естественных" пределов, включающих утверждения типа "измерение проведено", "неверно, что измерение проведено".

Во-вторых, по нашему мнению вопрос о квантовой логике может быть поставлен в иной плоскости, в связи с проблемой "скрытых параметров" в квантовой механике [12]. Проблема скрытых параметров заключается

в возможности сведения принципиальной статистичности процесса измерения в квантовой механике к той или иной форме "скрытого" обычного вероятностного описания по аналогии с тем, как в основе термодинамики или классической статистической физики лежит отказ от детального причинного описания движения отдельных атомов и молекул. С этим связывается надежда объяснения видимого акаузального поведения квантовой системы скрытым детерминированным процессом, подчиняющимся классическому идеалу причинности. До сих пор попытки введения таких скрытых параметров не привели к успеху, более того, существует ряд теорем о невозможности введения скрытых параметров, [12].

Нам представляется, что причиной неудач попыток, предпринимаемых в этом направлении, может быть не вполне корректная постановка задачи. Действительно, введение скрытых параметров в явном виде предполагает введение ненаблюдаемой физической реальности. В силу своей ненаблюдаемости эта часть физической реальности не могла оказывать никакого влияния на формирование классической логики, а потому и никаким образом не может быть отражена в ее законах. Поэтому автоматическое распространение законов классической логики на область скрытых параметров представляется совершенно незаконным, хотя, конечно, применимость классической логики нельзя и исключить. Современная же постановка вопроса о скрытых параметрах предполагает существенно классическое (в смысле логики) описание. В соответствии со сказанным выше скорее следует рассматривать возможность введения "скрытого" описания на основе некоторой неклассической логики и неклассической теории множеств. Быть может, следует искать аналог классического детерминированного процесса в смысле неклассической логики. Таким образом, вопрос о квантовой логике представляется также правомерным в форме вопроса о существовании "скрытой квантовой логики" или "логики скрытых параметров".

В заключение мы остановимся на одном вопросе гносеологического характера, который нам представляется весьма сложным и в то же время важным. Классическая логика является логикой, присущей человеку,

формой отражения реальности в человеческом сознании. Это значит, что любой результат человеческого познания должен быть выражен в понятиях классической логики. Неклассическую логику следует признать "нечеловеческой" формой отражения реальности, которая, следовательно, не может быть присуща человеку (это тавтология). Может ли быть она в таком случае познана, а если может, то в какой форме? От этого, в частности, зависит вообще правомерность постановки вопроса о квантовой логике и вопроса о скрытых параметрах в той форме, в которой мы его предлагаем. Надежду на то, что и "нечеловеческая" логика может быть отражена в сознании человека дает одна полезная аналогия. Как известно, модель геометрии Лобачевского, которая является более общей, чем геометрия Евклида, может быть построена на плоскости только средствами евклидовой геометрии. Пространством Лобачевского объявляется внутренность некоторого круга, прямыми называются хорды соответствующей окружности. Параллельными прямыми считаются хорды, которые не пересекаются. В этом случае, очевидно выполняется условие, обратное пятому постулату Евклида: через точку вне прямой можно провести по крайней мере две прямые, параллельные данной. Остальные аксиомы евклидовой геометрии оказываются выполненными, что и требуется. Можно надеяться, что и модель неклассической логики может быть построена только средствами классической логики, а следовательно и отражена в сознании человека. Таким образом, следует ожидать, что неклассическая логика (и соответствующая неклассическая математика) явятся нам в облике некоторой очень сложной структуры, построенной внутри обычной математики (если такое построение вообще возможно). Значит, в конце концов мы будем иметь дело только с обычной логикой и математикой. Означает ли это, что понятия неклассической логики, неклассической теории множеств и неклассической математики являются излишними? Нет, не значит, такая позиция является бедной в эвристическом плане. Точно так же не-^{есть}лепо говорить, что геометрия Лобачевского всего лишь искусственная конструкция внутри евклидовой геометрии по той причине, что может быть построена ее евклидова модель.

