

ТРИ ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ КВАНТОВОЙ РЕАЛЬНОСТИ И ВТОРАЯ КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ*

Терехович Владислав Эрикович – кандидат философских наук, старший преподаватель.

Санкт-Петербургский государственный университет. Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 5; e-mail: v.terekhovich@gmail.com



Анализ представлений о реальности ненаблюдаемых объектов квантовой теории не укладывается в рамки оппозиции реализм – антиреализм. Во-первых, необходимо различать реализм в отношении к теории и в отношении ее объектов. Во-вторых, реализм в отношении классических объектов может совмещаться, как с реализмом, так и с антиреализмом в отношении квантовых объектов. В-третьих, понятия «существование» и «объективная реальность» могут иметь несколько значений. С учетом этих оговорок в статье предлагается характеристика трех подходов: классического реализма, квантового антиреализма и квантового реализма. Показано, что в последние десятилетия дискуссии между ними обострились благодаря второй квантовой революции, связанной с передачей и обработкой информации. Классический реализм и старые версии квантового антиреализма оказались неэффективными при объяснении результатов ряда новых экспериментов. Сторонники квантового реализма ссылаются на возможность с помощью волновой функции манипулировать квантовыми объектами до их измерения. Таким образом, эксперименты и новые технологии стали сильным аргументом в, казалось бы, философском споре о реальности.

Ключевые слова: научный реализм, антиреализм, вторая квантовая революция, квантовые вычисления, интерпретации квантовой механики

THREE APPROACHES TO THE ISSUE OF QUANTUM REALITY AND THE SECOND QUANTUM REVOLUTION

Vladislav E. Terkhovich – PhD in Philosophy, senior lecturer.
Saint Petersburg University, 5 Mendeleevskaya Line, 199034, Saint Petersburg, Russia; e-mail: v.terekhovich@gmail.com

The framework of a simple opposition realism – anti-realism is not enough to analyze the views on the reality of unobservable objects of quantum theory. First, it is necessary to distinguish between realism in relation to the theory and realism in relation to the theory's objects. Secondly, realism in relation to classical objects can be combined, both with realism and with anti-realism in relation to quantum objects. Third, the concept of "existence" and "to exist objectively" can have different meanings. To take into account these factors, the article describes three approaches: classical realism, quantum anti-realism, and quantum realism. I show that the debate around quantum reality has intensified in recent decades due to a series of new quantum experiments. The current stage of the debate is caused by the second quantum revolution relating to the transfer and processing of quantum information. Classical realism and old versions of quantum anti-realism have become insufficiently effective to explain the results of a series of experiments. Proponents of quantum realism, in turn,

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-011-00920 «Революционные трансформации в науке как фактор инновационных процессов: концептуальный и исторический анализ».



refer to the possibility of using the wave function to manipulate quantum objects before their measurement. In conclusion, I assume that not only theoretical discussions but also experiments and new technologies can have a major impact on the seemingly purely philosophical debate about reality.

Keywords: scientific realism, anti-realism, quantum revolution, quantum computing, interpretation of quantum mechanics

Введение

В начале XX века в физике произошла революция, связанная с созданием специальной и общей теорий относительности, а затем квантовой механики (КМ). Революционность КМ проявилась в двух аспектах. В онтологическом аспекте предлагались новые представления о природе квантовых явлений. Вводились новые фундаментальные понятия, объекты и принципы, от старых предлагалось или отказаться, или ограничить их применение. Ставились под сомнение постулаты, касающиеся способов существования, причинности и случайности. В эпистемологическом аспекте КМ предлагала отказаться от привычных методологических и логических постулатов, образцов исследований и объяснений. Предлагались новые принципы познаваемости, наблюдаемости, дополнительности различных описаний, соответствия теорий, пересматривалась роль наблюдателя [Терехович, 2018].

Новые представления КМ были связаны с ее формализмом и, казалось бы, подтверждались экспериментами. Но, строго говоря, они не являлись ни аксиомами теории, ни необходимыми следствиями из нее. Скорее, они формулировались как проблемы, требующие решения. И решать их весьма по-разному пытались конкретные физики в рамках собственных философских и методологических убеждений.

Сегодня дискуссия о реальности объектов научной теории часто рассматривается в контексте противостояния различных версий научного реализма и антиреализма [Фурсов, 2013; Перспективы реализма в современной философии, 2017]. Эпистемический тезис научного реализма гласит, что успешные научные теории с высокой степенью вероятности отражают реальность. А семантический тезис утверждает, что теоретические термины успешных научных теорий обозначают реальные физические объекты (пусть даже и ненаблюдаемые) и их свойства.

Особый интерес представляет дискуссия о реальности ненаблюдаемых объектов квантовой теории [Мамчур, 2017; Хакинг, 1998; Цао, 2008]. Как будет показано далее, она не укладывается в рамки оппозиции реализм – антиреализм. Для анализа взглядов на реальность этих объектов¹ будет дана характеристика трех подходов: *классического*

¹ В данной статье я не рассматриваю проблемы, порождаемые квантовой теорией поля.



