

# Реальность волновой функции и манипулятивный аргумент.

Терехович Владислав Эрикович

*Институт философии, Санкт-Петербургский государственный университет*

[v.terekhovich@gmail.com](mailto:v.terekhovich@gmail.com)

## **Аннотация.**

В статье рассматривается проблема реальности волновой функции квантовой теории. Перечислены основные точки зрения на реальность ненаблюдаемых объектов теорий вообще и волновой функции в частности. Особое внимание уделено манипулятивному аргументу, предложенному Я. Хакингом и Н. Картрайт в рамках экспериментального реализма. Сильные и слабые стороны этого аргумента рассматриваются на примере технологий квантовой криптографии и квантового компьютера, а также экспериментов с «отложенным выбором» и «квантовым ластиком». Несмотря на возможность манипулировать объектами с помощью волновой функции, это еще не является достаточным аргументом в пользу ее реальности. Однако такие манипуляции могут подтвердить гипотезу о том, что волновая функция отражает некую реальную внутреннюю структуру квантовой системы.

**Ключевые слова:** квантовая механика, волновая функция, реализм, анти-реализм, экспериментальный реализм, структурный реализм.

Практически одновременно с созданием квантовой механики развернулась дискуссия не только об ее истинности как теории, но и о том, какое отношение к реальности имеют вводимые этой теорией ненаблюдаемые объекты. В первую очередь это касается квантового состояния, которое описывается волновой функцией или вектором состояния. В отличие от классической физики квантовая теория изучает не набор однозначных свойств объекта, которые можно измерить одновременно, а волновую функцию (вектор состояния), содержащую полную информацию обо всех возможных значениях свойств квантовой системы. Предполагается, что до измерения эти возможные значения находятся в суперпозиции. Они как бы сосуществуют вместе и даже интерферируют друг с другом. Поэтому до измерения в принципе невозможно определить, какими конкретными свойствами обладает система. До измерения волновая функция (а значит, и все возможные состояния системы) может изменяться во времени в соответствии с дифференциальным уравнением Шредингера – детерминистическим и обратимом. Но во время измерения система непредсказуемым образом переходит только в одно из своих возможных состояний. Как именно происходит такой скачок, как отбирается одна из возможностей, теория не описывает. Она позволяет вычислить только вероятность каждого отдельного показания прибора (правило М. Борна). И эти вычисления прекрасно согласовываются с наблюдениями.

Проблема в том, что формализм квантовой теории ничего не говорит о реальности, точнее, о характере существования квантовых объектов и их свойств до момента измерения. Задача теории ограничивается предсказанием наблюдаемых

явлений. Неудивительно, что создатели квантовой теории пытались придать новым теоретическим понятиям, моделям и их математическим формализмам хоть какой-то физический смысл. В первую очередь они искали аналогии из других, уже известных физических теорий. Например, классические аналогии с волнами, фазами, полями, интенсивностью излучения, статистической вероятностью и т.п. С этих поисков началась дискуссия о реальности объектов квантовой теории. Велась она в форме соревнования между различными интерпретациями квантовой механики, создатели которых опирались на собственные философские и методологические убеждения. Каждая такая интерпретация пыталась ответить на два основных вопроса: Что скрывается за значками уравнений разных формализмов квантовой теории? Почему формализмы квантовой теории так точно соответствуют экспериментам?

В современной философии науки дискуссия о реальности объектов научной теории часто рассматривается в контексте противостояния различных версий научного реализма и анти-реализма (Фурсов, 2013). Под научным реализмом понимают позицию, разделяющую три тезиса. Согласно метафизическому тезису, мир существует независимо от нашего понимания и наблюдения за ним. Эпистемический тезис гласит, что успешные научные теории с высокой степенью вероятности отражают реальность. Семантический тезис утверждает, что теоретические термины успешных научных теорий обозначают реальные физические объекты и их свойства, даже если эти объекты ненаблюдаемы. Сторонники анти-реализма обычно отрицают все три тезиса.

Научные реалисты приводят ряд аргументов: (1) реализм – это лучшее объяснение успеха науки, иначе мы вынуждены поверить в чудо; (2) наука делает все новые и новые предсказания, и они тоже подтверждаются опытом; (3) предсказания теорий соответствует опыту даже при росте точности измерений; (4) предсказанные факты подтверждаются разными теориями.

