

Глава в коллективной Монографии: Шиповалова Л.В., Чеботарева Е.Э., Терехович В.Э., Милославов А.С., Дмитриев И.С. *Революционные трансформации в науке как фактор инновационных процессов: концептуальный и исторический анализ* / Научн. ред. и сост. Е.Э. Чеботарева. Москва: Изд-во Русское общество истории и философии науки, 2020. 128 p. ISBN (Electronic) 978-5-6045557-6-7.

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

От революционных трансформаций в квантовой физике к инновациям в квантовых технологиях и обратно¹.

Терехович Владислав Эрикович

НИУ ВШЭ Москва, Санкт-Петербургский государственный университет

Введение

Эта глава посвящена взаимному влиянию между революционными трансформациями в науки и конкретными технологическими инновациями. Под революционными трансформациями подразумевается радикальная перестройка оснований одной или нескольких наук, и, как следствие, переформулирование большинства традиционных характеристик научного познания. В частности исследуется вопрос, может ли сам факт дискуссии, связанной с революционными трансформациями в какой-либо области науки, оказать прямое влияние на характер и динамику инновационной деятельности не только в этой науке, что вполне предсказуемо, но и в создании новых технологий? На примере развития квантовой физики от момента ее создания и до настоящего времени показано, что ответ на этот вопрос может быть утвердительным. Будут приведены аргументы в пользу того, что современная вторая квантовая технологическая революция была подготовлена в процессе экспериментальной проверки разных взглядов на реалистичность моделей квантовой теории, реальность ее объектов, а также на роль наблюдателя в их превращении в классические объекты. Под второй квантовой революцией подразумевается совокупность технологий передачи и обработки квантовой информации. Причем основные объекты этих технологий используются так, как будто они существуют именно в той реалистической форме, как предсказывает квантовая теория. Это значит, что квантовые суперпозиции, нелокальность и неопределенность рассматриваются не как парадоксы, требующие интерпретации, а как обычные свойства объектов и инструменты для практического применения.

Основное утверждение состоит в том, что именно кардинальная перестройка оснований квантовой физики в первой четверти XX века, выразившаяся в новых взглядах

¹ Идеи данной главы в основе своей содержат текст, опубликованный в виде статей: «Революционные трансформации в квантовой физике и инновации в квантовых технологиях» [Терехович, 2018], «Три подхода к проблеме квантовой реальности и вторая квантовая революция» [Терехович, 2019а], «Реальность волновой функции и манипулятивный аргумент» [Терехович, 2019б], «Действительно ли философия слишком важна для физики, чтобы оставлять ее на откуп философам?» [Терехович, 2020].

на реальность, причинность и процесс наблюдения, привела к созданию новых технологий в начале XXI века. Этот конкретный пример демонстрирует, что влияние революционных трансформаций в науке на технологические инновации может быть отложено на довольно длительный срок, ожидая своего часа. Более того, только при определенном уровне развития технологий у специалистов может возникать потребность в новых понятиях и принципах, в новых методах исследования и объяснения, в новой научной картине мира и новых взглядах на реальность.

С другой стороны, будет показано, что в последние десятилетия, именно благодаря второй квантовой революции внутри научного сообщества обострились дискуссии вокруг онтологических и эпистемологических проблем реальности квантовых моделей и их объектов. Новые эксперименты и новые технологии теперь сами становятся сильными аргументами в, казалось бы, чисто философском споре о реальности. Следовательно, развитие технологических инноваций может оказывать обратное влияние на появление научных инноваций вплоть до критического пересмотра философских оснований конкретной области науки. В будущем это может привести к очередному пересмотру представлений о реальности и способах ее познания, а значит, подготовить к революционным трансформациям не только в физике, но и в других областях науки.

Научные инновации и революционные трансформации в науке.

Перед обоснованием утверждения, что перестройка оснований какой-либо науки может непосредственно влиять на инновационные процессы в других сферах человеческой деятельности, надо уточнить само понятие *научная инновация*. Под инновацией обычно понимают внедрение в практику чего-то нового, более эффективного, добавляющего некую ценность. Инновацией можно называть и результат такого внедрения, и приведший к нему процесс. Внедряться могут не только новые технологии и продукты, но и новые методы, процессы, отношения, потребности и ценности². И, конечно, внедряться может знание, новое и более эффективное. А значит, понятие *инновация* вполне можно применять к научной деятельности, как процессу получения нового знания.

В философской литературе проблема научных инноваций обычно рассматривается как проблема перехода от одной научной традиции к другой. Причем «инновации являются порождением традиции научного исследования» [Кузнецова, Розов, С. 60-81]. И хотя цель научного познания по определению состоит в получении нового достоверного знания о мире и человеке, не любое научное познание подходит под термин «инновация». В отличие от сбора новых фактов, расширения, проверки и уточнения ранее полученных знаний, *инновацией в научном познании* скорее следует называть использование новых экспериментальных и теоретических методов, дающих вполне конкретный прирост научного знания.