реализма, квантового антиреализма и квантового реализма. Полагаю, что именно между ними ведется соревнование за право объяснить, что скрывается за формализмом квантовой теории. Актуальность проблемы иллюстрируют слова Д. Мермина: «...сегодня, почти через 90 лет после формулировки квантовой механики, несогласие в отношении смысла теории сильнее, чем когда-либо. Новые интерпретации появляются каждый год» [Mermin, 2012, p. 8]. В последние три десятилетия проводится большое число экспериментов только для того, чтобы выяснить, какая из трех упомянутых точек зрения на квантовую реальность ближе к истине [Терехович, 2017]. А в начале XXI века противоречия квантовой парадигмы и парадигмы классической теории поля вышли на новый уровень благодаря *второй квантовой революции*². Оказалось, что физики могут менять свое отношение к реальности объектов теории не только в результате экспериментов, но и в процессе трансформации теории в технологические инновации.

Три способа относиться к реальности объектов квантовой теории

По мнению Я. Хакинга, реалист по отношению к объектам теории не обязательно должен быть реалистом по отношению к теориям [Хакинг, 1998, с. 36]. Несомненно, верно и обратное. Реализм относительно теорий говорит о том, что по мере развития теорий они отражают истинные отношения природных объектов (по сути, это эпистемический тезис научного реализма). Реализм относительно объектов говорит о том, что объекты теорий должны действительно существовать (это соответствует семантическому тезису).

Практически одновременно с созданием КМ развернулась дискуссия не только о ее истинности как теории, но и о реальности вводимых ею объектов. Представляют ли квантовые состояния нечто в физической реальности и, если да, то каковы особенности этой реальности? Полагаю, что современный ретроспективный анализ этой дискуссии будет неполным без учета четырех оговорок.

Первая оговорка связана с тем, что реализм в отношении классических объектов может совмещаться, как с реализмом, так и с антиреализмом в отношении квантовых объектов. Такая же альтернатива возможна и для реализма по отношению к квантовой теории.

Вторая оговорка обращает внимание, что, давая характеристику любых подходов к реальности, желательно сразу отказаться от возможности однозначного ответа на вопрос о существовании. В вопросе о

² О термине «вторая квантовая революция» см. [Dowling, Milburn, 2003; Quantum Manifesto, 2016].



реальности обычно подразумевается, что объект (событие) может или существовать (происходить), или нет. Но такая двоичная логика, скрытая в вопросе, не позволяет адекватно описывать квантовые явления. Более перспективным, хотя бы в терминологическом плане, представляется различие понятий «быть» и «существовать», «актуальное» и «потенциальное». Эти понятия и связанные с ними проблемы являются предметом современной метафизики модальностей [Терехович, 2015].

Третья оговорка относится к делению подходов к реальности квантовых объектов на пси-онтические и пси-эпистемические [Harrigan, Spekkens, 2010]. С *пси-онтической* точки зрения каждому физическому (онтическому) состоянию соответствует только одно квантовое состояние, которое описывает волновая или пси-функция. Это состояние объединяет все собственные свойства квантовой системы и содержит о ней полную информацию. С *пси-эпистемологической* точки зрения одно и то же физическое состояние может быть совместимо с различными квантовыми состояниями. Последние уже не содержат полной информации о квантовой системе, а представляют собой наши знания о ней. В чем-то оно похоже на вероятностное распределение статистической механики.

Четвертая оговорка касается неопределенности термина «объективное существование» и также связана с понятием информации. Если объективно то, что не зависит от субъекта, то принципиальным становится понятие субъекта, получающего информацию о квантовом состоянии. Что считать субъектом – любой сознающий индивидуум, подготовленного физика, измерительный прибор, любые макрообъекты или что-то еще? Информация – это наше знание или нечто существующее независимо от нас? Ведь, согласно принципу неопределенности в формулировке Р. Фейнмана, интерференцию разрушает сама возможность устроить прибор, определяющий, какое из двух взаимно исключающих событий осуществилось [Фейнман, Лейтон, Сэндс, 1965, с. 215]. Иначе говоря, правило определения вероятности обнаружения частицы зависит не от нашего знания, а от того, есть ли принципиальная возможность узнать, по какому из взаимоисключающих путей она пролетела [Фейнман, 2014, с. 94]. Трудность в том, что мы не можем заранее принять какое-либо определение объективности, поскольку она сама является частью проблемы измерения в КМ.

С учетом перечисленных оговорок можно выделить три концептуально разных подхода к проблеме реальности объектов квантовой теории. Эти подходы я условно называю: *классический реализм*, *квантовый антиреализм* и *квантовый реализм*. Причем первые два относятся скорее к пси-эпистемологическому подходу, и только квантовый реализм – к пси-онтическому.