У анти-реалистов есть не менее сильные аргументы: (1) логический аргумент о недоопределенности теорий эмпирическими данными; (2) исторический аргумент пессимистической индукции, гласящий, что даже самые успешные теории рано или поздно устаревают, а после научных революций меняются не только теории, но и парадигмы. Есть еще аргументы, связанные с ограниченностью экспериментов и их теоретической нагруженностью, а также с плюрализмом интерпретаций одних и тех же теорий.

Игнорировать аргументы обеих сторон довольно трудно, поэтому неизбежно возникают компромиссные варианты. Например, конструктивный эмпиризм (Б. Ван Фраассен), оставаясь анти-реалистическим, принимает эпистемический тезис реалистов. Одновременно он утверждает, что мы никогда не сможем узнать, существуют ли на самом деле объекты, постулируемые теориями (как наблюдаемые, так и ненаблюдаемые), в лучшем случае это полезные конструкции ума, идеализации или набор эмпирических данных. Для науки вполне достаточно эмпирической адекватности теории.

Благодаря развитию квантовой теории поля и ее экспериментальным подтверждениям, возникло несколько ослабленных версий реализма. Например, экспериментальный или сущностный реализм (Я. Хакинг, Н. Картрайт). Он, наоборот, отказывается от эпистемического тезиса, а наиболее надежным критерием

реальности ненаблюдаемых объектов теории называет возможность манипулировать ими в эксперименте, благодаря чему можно влиять на другие реальные объекты. Раз объект участвует в причинном влиянии, значит, он существует.

Различные версии структурного реализма пытаются преодолеть аргументы анти-реалистов путем рассмотрения не самих объектов, а структур – устойчивых систем отношений между объектами. Согласно эпистемической версии (Дж. Уоррелл, Г. Максвелл), объекты и свойства непознаваемы, мы можем познавать только структуры реальности, выраженные математическими формализмами теорий. Онтическая версия (Дж. Лэдиман, С. Френч) предлагает полностью отказаться от понятия индивидуальных объектов и их свойств в пользу онтологии структур как фундаментальных элементов реальности, например, различных групп симметрий. В конструктивной версии структурного реализма (Т. Цао) подчеркивается, что теоретические конструкции ненаблюдаемых сущностей всегда будут неполны и должны постоянно реконструироваться на основе возрастающего структурного знания в процессе взаимодействия между теорией, экспериментом и философской интерпретацией теории.

Все точки зрения на реальность объектов квантовой теории можно условно разделить на три больших группы – две реалистических и одну анти-реалистическую. С точки зрения первой группы, назовем ее классическим реализмом, свойства квантовых объектов, как и классических, существуют объективно и не зависят от наблюдения, но они не описываются квантовой теорией. Никаких квантовых парадоксов не существует, поскольку квантовая теория – это лишь инструмент, временная модель, математический способ предсказания результатов наблюдений. Подобный подход лежит в основании различных статистических интерпретаций и интерпретаций с локальными скрытыми параметрами.

Другой реалистический подход с условным названием квантовый реализм объединяет ряд интерпретаций, где существование квантовых объектов совместимо с формализмом квантовой теории. Уже до наблюдения можно говорить о существовании неких квантовых сущностей, хотя их взаимодействия могут сильно отличаться от классических, в первую очередь своей нелокальностью и отсутствием однозначной причинности при переходе от квантовых явлений к классическим. На роль таких сущностей в разных интерпретациях предлагались волны материи, волны вероятности, нелокальные потенциалы. В более поздних интерпретациях к ним добавились: предрасположенности, отношения, согласованные истории, квантовые операторы, миры, кубиты и, наконец, сама волновая функция.

Третья группа – квантовый анти-реализм представлен в первую очередь Копенгагенской интерпретацией, а недавно еще и квантовым байесонизмом (Q-bism). В отличие от квантового реализма, волновая функция здесь отражает не информацию, находящуюся в квантовом объекте или внутри системы «квантовый объект-окружение-прибор», а описывает исключительно наше знание, то есть информацию для сознающего наблюдателя. Поскольку Копенгагенскую интерпретацию поддерживали многие физики, стоявшие у истоков квантовой механики и разделяющие позицию Н. Бора и В. Гейзенберга в их споре с А.