Новые экспериментальные методы могут включать: создание приборов, основанных на новых принципах; реализацию новых схем экспериментов и методов измерений; проверку мысленных экспериментов; изучение ранее неизвестных свойств и объектов и так далее. Новые теоретические методы включают: новые методы вычислений; новые

² Приведу только два из многочисленных определений инноваций. Инновации – это производство или адаптация и использование новизны с добавленной ценностью в экономической и социальной сферах. Это и процесс, и результат [Edison, Bin, Torkar, 2013]. Инновация – это результат инвестирования в разработку получения нового знания по обновлению сфер жизни людей и последующий процесс внедрения с фиксированным получением дополнительной ценности [Экономика и право, 1998]. Также см. обзор дискуссии, связанной с понятием инновации см. [Крючкова, 2001].

модели и классификации; новые понятия; описание новых явлений (объектов) или новых свойств ранее известных явлений (объектов); новые способы обоснования и объяснения; новые принципы; обобщение существующих или создание новых теорий и законов; формирование новых оснований науки, в том числе философских; создание новой картины мира. К инновациям можно отнести и новые способы внутренней организации науки, а также новые формы ее функционирования как социального института.

По сути, для определения научной инновации можно выделить два ключевых критерия: новизна – раньше этот экспериментальный или теоретический метод не использовался – и эффективность – новый метод дает лучший результат по сравнению с ранее используемыми. Но, как известно, и степень новизны, и научный результат могут быть признаны научным сообществом только после многочисленных дискуссий и проверок. Да и использование новых экспериментальных и теоретических методов далеко не всегда ведет к конкретным научным результатам. Поскольку термин «инновация» обычно применяется к чему-то уже завершённому, внедрённому и признанному, то в данном контексте логичнее говорить не об инновациях, а об *инновационной научной деятельности*, в результате которой впоследствии происходит прирост научного знания. Иначе говоря, любая научная деятельность лишь потенциально является инновационной, а признание или не признание степени ее инновационности всегда отложено во времени и происходит как бы «задним числом». Как замечает Е.Н. Князева, «не всякое научное открытие становится инновацией, поскольку для этого оно должно получить определенное признание в научном сообществе» [Князева, 1996, С. 76-92].

Обычная инновационная научная деятельность, несмотря на свою новизну, укладывается в рамки существующей научной традиции, которая опирается на парадигму или дисциплинарную матрицу (Т. Кун), научно-исследовательскую программу (И. Лакатос) или основания науки, включающие научную картину мира, идеалы и нормы исследования и философские основания (В.С. Степин). Как известно из истории и философии науки, парадигмы, научно-исследовательские программы или основания науки под давлением новых экспериментальных данных и новых, более эффективных теорий, периодически заменяются новыми. Такую смену принято называть «научными революциями».

В литературе используется разная классификация типов научных революций. В.С. Степин делит их на революции, связанные с трансформацией только специальной картины мира, и глобальные революции, в которых вместе с картиной мира радикально меняются идеалы и нормы доказательства, обоснования, объяснения, построения теории и т.д., а также ее философские основания [Степин, 2000]. Как правило, научная революция обоих типов связана «с качественными преобразованиями материальных средств наблюдения и экспериментирования, с новыми способами оценки и интерпретации эмпирических данных» [Степин, Порус, 2018].

Н.И. Кузнецова и М.А. Розов выделяют четыре типа научных революций [Кузнецова, Розов, 1991, С. 60-81.]. Первый тип связан с появлением новых фундаментальных теоретических концепций. Вторым – с разработкой или заимствованием новых методов исследований, которые часто приводят к смене проблем и стандартов научной работы. В качестве примера авторы приводят открытия микроскопа и телескопа. Третий тип вызван открытием новых объектов и явлений исследования, формирующих новый мир. Четвертый – изменением в стиле мышления, благодаря формированию новых методологических программ. В контексте настоящей статьи особый интерес представляют второй и третий типы научных революций.

Дискуссии о содержании и развитии термина «научные революции» достаточно обширна [Cohen, 1994; Stachel, Horne, Cohen, 1997; Holmes, 2000]. Однако настоящая статья выходит за рамки этой дискуссии. Для характеристики изменений, произошедших в квантовой физике в начале XX века, и в контексте их влияния на технологические инновации я буду использовать термин с более узким содержанием – *революционные*

трансформации в науке. Под такими трансформациями я буду понимать процессы радикальной перестройки оснований одной или нескольких наук, и, как следствие, большинства традиционных характеристик научного познания. Радикальность этих трансформаций заключается в перестройке картины мира, во введении новых и пересмотре содержания или даже в отказе от старых фундаментальных понятий и принципов. В результате такой перестройки создается новый язык, формулируются новые проблемы, происходит качественный пересмотр методов научного исследования.