Защитником *классического реализма* принято считать А. Эйнштейна [Фок, Эйнштейн, Подольский, Розен, Бор, 1936]. Он не верил ни в полноту квантовой теории (антиреализм по отношению к тео-



рии), ни в какую-либо реальность волновой функции (антиреализм по отношению к объектам). Теория должна описывать реальность, но реальность не может быть такой, как ее описывает КМ, следовательно, КМ – это лишь инструмент, математическая модель для предсказания. Квантовые явления не могут принципиально отличаться от явлений классических, а значит, свойства квантовых объектов и сами эти объекты должны существовать объективно и не зависеть от наблюдения. Тогда волновая функция описывает лишь наше неполное знание о некоем реальном состоянии и похожа на статистическое распределение вероятностей. Неполнота знания подразумевает существование скрытых объективных свойств, которые не описываются квантовой теорией. И, конечно, для квантовых явлений должны соблюдаться принципы локальности и детерминизма. Именно такие представления лежат в основании статистических интерпретаций КМ и интерпретаций с локальными скрытыми параметрами.

Способом сохранить реализм и в отношении квантовой теории, и в отношении ее объектов стал *квантовый реализм*. Первыми его представителями можно считать волновую механику Э. Шредингера и теорию с нелокальными скрытыми параметрами Л. Де Бройля, позже развитую Д. Бомом. Предполагалось, что волновая функция отражает полную информацию о возможных состояниях системы. Но это не просто знание о возможных результатах опытов. Можно говорить о существовании неких независимых от наблюдателя квантовых сущностей, хотя форма их существования может сильно отличаться от классической реальности, в первую очередь своей нелокальностью и отсутствием однозначной причинности при переходе от квантовой реальности к классической. Сначала на роль таких сущностей предлагались волны материи, волны вероятности или нелокальные потенциалы. В более поздних интерпретациях к ним добавились: предрасположенности, отношения, согласованные истории, квантовые операторы, миры, кубиты и, наконец, сама волновая функция.

Промежуточную позицию занял *квантовый антиреализм*, представленный Копенгагенской интерпретацией, интерпретациями Дж. фон Неймана, Ю. Вигнера, раннего Дж. Уилера (позже он стал квантовым реалистом), квантовым байесонизмом (Q-bism) и другими. Копенгагенскую интерпретацию поддерживали многие физики, стоявшие у истоков КМ и разделяющие позицию Н. Бора и В. Гейзенберга в их споре с А. Эйнштейном. Возможно, поэтому до сих пор многие ошибочно полагают, что Копенгагенская интерпретация и квантовая теория – это одно и то же³.

³ Термин «Копенгагенская интерпретация» довольно размыт. По сути, это набор не всегда согласующихся друг с другом утверждений, высказанных разными физиками. Например, см. [Гриб, 2013].



Квантовый антиреализм предполагает, что формализм КМ полон, то есть волновая функция дает нам полную информацию о состоянии системы, и не существует никаких скрытых параметров (реализм по отношению к теории). Считается, что неопределенность на квантовом уровне является неустранимым свойством природы, а вероятностный способ описания мира таким же фундаментальным, как и другие законы природы. Отсюда Н. Бор сделал два философских обобщения. Одно в виде принципа дополнительности друг другу разных способов описания мира. Второе в форме утверждения, что целью КМ является вовсе не описание квантовой реальности, а лишь согласование предсказаний с экспериментальными данными.

Чтобы совместить подобный инструментализм с полнотой теории, предполагается, что до измерения не имеет смысла говорить о какой-либо реальности, ни о квантовой, ни о классической⁴. Есть только наше субъективное знание, его-то и описывает волновая функция. Недаром сторонники пси-эпистемического подхода часто разделяют именно Копенгагенскую интерпретацию. В отличие от классического реализма, здесь волновая функция отражает не приближенное знание о некоем реальном состоянии, а полное знание о возможных результатах будущих опытов. **А в отличие от квантового реализма, она отражает не информацию внутри системы «квантовый объект-окружение-прибор», а исключительно наше знание (то есть информацию для наблюдателя).** Классическая реальность как бы «возникает» в процессе измерения классическими приборами. По сути, это антиреализм по отношению к квантовым состояниям до измерения, но реализм по отношению к квантовым частицам после измерения. На вопрос, как это совместить, предлагается ответ: во время наблюдения происходит непредсказуемый мгновенный «скачок» от причинного описания через эволюцию вектора состояния (суперпозиции возможных состояний) к описанию вероятностей результатов наблюдений. Скачок в описании, но не в реальной эволюции (наше знание в виде волновой функции как будто коллапсирует). Математически это выражается через проекционный постулат, согласно которому вектор состояния квантовой системы в момент измерения мгновенно проецируется на одно из возможных показаний прибора. Важно, что это проецирование не

⁴ Позже Н. Бор и В. Гейзенберг, защищаясь от обвинений в позитивизме, уточнили свое мнение о реальности и в чем-то сблизились с квантовым реализмом. В беседах с В.А. Фоком Бор полностью признавал объективность свойств атомных объектов [Фок, 1957]. Гейзенберг разделял термины «физически реальное» (то, что существует в 3-мерном пространстве) и «объективное» (то, что не зависит от субъекта). Он писал об «объективной» физической реальности, связанной с понятием возможности («потенции») [Гейзенберг, 1958, с. 24]. А затем уточнил, что «состояние замкнутой системы, которую можно представить при помощи гильбертова вектора, на самом деле объективно, но не реально», и этим возможным, в отличие от действительного управляют законы математики [там же, с. 42–43].