Эйнштейном, до сих пор многие ошибочно полагают, что Копенгагенская интерпретация и квантовая теория – это одно и то же.

Несмотря на противоположное отношение к реальности квантовых объектов, взгляды сторонников классического реализма и квантового анти-реализма на характер существования волновой функции в чем-то близки. Для тех и других она является эпистемологическим объектом, описывающим знание наблюдателя. Только в случае классического реализма – это приближенное знание или незнание о каком-то одном действительном состоянии из нескольких возможных. В качестве аналогии приводят распределение вероятностей уже произошедших событий в статистической физике. В случае квантового анти-реализма – это полное знание (степень уверенности) обо всех возможных результатах будущих опытов. Поэтому, с определенными оговорками классический реализм и квантовый анти-реализм можно отнести к, так называемой, пси-эпистемологической точке зрения, согласно которой одно и то же реальное физическое состояние может быть совместимо с различными квантовыми состояниями (Harrigan, Spekkens, 2010). И только квантовый реализм можно отнести к пси-онтической точке зрения, согласно которой каждому физическому (онтическому) состоянию соответствует только одно квантовое состояние, которое как раз и описывает волновая функция. Таким образом, хоть какая-то степень реальность волновой функции подразумевается только в интерпретациях, относящихся к квантовому реализму.

Благодаря развитию технологий, в 80-х годах прошлого века дискуссия между разными подходами к реальности квантовых состояний от теоретических аргументов постепенно перешла в лаборатории. Далее рассмотрим несколько аргументов в пользу реальности волновой функции в контексте конкретных экспериментов и технологий.

Семантический тезис научных реалистов гласит, что если ненаблюдаемый объект упоминается в теории, хорошо подтвержденной экспериментом, скорее всего, этот объект существует. Однако, по мнению Г. Максвелла, этот критерий реальности основан на старой ошибке, когда значение существовать путают со свидетельством о существовании (Максвелл, 2005). Примером такой путаницы может служить попытка доказать реальность «волны вероятности» тем, что волновое уравнение Шредингера предсказывает и, казалось бы, даже объясняет наблюдаемые волновые свойства квантовых частиц. Но тут же возникал вопрос, о каких волнах идет речь. Сначала говорили о «волнах материи», потом ссылались на корпускулярно-волновой дуализм из Копенгагенской интерпретацией, согласно которому, квантовые объекты могут проявляться в опыте то как волны, то как частицы. Правда, из теории следовало, что волновая функция – это не классическая волна какого-то поля, а, как минимум, математическая структура, описывающая корреляции между всеми возможными исходами измерений. В опыте квантовые объекты регистрируются как частицы, а их волновой характер можно обнаружить только в статистической обработке серии экспериментов. По сути, в теории интерферируют не волны, а те самые возможные исходы. Термин «интерференция» здесь означает не сложение классических волн, а лишь математическую операцию векторного анализа.

С появлением квантовой электродинамики в рамках квантовой теории поля объяснительная сила корпускулярно-волнового дуализма существенно ослабла. В

формализме «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана изучение эволюции квантового состояния до измерения заключается в суммировании вкладов всех возможных переходов квантовой системы из одного состояния в другое. В аналогии с классическими волнами уже нет необходимости, а волны электромагнитного поля становятся лишь статистическим усреднением и удобной моделью. Ньютон оказался частично прав. «Свет существует именно в виде частиц... Это особенно важно знать тем из вас, кто ходил в школу, где возможно, что-то говорили о волновой природе света» (Фейнман, 2014, с. 23). Вместо этого Фейнман использовал другую аналогию – с принципом наименьшего действия, представляя частицу, как перемещающуюся сразу вдоль всех возможных траекторий (Фейнман, Хибс, 1968, с. 41-48).

Несмотря на спорность семантического тезиса реалистов, аргументы анти-реалистов кажутся еще слабее. Максвелл критиковал само разделение объектов на наблюдаемые и ненаблюдаемые, поскольку возможность наблюдаемости связана с уровнем развития инструментов для наблюдения, а не с характеристиками реальных объектов (аргумент эволюции приборов). Это значит, что наблюдаемость в принципе не может использоваться для установления онтологического статуса объектов (Максвелл, 2005). Применительно к волновой функции это означает, что отсутствие ее экспериментального наблюдения в настоящее время ещё не означает, что такого наблюдения не будет в будущем.