Если ключевыми критериями научной инновации считать новизну и эффективность, то, учитывая масштаб новизны и эффективности революционных трансформаций в науке, их можно считать предельной формой любых инноваций в научном познании. Но, как и в случае обычных научных инноваций, признание или не признание той или иной научной деятельности в качестве революционных трансформаций всегда будет отложено во времени. На факт разнесения во времени стадий научной революции в концепции Б. Козна обращает внимание другой автор этого сборника Л.В. Шиповалова. На первой стадии ученые находят радикально новое решение проблемы, обнаруживают новый способ использования информации, устанавливают новые концептуальные рамки для существующего знания, задающие его иную интерпретацию. Возникающая научная новизна присутствует пока как частный, субъективный опыт. Затем происходят стадия публикации, стадия распространения и обсуждения новых идей в сообществе, и, наконец, стадия признания и практического применения [Шиповалова, 2018]. Добавлю, что признание научной ценности нового знания еще означает признание его революционности. Сначала научное сообщество постепенно признает конкретные научные результаты, а уже потом оценивает степень революционности трансформаций, приведших к этим результатам. В силу своего радикального характера и существенного отличия от убеждений основной части научного сообщества, признание революционных трансформаций в науке никогда не бывает однозначным и окончательным. Оно всегда сопровождается острыми дискуссиями и может растянуться на довольно длительное время.

Из истории науки мы знаем, что, несмотря на сохраняющиеся противоречия, необходимость революционных трансформаций в какой-то области науки постепенно признается, сначала частью авторитетных ученых, а затем и большинством научного сообщества в этой области. Новые понятия и принципы, новые свойства и абстрактные объекты, в том числе математические, входят в научный обиход, в статьи, дискуссии и темы исследований. Формулировки новых оснований науки включаются в университетские курсы и достаточно быстро становятся естественными для студентов и молодых ученых. Правда все перечисленное еще долго продолжает оставаться непривычным и даже «подозрительным» для старшего поколения, придерживающегося предыдущей картины мира. И вот уже в рамках новых оснований формулируются новые проблемы, возникают новые научные теории, начинают применяться новые экспериментальные и теоретические методы, в том числе методы обоснования и объяснения. Все вместе это стимулирует создание новых приборов, новых технологий и очень скоро новых продуктов. Рассмотрим этот процесс подробнее на примере квантовой физики.

К революционным трансформациям в физике всегда приводила работа людей, занимающихся именно физикой. Как показывает история этой науки, участвующие в революционных трансформациях ученые, использовали идеи, которые принято называть философскими или метафизическими. Как известно, каждая фундаментальная физическая теория имеет свою онтологию или свои философские основания, куда входят понятия, априорные постулаты, представления о реальности и причинности, свой язык, логику, способы проверки гипотез и так далее. Естественно предположить, что тем, кто пытается критически пересмотреть какую-либо фундаментальную теорию, бесполезно будет знать ее основания, а также обстоятельства возникновения и примеры их критического

анализа. Это знание помогает понять, чем кроме уравнений одна фундаментальная теория отличается от другой, и в чем ее сильные и слабые места. В конечном счете, подобное понимание может стимулировать интуицию ученого к выдвижению новых гипотез и построению новых моделей – самому неформализуемому этапу научного познания.

Обобщая историю физики, можно заметить, что онтологические (о сущности и о принципах устройства мира) и эпистемологические (о природе познания) концепции активно использовались учеными для нескольких целей.

1) Как аргументы для критики существующей физической картины мира и привычных методов ее познания. Ярким примером служит критика А. Эйнштейном постулатов механистической парадигмы, вдохновленная идеями И. Канта и Э. Маха.

2) Как эвристический инструмент для обоснования интуитивных гипотез, противоречащих представлениям, общепринятым в научном сообществе. Именно эту роль философии подчеркивал Р. Фейнман: «Некоторые говорят [...]: "Бросьте вы вашу философию, все эти ваши фокусы, а лучше угадывайте-ка правильные уравнения. Задача лишь в том, чтобы вычислять ответы, согласующиеся с экспериментом, и если для этого у вас есть уравнения, нет никакой нужды в философии, интерпретации или любых других словах". Это, конечно, хорошо в том смысле, что, занимаясь одними уравнениями, вы свободны от предрассудков и вам легче отгадывать неизвестное. Но, с другой стороны, может быть, именно философия помогает вам строить догадки» [Фейнман, 1987, с. 155].