соответствует реальному физическому процессу, а является лишь математическим приемом⁵. Еще раз подчеркну, все сказанное относится не к утверждениям квантовой теории, а к ее Копенгагенской интерпретации в рамках квантового антиреализма.

Эволюция дискуссии о квантовой реальности

Начиная с середины 30-х годов XX века, среди физиков была популярна позиция классического реализма в отношении квантовых объектов. Считалось, что квантовый мир – это лишь одно из проявлений мира классических явлений. Такому взгляду способствовали господствующая парадигма классического поля, подкрепленная авторитетом А. Эйнштейна, и невозможность проверки мысленных экспериментов, предлагаемых оппонентами.

Вопрос о реальности новых объектов квантовой теории (квант действия, волновая функция, спин, квантовый оператор, Гильбертово пространство, запутанные состояния и т. п.) долгое время не имел большого значения. Большинство физиков удовлетворялось позицией инструментализма относительно квантовой теории и антиреализма в отношении ее объектов. Но по мере роста числа экспериментальных подтверждений теории и развития ее математического аппарата, стала набирать популярность Копенгагенская интерпретация.

Кроме успеха теории и авторитета Н. Бора, В. Гейзенберга, М. Борна, Дж. фон Неймана, П. Дирака, В.А. Фока, Л.Д. Ландау и других физиков (хотя их философской позицией мало кто интересовался) можно назвать еще несколько причин длительного успеха Копенгагенской интерпретации. Во-первых, она постулирует полноту квантовой теории для квантовых объектов, что важно для тех, кто с ней работает, хотя бы по психологическим причинам. Во-вторых, в ней предполагается, что истинность квантовой теории никак не противоречит истинности классических и релятивистских теорий. Такая совместимость обеспечивается принципом дополнительности, статистической интерпретацией волновой функции и проекционным постулатом. Все это позволяет оставаться реалистом одновременно по отношению и к квантовой теории, и к любым другим физическим теориям. В-третьих, Копенгагенская интерпретация, являясь антиреалистичной по отношению к квантовым объектам до измерения (даже с учетом особого мнения В. Гейзенберга и В.А. Фока), снимает необхо-

⁵ Хотя для В.А. Фока и В. Гейзенберга этот скачок в каком-то смысле объективный процесс «перехода от возможного к действительному», причем переход вызывает не наблюдатель, а нарушение изолированности системы [Гейзенберг, 1958, с. 42; Фок, 1957].



димось объяснения их странного поведения. Правда за это приходится платить постулатом об особой роли наблюдателя и приборов в возникновении классической реальности. Но до начала второй квантовой революции даже это не являлось особой проблемой, а дискуссии о реальности волновой функции обычно объявлялись философскими и не имеющими отношения к настоящей физике. Позиция квантового реализма (например, Бомовская механика) считалась маргинальной. Казалось, окончательно победила прагматическая позиция: не нужно задумываться о смысле квантовых уравнений, достаточно того, что они хорошо предсказывают⁶.

Новый этап дискуссий начался в 50-х годах. Постепенному росту числа сторонников квантового реализма способствовала критика инструментализма и позитивизма, возрождение интереса к философским основаниям науки (К. Поппер, Т. Кун, И. Лакатос и др.), а также формирование концепции «научного реализма» (Дж. С্মарт, Р. Бойд, Х. Патнэм и др.).

В 1964 году Дж. Белл опубликовал знаменитую теорему, надеясь в опыте проверить мысленный ЭПР-эксперимент и доказать реализм квантовых состояний, пусть и в нелокальной версии. Позже эксперименты по проверке неравенств Белла показали слабость классического реализма, что еще не означало победу квантового антиреализма. Эксперименты говорили лишь о невозможности одновременного сохранения и реализма, и локальности классической физики. Одновременно новые экспериментальные возможности возродили интерес к проблемам, связанным с суперпозицией, с реальностью математических объектов квантовой теории, а также с нелокальностью и ролью наблюдателя. Стали возникать новые реалистические интерпретации КМ⁷. С другой стороны, в это время в философии науки взамен раскритикованного инструментализма антиреалисты выдвинули новые аргументы. Достаточно упомянуть исторический релятивизм (Т. Кун, П. Фейерабенд, Л. Лаудан) и конструктивный эмпиризм (Б. Ван Фраассен).

С середины 90-х годов дискуссия о реальности квантовых состояний окончательно перешла на этап экспериментальной проверки. Эксперименты продолжали подтверждать предсказания кванто-

⁶ Д. Мермин назвал эту позицию «заткнись и считай» применительно к Копенгагенской интерпретации, что не совсем верно, так как она все-таки предлагает свои ответы на философские проблемы квантовой теории. По его впечатлению, третье поколение физиков мало размышляло о странностях квантовой теории, а когда их просили сформулировать, что они действительно думают о квантовой механике, они чувствовали себя неуютно, раздражались или скучали [Mermin, 1989, p. 9].

⁷ Б. ДеВитт возродил интерпретацию Х. Эверетта, назвав ее многомировой. Позже были сформулированы интерпретации согласованных историй, транзакционная, модальная, объективного коллапса и ряд других.