Похожий аргумент Я. Хакинг рассмотрел на примере развития микроскопов (Хакинг, 1998, с. 135). Но основной его аргумент в пользу существования ненаблюдаемых теоретических объектов – это возможность манипулировать ими так, чтобы они влияли на другие наблюдаемые объекты. 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» (там же, с. 272). Этот аргумент он связал с причинностью: «реальность относится к причинности и наши представления о реальности формируются нашими способностями к изменению мира» (там же, с. 158). Хакинг рассматривал пример электрона, но этот же критерий можно применить и к волновой функции. Если манипуляции с волновой функцией влияют на другие наблюдаемые объекты, она вполне может быть признана реально существующей, поскольку является причиной наблюдаемых явлений.

Одно из возражений против критерия манипулятивности заключается в его излишней узости, например, мы не можем манипулировать космическими объектами, но это не означает, что они не существуют. Это возражение можно преодолеть, если под манипулированием понимать не только лабораторное воздействие, но и наблюдение причинного действия ненаблюдаемого объекта на наблюдаемые объекты, в реальности которых мы не сомневаемся. Например, в реальности такого ненаблюдаемого объекта, как темная материя, сегодня уже мало кто сомневается.

Хорошей иллюстрацией манипулятивного аргумента могут служить технологии передачи квантовой информации, квантовой криптографии и квантового компьютера. Ведь они основаны как раз на манипуляциях с волновыми функциями запутанных квантовых состояний. Возможно по этой причине для физиков и инженеров, работающих в этих областях, уже давно не стоит вопрос, существует ли суперпозиция квантовых состояний или нет.

Например, передача зашифрованной квантовой информации может производиться не только на основе использования обычной квантовой суперпозиции нескольких состояний или запутанных пар частиц, но и с помощью объектов, предварительно запутанных и разнесенных в пространстве между отправителем и получателем информации. В последнем случае, в результате манипуляции с волновой функцией одного из таких объектов в точке отправления его состояние разрушается и воссоздается для второго объекта в точке приёма. Такое явление называют квантовой телепортацией. Благодаря ей можно существенно увеличить расстояние передачи информации и ее секретность. И тех, кто работает над этой технологией, не смущает, что сторонники классического реализма отрицают саму возможность квантовой запутанности. Защищая свою позицию, они напоминают, что квантовая телепортация не передаёт энергию или вещество на расстояние, а передача информации по классическому каналу не может осуществляться быстрее скорости света. Однако, строго говоря, эти аргументы относятся к 4-х мерному пространству-времени и информации, получаемой классическим наблюдателем. Но на квантовом уровне до измерения, скорее всего, еще нет ни того, ни другого.

Другой пример манипуляции волновой функцией реализован в прототипах квантового компьютера. Основная идея заключается в том, что процесс вычисления происходит в состоянии суперпозиции (в кубитах), которое описывается волновой функцией, а ответ выдается уже в виде классической информации (в битах). Чтобы получить квантовый регистр, несколько кубитов запутывают друг с другом, между ними возникает нелокальная корреляция. Манипулируя такими запутанными кубитами, можно заставить их производить вычисления. Результаты этих вычислений первоначально тоже находятся в суперпозиции, и когда мы пытаемся их узнать, то случайным образом получаем лишь один из них. Суперпозиция при этом разрушается. Для получения ответа с достаточной точностью (вероятностью), надо много раз повторить весь цикл вычислений. Получается, что члены суперпозиции все-таки обладают какой-то степенью существования, даже если мы не можем наблюдать сам процесс взаимодействия внутри квантового регистра, а только его результат. Иначе, откуда этот результат возникает?

Сторонник квантового реализма Д. Дойч утверждает, что экспоненциальное ускорение в квантовых вычислениях может быть правильно понято только в рамках многомировой интерпретации (Дойч, 2015). Другой вариант, но тоже в рамках квантового реализма, заключается в придании квантовой информации онтологического статуса (Vub, 2004). Как компромисс между классическим и квантовым реализмом продолжается дискуссия о реализме в его нелокальной версии (Белинский, Клевцов, 2018). А недавно квантовый анти-реализм получил поддержку в лице интерпретации, названной Q-bism, где вероятность, как мера знания, заменяется на вероятность по Байесу, как меру уверенности (Fuchs, 2017).