Нам не известны попытки явного построения моделей каких-нибудь неклассических логик внутри классической, в литературе мы не встретили никаких указаний на что-либо подобное. Не вполне понятно даже, что такое построение должно означать. В связи с этим может возникнуть вопрос, не отражает ли уже "квантовая логика" в модельном виде некоторых черт "истинной квантовой логики" или "скрытой квантовой логики"? Может быть это и так, но пока не видно реальных путей ответа на этот вопрос, да и саму его постановку пока нельзя признать совершенно ясной.

III. Резюме.

В первой части нашей работы мы постарались показать, что как измерения, так и состояния квантовых систем следует признать наблюдаемыми величинами, составляющими наблюдаемую физическую реальность квантовой механики. В то же время аргументируется законность понятия ненаблюдаемой физической реальности, на существование которой, однако, не указывает современная квантовая механика.

Во второй части кратко рассмотрен вопрос о происхождении логики из практической деятельности человека. В связи с этим рассматривается постановка вопроса о квантовой логике, как логике, соответствующей "квантовой практике". Показано, что существующая система "квантовой логики" не может считаться логикой в собственном смысле этого слова, но скорее ^{связана} некоторой алгебраической системой. Предлагается постановка вопроса о скрытых параметрах как вопроса о существовании "скрытой квантовой логики", соответствующей ненаблюдаемому аспекту физической реальности. Рассматривается вопрос о возможности и способах отражения неклассических логик в сознании человека.

Литература.

- [1]. Э.М. Чудинов. Эйнштейновская концепция физической реальности. В кн.: "Физическая теория и реальность". Воронеж, 1976, стр. 33.
- [2]. В.А. Фок. Квантовая теория и философские проблемы. В кн.: "Физическая наука и философия". М., 1978, стр. 55.
- [3]. Н. Бор. Проблема причинности в атомной физике. УФН, т. 147, №2, 1985, стр. 348.
- [4]. Н. Бор. Атомная физика и человеческое познание. М., 1961.
- [5]. В. Гейзенберг. Физика и философия. М., 1963.
- [6]. Б.Я. Пахомов. Квантовая механика и познаваемость объективной реальности. В кн.: "Философские вопросы квантовой физики". М., 1970, стр. 67.
- [7]. Дк. фон Нейман. Математические основы квантовой механики. М., 1964.
- [8]. В.А. Фок. Начала квантовой механики. М., 1976
- [9]. J.M. Jauch. Foundation of quantum mechanics. Reading, Massachusetts, 1968
- [10]. Д.И. Блохинцев. Принципиальные вопросы квантовой механики. М., 1987.
- [11]. Д.И. Блохинцев. Квантовая механика. Лекции по избранным вопросам. М., 1981.
- [12]. А.С. Холево. Статистическая структура квантовой механики и скрытые параметры. Серия "Знание. Новое в жизни, науке и технике", сер. "Математика, кибернетика", 1985, №6.
- [13]. P. Mittelstaedt. Classification of different areas of work afferent to quantum logic. In: "Current Issues in Quantum Logic. New York and London, 1981, p 3
- [14]. G. Hardegree and P. Fraser. Chartig the labyrinth of quantum logics: a progres report. Ibid., p. 53.

- [15]. В.С. Меськов. Очерки по логике квантовой механики. М., 1986.
- [16]. ВСУ, М., 1973, т. 14, стр. 595, статья "Логика".
- [17]. В.И. Ленин. Философские тетради. Полн. собр. соч., т. 29.
- [18]. G. Birkhoff and J. von Neumann. The Logic of Quantum Mechanics. *Annals of Math.*, V37, 1936, p. 823
- [19]. G. Takeuti. Quantum set theory. In: "Current Issues in Quantum Logic". New York and London, 1981, p. 303
- [20]. А.И. Панченко. Логико-гносеологические проблемы квантовой физики. М., 1981.
- [21]. J.M. Jauch and C. Piron. What is Quantum Logic? In: "Quanta". The University of Chicago Press, Chicago and London, 1970
- [22]. S. Bugajski. What is Quantum Logic? *Studia Logica*, V41, N: 4, 1985, p. 311.
- [23]. А.И. Панченко. Логико-алгебраический подход в квантовой механике (философско-методологический анализ). М., 1980.
- [24]. H. Reichenbach. Philosophical Foundations of Quantum Mechanics. Berkeley; Los Angeles, 1944.