вой теории, классический реализм оказался в роли обороняющегося, а активность его сторонников свелась к поиску возможных лазеек в схемах экспериментов и ошибок в интерпретациях их результатов. Их оппоненты, напротив, придумывали все новые эксперименты для устранения лазеек, а также новые способы проверить предложенные ранее мысленные эксперименты [Терехович, 2017].

Частично благодаря критике антиреалистов, но в первую очередь благодаря развитию квантовой теории поля и ее экспериментальным подтверждениям, в философии науки возникло несколько ослабленных версий реализма, например экспериментальный реализм и структурный реализм в эпистемической, онтической и конструктивной версиях [Фурсов, 2013]. Сторонники квантового реализма продолжали предлагать новые интерпретации КМ⁸. Появилось большое число статей и научно-популярных книг, стали проводиться десятки семинаров и конференций, посвященных исключительно философским проблемам КМ. После конференции «Квантовая физика и природа реальности» в так называемых «Оксфордских вопросах» [Briggs, Butterfield, Zeilinger, 2013] констатировалось, что по всему миру множество групп исследователей занимаются изучением природы реальности, которая описывается квантовой теорией. Там же были сформулированы основные проблемы, требующие исследования и, соответственно, финансирования. Следующий этап дискуссий начался с появлением новых квантовых технологий.

Вторая квантовая революция поддерживает квантовый реализм

Для характеристики существенных отличий современной экспериментальной и технологической революции, вызванной развитием квантовой теории, в последнее десятилетие используется термин *вторая квантовая революция*. Благодаря первой квантовой революции в физике и технологиях было создано атомное оружие; атомная энергетика; сверхпроводники; лазеры; полупроводники, приведшие к созданию интегральных микросхем, компьютеров, интернета, мобильной связи, медицинских технологий и много другого. Основным объектом исследования и технического манипулирования были молекулы, атомы, группы частиц и их наблюдаемые свойства. Но в последние два десятилетия специалисты научились манипулировать отдельными квантовыми системами (ионами, фотонами и атомами) в

⁸ К ним можно отнести интерпретации: реляционную, информационную, квантовый дарвинизм, новые версии многомировой интерпретации, использующие декогеренцию и теорию принятия решений.



состоянии суперпозиции, а также сложными системами в запутанном состоянии. Именно эти новые навыки стимулировали вторую квантовую революцию, объединяющую новые технологии передачи и обработки информации, в том числе квантовой криптографии и квантового компьютера; квантовые часы; квантовые датчики; новые подходы в когнитивных науках и создании искусственного интеллекта.

С началом второй квантовой революции неадекватность классического реализма в отношении квантовых объектов становится все более очевидной. Но и квантовый антиреализм Копенгагенской интерпретации оказался недостаточно эффективен для объяснения результатов экспериментов. Экспериментаторов и инженеров уже не устраивают ссылки на таинственную роль наблюдателя, на математический трюк с проекционным постулатом и на дополнительность квантовых и классических законов. Те, кто создает экспериментальные установки и внедряет новые технологии, могут быть антиреалистами в отношении квантовой теории или как минимум сомневаться в ней. Но они, скорее, будут тяготеть к реализму в отношении объектов этой теории, ведь они изучают их свойства, манипулируют ими и используют в работающих устройствах. А, как выразился Я. Хакинг, «большая часть физиков-экспериментаторов являются реалистами относительно теоретических объектов, которые они используют» [Хакинг, 1998, с. 272]. Несомненно, физики продолжают использовать операциональный подход, наполняя экспериментальным содержанием основные понятия и утверждения квантовой теории. Но этот подход следует отличать от философского операционализма, который «отказывает в праве на существование понятиям, не имеющим непосредственного отношения к экспериментам» [Клышко, 1998, с. 977].

По мнению Хакинга, ни успешное объяснение, ни даже экспериментирование с объектом еще не позволяют сделать вывод о его существовании, «только манипулирование с объектом при экспериментировании с чем-нибудь другим может в этом убедить» [Хакинг, 1998, с. 272]. А, как известно, и передача квантовой информации, и квантовая криптография, и квантовый компьютер основаны как раз на манипуляциях с волновыми функциями запутанных квантовых состояний.

Например, передача зашифрованной квантовой информации может производиться с помощью объектов, предварительно запутанных и разнесенных в пространстве между отправителем и получателем информации. В результате манипуляции с волновой функцией одного из таких объектов в точке отправления его состояние разрушается и воссоздается для второго объекта в точке приема. Благодаря такой квантовой телепортации можно существенно увеличить расстояние передачи информации и ее секретность. Но именно существование явления квантовой запутанности и ее нелокальных свойств отрица-



ют сторонники классического реализма. Другой пример манипуляции волновой функцией реализован в прототипах квантового компьютера. Основная его идея в том, что процесс вычисления происходит в состоянии суперпозиции (в кубитах), а ответ выдается уже в виде классической информации (в битах). Результаты вычислений первоначально тоже находятся в суперпозиции, и когда мы пытаемся их узнать, то случайным образом получаем лишь один из них. То есть для получения ответа с достаточной точностью (вероятностью) надо много раз повторить весь цикл вычислений. Получается, что члены суперпозиции все-таки обладают какой-то степенью реальности. Иначе откуда возникает результат их взаимодействия?