Но всегда ли возможность манипуляций ненаблюдаемым теоретическим объектом говорит о его существовании? Ведь лабораторные манипуляции с ненаблюдаемыми объектами предполагают их теоретическую нагруженность. А значит, реализм в отношении ненаблюдаемых объектов неотделим от реализма в отношении теории. 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.

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). Хотя манипуляции и позволяют зафиксировать существование объекта, но набор его свойств может постоянно уточняться. Поэтому теоретическую нагруженность ненаблюдаемых объектов Хакинг предлагает заменить семейством причинных свойств объекта, которые, как он думает, не зависят от теории. Хакинг уточняет, что «эксперимент не просто утверждает нечто или докладывает о чем-то. Эксперимент – это действие, а не слова». Он ссылается на Н. Картрайт, которая считает, что теория сама по себе не содержит истины, а лишь помогает нам мыслить (Cartwright, 1983). Не теории производят факты и не законы являются причиной явлений. Причинами являются конкретные действующие объекты, пусть даже и ненаблюдаемые. Применительно к волновой функции это означает, что в результате манипуляций над ней, она сама становится действующим объектом – причиной наблюдаемых изменений.

Но и на это можно возразить, что понятия о причинных законах и о типах причинности сильно варьируются в различных физических теориях. В истории физики много примеров, когда считавшиеся достоверными случаи манипуляции оказывались ложными, и от подтвержденных таким образом ненаблюдаемых сущностей приходилось отказываться. Очевидный пример – сила тяготения, необходимость в которой как сущности отпала после создания общей теории относительности, где причиной стало считаться искривленное пространство-время. Причинные связи ньютоновой физики оказались ошибочными. А если представления о характере причинности – часть онтологии конкретной теории, то отрицая эту теорию, можно ли продолжать использовать ее причинность?

Более того, в квантовой теории сам физический принцип причинности сталкивается с рядом трудностей. И если эти трудности имеют фундаментальный характер, насколько мы можем опираться на реальность причинно-следственных связей для квантовых явлений? Не будем забывать, что и само понятие причинности довольно противоречиво и является предметом богатой философской дискуссии.

Несмотря на перечисленные возражения, манипулятивный аргумент все еще обладает силой при объяснении ряда квантовых экспериментов. Возьмем к примеру эксперимент с «отложенным выбором», где вместо двух щелей используется интерферометр Маха-Цендера с двумя светоделителями с полупрозрачным зеркалом, установленными на входе и на выходе. Детекторы ставятся на выходе из интерферометра, то есть после того, как фотон пролетел через второй светоделитель. Эксперименты подтверждают предсказание квантовой теории о том, что включение или выключение второго светоделителя изменяет волновую функцию фотона между светоделителями, что в свою очередь влияет на срабатывание детекторов. Причем это изменение после выбора экспериментатора происходит со скоростью минимум в четыре раза быстрее скорости света (Jacques, 2007).

Чтобы избежать прямого воздействия на фотоны, в экспериментах с «квантовым ластиком» манипуляция их волновой функцией производится не путем наблюдения, каким путем прошла частица, а путем информационной «маркировки» этих путей с помощью вспомогательных запутанных фотонов. Оказалось, что когда основные фотоны помечены, интерференционная картина исчезает, но если после прохождения фотонов через светоделитель информацию об их пути стереть, интерференционная картина появится вновь. Причем манипулировать волновой функцией можно даже тогда, когда измерение уже произошло (Ma, 2013).

Думаю, что в ближайшее время наибольший интерес будут представлять эксперименты, направленные на прямую проверку гипотезы о реальности волновой функции, высказанной авторами PBR-теоремы (Pusey, Barrett, Rudolph, 2012). Они математически показали, что волновая функция является не статистическим инструментом, а объективным состоянием квантовой системы, точнее внутренней предрасположенностью к тому или иному проявлению в эксперименте, и эта предрасположенность не имеет отношения к нашему знанию или незнанию. Отсюда делается предположение, что любые пси-эпистемологические модели могут быть исключены или ограничены. Хотя сторонники квантового анти-реализма уверены, что в PBR-теореме остаются лазейки (Reich, 2012). В одном из экспериментов было показано, что PBR-теорема выполняется, а статистическая эпистемологическая интерпретация не подтверждается. Это значит, что волновая функция должна напрямую соответствовать объективной реальности, если конечно такая реальность в принципе существует (Ringbauer, 2015).

Обобщая, можно заключить, что возможность манипулировать другими объектами с помощью волновой функции еще не является достаточным аргументом в пользу ее реальности. Но, возможно, это аргумент в пользу гипотезы, что волновая функция все же отражает некую реальную внутреннюю структуру квантовой системы. Сторонник конструктивной версии структурного реализма Т. Цао считает, что реальность ненаблюдаемой сущности может быть выведена из реальности ее структуры, даже если этой сущностью не получается манипулировать (Цао, 2008). В качестве примера он рассматривает кварки и глюоны. Можно предположить, что и волновая функция (вектор состояния) может лишь частично соответствовать некой более фундаментальной сущности, к пониманию которой мы будем приближаться по мере изучения свойств структур, в которых эта сущность участвует. Например, структур, ответственных за связь квантовых явлений и гравитации. Ведь, независимо от того, будем мы реалистами или анти-реалистами в отношении объектов теории, для нас всегда будет актуальной проблема истинности теории и ее дальнейшей экспериментальной проверки.

Рассмотренная здесь проблема реальности волновой функции иллюстрирует утверждение о том, что развитие инноваций в экспериментировании и технологиях может оказывать влияние на изменение научной картины мира в конкретной области. Если технологии обработки квантовой информации окажутся практически успешными, это может привести к очередному пересмотру привычных представлений о реальности физических объектов на фундаментальном уровне.



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».

### Литература:

- Белинский А. В., Клевцов, А. А. Нелокальный классический "реализм" и квантовая суперпозиция как отсутствие определенных значений физических величин до момента измерения // *Успехи физических наук*. 2018. Т. 188. №3. С. 335-342.
- Дойч Д. *Структура реальности. Наука параллельных вселенных*. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 460 с.
- Максвелл Г. Онтологический статус теоретических сущностей // *Философия науки*. 2005. №1 (24). С. 20-48.
- Фейнман Р., Хибс А. *Квантовые интегралы по траекториям*. М., 1968. 384 с.
- Фейнман Р. *КЭД - странная теория света и вещества*. М.: АСТ, 2014. 191 с.
- Фурсов А. А. *Проблема статуса теоретического знания науки в полемике между реализмом и антиреализмом*. 2013. М.: Издатель Воробьев АВ. 240 с.
- Хакинг Я. *Представление и вмешательство. Введение в философию естественных наук*. Пер. с англ. / Перевод С. Кузнецова, Науч. ред. Мамчур Е. А. М.: Логос 1998. 296 с.
- Цао Т.Ю. Структурный реализм и концептуальные вопросы квантовой хромодинамики // *Эпистемология и философия науки*. 2008. Т. 17. №3. С. 143-156.
- 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 (2). P. 241-266.
- Cartwright, N. *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: UP, 1983. 232 p.
- Fuchs C. A. On participatory realism // *Information and Interaction. Eddington, Wheeler, and the Limits of Knowledge* / Durham, I.T., Rickles, D. (Eds.). Springer, Cham, 2017. P. 113-134.
- Harrigan N., Spekkens R. W. Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states // *Foundations of Physics*. 2010. Vol. 40(2). P. 125-157.
- Jacques V. et al. Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment // *Science*. 2007. Vol. 315(5814), P. 966-968.
- Ma X. et al. Quantum erasure with causally disconnected choice // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013. Vol. 110(4). P. 1221-1226.
- Pusey, M. F., Barrett, J., & Rudolph, T. On the reality of the quantum state. *Nature Physics*, 2012. Vol. 8(6). P. 475.
- Reich, E. S. A boost for quantum reality. *Nature*. 2012. Vol. 485(7397). P. 157.
- Ringbauer M. et al. Measurements on the reality of the wavefunction. *Nature Physics*. 2015. Vol. 11(3). P. 249.