В попытках найти ответ на последний вопрос обострился спор квантового реализма и квантового антиреализма. Сторонник первого подхода Д. Дойч утверждает, что экспоненциальное ускорение в квантовых вычислениях может быть правильно понято только в рамках многомировой интерпретации КМ [Дойч, 2015]. Хотя решить проблему вычислений в рамках квантового реализма можно и другим способом, например придать онтологический статус самой квантовой информации [Vub, 2004]. В рамках компромисса между классическим и квантовым реализмом продолжается дискуссия о реализме в его нелокальной версии. А совсем недавно квантовый антиреализм получил поддержку в лице интерпретации, названной Q-bism, где вероятность как мера знания заменяется на вероятность по Байесу как меру уверенности [Fuchs, 2017].

Для сторонников квантового реализма остается еще один трудный вопрос – всегда ли возможность манипуляций ненаблюдаемым теоретическим объектом говорит о его существовании? Например, если теоретическое представление о волновой функции изменится, то она может или вообще перестать существовать как теоретический объект, или стать предельным случаем другого теоретического объекта, например оператора квантового поля с бесконечным числом степеней свободы, действующего на вакуумный вектор в пространстве Фока. Что-то похожее происходит в рамках конструктивной версии структурного реализма (Т.Ю. Цао). Однако если формально следовать концепции структурного реализма и абстрагироваться от пристрастий его конкретных сторонников, то волновая функция даже в этом случае вполне может остаться реальной структурой. Во-первых, она обладает необходимыми внутренними симметриями. Во-вторых, ни квантовая механика, ни квантовая теория поля не являются окончательными теориями, а это не может служить препятствием для придания онтологического статуса волновой функции.

Кстати, Хакинг и сам признает, что «многие свойства надежно приписаны к электронам, но большинство свойств выражено в многочисленных теориях или моделях, о которых экспериментатор может



знать довольно мало» [Хакинг, 1998, с. 273]. Теоретическую нагруженность ненаблюдаемых объектов Хакинг предлагает заменить семейством причинных свойств объекта, которые, как он думает, не зависят от теории. Однако, как известно, понятия о причинных законах и о типах причинности сильно варьируются в различных физических теориях, даже в рамках одной парадигмы. Кроме того, само понятие причинности является предметом философской дискуссии.

Можно заключить, что возможность с помощью волновой функции манипулировать другими объектами – только один из аргументов (хотя и довольно сильный) в пользу ее реальности или как минимум в пользу того, что она отражает внутреннюю структуру квантовой системы. Другой аргумент – это получение одних и тех же результатов в экспериментах, проводимых по разным схемам и с разными объектами (частицами, атомами, молекулами). Следует признать, что, во-первых, у обоих аргументов есть слабые стороны и их явно недостаточно, а во-вторых, они не снимают проблему истинности квантовой теории. Скорее, наоборот, делают необходимым дальнейшее развитие как самой теории, так и ее интерпретации.

Заключение

Противники классического реализма считают, что эксперименты окончательно опровергли его утверждения о том, что свойства квантовых объектов локальны, существуют до наблюдения и от него независимы. Но, как это часто случалось в истории физики, эксперименты не являются достаточным основанием для отказа от привычных представлений о реальности. Классическая парадигма и не собирается сдавать позиции в умах своих сторонников, которые наверняка будут изобретать новые лазейки в экспериментах и требовать более точных и веских контраргументов. Похоже, что революционные трансформации, вызванные появлением квантовой теории, спустя 90 лет все еще далеки от завершения.

В начале XXI века основная конкуренция развернулась между квантовым реализмом и квантовым антиреализмом. Первый давно не является маргинальным, в его рамках уже возникли и продолжают возникать десятки новых интерпретаций КМ. Позиции Копенгагенской интерпретации с ее пси-эпистемическим подходом, напротив, пошатнулись, хотя еще остается большое число ее сторонников. Помимо ряда экспериментов, сильный аргумент против нее содержится в PBR-теореме [Pusey, Barrett, Rudolph, 2012], благодаря которой любые пси-эпистемологические модели могут быть исключены или ограничены [Briggs, Butterfield, Zeilinger, 2013].



Помимо теоретических дискуссий и экспериментов, сильным аргументом в споре о квантовой реальности становятся новые технологии, внедряемые в рамках второй квантовой революции. Это подтверждает тезис о том, что развитие технологических инноваций может оказывать обратное влияние на изменение философских оснований науки и научной картины мира в конкретной области. Велика вероятность того, что технологии квантовой криптографии и квантовых вычислений окажутся практически успешными (что пока не гарантировано). **А это может привести к очередному пересмотру представлений о реальности и способах ее познания, что в перспективе способно вызвать революционные трансформации не только в физике, но и в биологии, и в когнитивных науках.**

Список литературы

Гейзенберг, 1958 – *Гейзенберг В.* Развитие интерпретации квантовой теории // Нильс Бор и развитие физики / Под ред. В. Паули. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. С. 23–45.

Гриб, 2013 – *Гриб А.А.* К вопросу об интерпретации квантовой физики // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. № 12. С. 1337–1352.

Дойч, 2015 – *Дойч Д.* Структура реальности. **Наука параллельных вселенных.** М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 460 с.

Клышко, 1998 – *Клышко Д.Н.* Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. № 9. С. 975–1015.

Мамчур, 2017 – *Мамчур Е.А.* ненаблюдаемые сущности современной физики: социальные конструкты или реальные объекты? // *Epistemology & Philosophy of Science* / Эпистемология и философия науки. 2017. Т. 51. № 1. С. 106–123.

Перспективы реализма в современной философии, 2017 – Перспективы реализма в современной философии / Под ред. В.А. Лекторского. М., 2017. 464 с.

Терехович, 2015 – *Терехович В.Э.* Модальные подходы в метафизике и квантовой механике // *Метафизика.* 2015. № 1. С. 129–152.

Терехович, 2017 – *Терехович В.Э.* Существование квантовых объектов. Экспериментальная проверка метафизических установок // *Метафизика.* 2017. № 1(23). С. 104–112.

Терехович, 2018 – *Терехович В.Э.* Революционные трансформации в квантовой физике и инновации в квантовых технологиях // *Манускрипт.* 2018. № 11. С. 119–125.

Фейнман, 2014 – *Фейнман Р.* КЭД – странная теория света и вещества. М.: АСТ, 2014. 191 с.

Фейнман, Лейтон, Сэндс, 1965 – *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 3: Излучение. Волны. Кванты. М.: Мир, 1965. 238 с.

Фейнман, Хибс, 1968 – *Фейнман Р., Хибс А.* Квантовые интегралы по траекториям. М.: Мир, 1968. 384 с.



Фок, 1957 – Фок В. А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. 1957. Т. 62. №. 8. С. 461–474.

Фок, Эйнштейн, Подольский, Розен, Бор, 1936 – Фок В.А., Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н., Бор Н. Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным? // Успехи физических наук. 1936. Т. 16. № 4. С. 436–457.

Фурсов, 2013 – Фурсов А.А. Проблема статуса теоретического знания науки в полемике между реализмом и антиреализмом. М.: Издатель А.В. Воробьев, 2013. 240 с.

Хакинг, 1998 – Хакинг Я. Представление и вмешательство. Введение в философию естественных наук / Пер. с англ. С. Кузнецова, науч. ред. Е.А. Мамчур. М.: Логос 1998. 296 с.

Цао, 2008 – Цао Т.Ю. Структурный реализм и концептуальные вопросы квантовой хромодинамики // *Epistemology & Philosophy of Science* / Эпистемология и философия науки. 2008. Т. 17. № 3. С. 143–156.

Briggs, Butterfield, Zeilinger, 2013 – Briggs G.A.D., Butterfield J.N., Zeilinger A. The Oxford Questions on the foundations of quantum physics // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society. 2013. Vol. 469(2157). P. 213–299.

Bub, 2004 – Bub J. Why the quantum? // Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics. 2004. Vol. 35. No. 2. P. 241–266.

Dowling, Milburn, 2003 – Dowling J.P., Milburn G.J. Quantum technology: the second quantum revolution // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2003. Vol. 361. No. 1809. P. 1655–1674.

Fuchs, 2017 – Fuchs C.A. On participatory realism // Information and Interaction. Eddington, Wheeler, and the Limits of Knowledge / Durham I.T., Rickles D. (eds.). Cham: Springer, 2017. P. 113–134.

Harrigan, Spekkens, 2010 – Harrigan N., Spekkens R.W. Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states // Foundations of Physics. 2010. Vol. 40. No. 2. P. 125–157.

Mermin, 1989 – Mermin N.D. What's Wrong with this Pillow? // Physics Today. 1989. Vol. 42(4). P. 9.

Mermin, 2012 – Mermin N.D. Commentary Quantum mechanics: Fixing the Shifty Split // Physics Today. 2012. Vol. 65(7). URL: <https://doi.org/10.1063/PT.3.1618> (дата обращения: 10.07.2018).

Quantum Manifesto, 2016 – Quantum Manifesto for Quantum Technologies. 2016. URL: <https://ec.europa.eu/futurium/en/content/quantum-manifesto-quantum-technologies> (дата обращения: 01.07.2018).

Pusey, Barrett, Rudolph, 2012 – Pusey M.F., Barrett J., & Rudolph T. On the Reality of the Quantum State // Nature Physics. 2012. Vol. 8(6). P. 475–478.



References

Briggs, G. A. D., Butterfield, J. N., Zeilinger, A. “The Oxford Questions on the foundations of quantum physics”, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society*, 2013, vol. 469(2157), pp. 213–299.

Bub, J. “Why the quantum?”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 2004, vol. 35, no. 2, pp. 241–266.

Deutsch, D. *Struktura real'nosti. Nauka parallel'nykh vseleennykh* [The Fabric of Reality: the Science of Parallel Universes]. Moscow: Alpina, 2015. 460 pp. (In Russian)

Dowling, J. P., Milburn, G. J. “Quantum technology: the second quantum revolution”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2003, vol. 361, no. 1809, pp. 1655–1674.

Einstein, A., Podolsky, B., Rozen, N., Bohr, N. “Mozhno li schitat', chto kvantovo-mekhanicheskoe opisanie fizicheskoy real'nosti yavlyaetsya polnym?” [Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1936, vol. 16, no. 4, pp. 436–457. (In Russian)

Feynman, R. *KED – strannaya teoriya sveta i veshhestva* [QED: the strange theory of light and matter]. Moscow: AST, 2014. 191 pp. (In Russian)

Feynman, R., Hibbs, A. *Kvantovye integraly po traektoriyam* [Quantum mechanics and path integrals]. Moscow: Mir, 1968. 384 pp. (In Russian)

Feynman, R., Leighton, R., Sands, M. *Fejnmanovskie lektzii po fizike. Vol. 3: Izluchenie. Volny. Kvanty* [The Feynman Lectures on Physics. Vol. 3. Radiation. Waves. Quanta]. Moscow: Mir, 1965. 238 pp. (In Russian)

Fock, V. A. “Ob interpretatsii kvantovoj mekhaniki” [On the Interpretation of Quantum Mechanics], *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1957, vol. 62, no. 8, pp. 461–474. (In Russian)

Fuchs, C. A. “On participatory realism”, in: *Information and Interaction. Ed-dington, Wheeler, and the Limits of Knowledge*. Durham, I. T., Rickles, D. (eds.). Cham: Springer, 2017, pp. 113–134.

Fursov, A. A. *Problema statusa teoreticheskogo znaniya nauki v polemike mezhdru realizmom i antirealizmom* [The problem of the status of theoretical knowledge of science in the debate between realism and anti-realism]. Moscow: Vorobyev Publ., 2013. 240 pp. (In Russian)

Grib, A. A. “K voprosu ob interpretatsii kvantovoj fiziki” [On the interpretation of quantum physics], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2013, vol. 183, no. 12, pp. 1337–1352. (In Russian)

Hacking, I. *Predstavlenie i vmeshatel'stvo. Vvedenie v filosofiyu estestvennykh nauk* [Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science]. Moscow: Logos, 1998. 296 pp. (In Russian)

Harrigan, N., Spekkens, R. W. “Einstein, Incompleteness, and the Epistemic View of Quantum States”, *Foundations of Physics*. 2010, vol. 40, no. 2, pp. 125–157.

Heisenberg, W. “Razvitie interpretatsii kvantovoj teorii” [The development of the interpretation of quantum theory], in: W. Pauli (ed.). *Nil's Bor i razvitie fiziki* [Niels Bohr and the development of physics]. Moscow, 1958, pp. 23–45. (In Russian)



Klyshko, D. N. “Osnovnye ponyatiya kvantovoj fiziki s operatsional’noj tochki zreniya” [Basic concepts of quantum physics from an operational point of view], *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1998, vol. 168, no. 9, pp. 975–1015. (In Russian)

Mamchur, E. A. “Nenablyudaemye sushhnosti sovremennoj fiziki: sotsial’nye konstrukty ili real’nye ob’ekty?” [Unobserved essences of modern physics: social constructs or real objects?], *Epistemology & Philosophy of Science*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 106–123. (In Russian)

Mermin, N. D. “Commentary Quantum mechanics: Fixing the shifty split”, *Physics Today*, 2012, vol. 65, no. 7 [<https://doi.org/10.1063/PT.3.1618>. accessed on 10.07.2018]

Mermin, N. D. “What’s Wrong with this Pillow?”, *Physics Today*, 1989, vol. 42, no. 4, p. 9.

Perspektivy realizma v sovremennoj filosofii [Perspectives of Realism in Modern Philosophy], Lektorsky, V. A. (ed.). Moscow: IF RAN, 2017. 464 pp. (In Russian)

Pusey, M. F., Barrett, J., & Rudolph, T. “On the Reality of the Quantum State”, *Nature Physics*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 475–478.

Quantum Manifesto for Quantum Technologies. 2016 [<https://ec.europa.eu/futurium/en/content/quantum-manifesto-quantum-technologies>, accessed on 10.07.2018].

Terekhovich, V. E. “Modal’nye podkhody v metafizike i kvantovoj mekhanike” [Modal Approaches in Metaphysics and Quantum Mechanics], *Metafizika*, 2015, no. 1, pp. 129–152. (In Russian)

Terekhovich, V. E. “Sushhestvovanie kvantovykh ob’ktov. Eksperimental’naya proverka metafizicheskikh ustanovok” [Existence of quantum objects. Experimental verification of metaphysical presuppositions], *Metafizika*, 2017, no. 1(23), pp. 104–112. (In Russian)

Terekhovich, V. E. Revolyutsionnye transformatsii v kvantovoj fizike i innovatsii v kvantovykh tekhnologiyakh [Revolutionary Transformations in Quantum Physics and Innovations in Quantum Technologies], *Manuskript*, 2018, no. 11, pp. 119–125. (In Russian)

Tsao, T. Y. “Strukturnyj realizm i kontseptual’nye voprosy kvantovoj khromodinamiki” [Structural realism and conceptual issues of quantum chromodynamics], *Epistemology & Philosophy of Science*, 2008, vol. 17, no. 3, pp. 143–156. (In Russian)