3) Как способ объяснения результатов, которые были получены с помощью принципиально новых теорий, построенных на основании тех самых интуитивных гипотез. Например, нетрудно проследить, как создатели каждой из десятков интерпретаций квантовой механики явно или неявно использовали либо онтологические, либо эпистемологические аргументы.

4) Как средство выяснить, в какой степени научный метод рационально оправдан и в какой степени мы можем отделить субъективный и объективный вклады в наш опыт познания мира. По мнению А. Шимони [Shimony, 1998, Р. 177–184], именно эпистемология помогает физикам ответить на эти два вопроса.

Революционные трансформации в квантовой физике

В первой трети XX века в физике произошло несколько революционных трансформаций. В этот период были созданы специальная (1905) и общая (1915-1917) теории относительности, а также квантовая механика (1925 -1927). Квантовая теория оказалась необычайно успешной. Формализм позволял делать предсказания, которые подтверждались опытом и быстро превращались в новые технологии. Были зарегистрированы волновые свойства электронов, обнаружены предсказанные теорией частицы, объяснены свойства атомов, их строение и взаимодействие. Но тот же формализм требовал поистине революционных изменений в объяснении явлений, как минимум, квантовых. Революционность квантовой механики (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. Постулировались новые принципы познаваемости, наблюдаемости, дополнительности различных описаний, соответствия теорий, а также кардинально пересматривалась роль наблюдателя.

Здесь необходимо конкретизировать пункты, по которым КМ предлагала перестроить основания как классической механики, так и классической теории поля³.

1. Новый взгляд на делимость. Вместо непрерывных значений основных физических величин в теории рассматривались их минимальные величины (кванты).

2. Новый взгляд на сосуществование. В отличие от классической физики квантовая теория изучает не набор однозначных свойств объекта, которые можно измерить одновременно, а волновую функцию (вектор состояния, амплитуду вероятности), содержащую полную информацию обо всех возможных значениях свойств квантовой системы. Волновая функция содержит комплексные коэффициенты, которые относятся к возможным результатам наблюдений конкретной наблюдаемой величины. Считается, что до измерения эти возможные значения находятся в суперпозиции. Они как бы существуют вместе и даже интерферируют друг с другом. Поэтому до измерения в принципе невозможно определить, какими определенными свойствами обладает система. В этом заключается первое противоречие с классическим детерминизмом.

3. Новый взгляд на пространство. Оказалось, что суперпозицию возможных значений удобно изучать через действия операторов на волновые функции. Но не в 4-х мерном пространстве-времени, а в многомерном пространстве возможных состояний. Причем это, так называемое, Гильбертово пространство описывается не вещественными, а комплексными числами, а его размерность равна числу степеней свободы системы и может быть бесконечным.

4. Новый взгляд на взаимодействие. В теории допускается существование, так называемых, запутанных состояний индивидуальных квантовых объектов, которые можно анализировать только как единое целое. Причем это единство не зависит от их удаленности друг от друга. Вместо аксиомы «взаимодействие и информация не могут передаваться быстрее скорости света», между такими запутанными объектами допускаются мгновенные корреляции не только в пространстве, но и во времени. И это еще одно противоречие с классическим детерминизмом.

5. Новый взгляд на определенность значений физических величин. В результате наблюдения невозможно одновременно с одинаковой точностью измерить несовместимые или дополнительные друг другу свойства системы (принцип неопределенности Гейзенберга). Это уже третье противоречие с классическим детерминизмом.

6. Новый взгляд на измерение и наблюдение. До измерения волновая функция (а значит, и все возможные состояния системы) может изменяться во времени в соответствии с дифференциальным уравнением Шредингера. Как и уравнения классической физики, оно вполне детерминистическое и обратимо во времени. Но во время измерения квантовая система непредсказуемым образом переходит только в одно из своих возможных состояний. В Копенгагенской интерпретации этот разрыв заполняется с помощью проекционного постулата. Волновая функция с помощью оператора математически «проецируется» на возможные показания прибора с вероятностью, пропорциональной квадрату амплитуды вероятности каждого из членов суперпозиции (матрица плотности). Суперпозиция мгновенно превращается в смешанное состояние. Комплексная величина превращается в вещественную (собственное значение оператора). Проблема в том, что проекционный постулат не является ни объектом, ни процессом в пространстве-времени. Это только математическое правило, которое позволяет перейти от причинного описания квантовых явлений к вероятностному описанию результатов наблюдения. Как именно отбирается одна из возможностей, теория не описывает. Зато теория позволяет вычислить только вероятность каждого отдельного показания прибора (правило М. Борна). И эти вычисления прекрасно согласуются с экспериментом. В этом кроется еще одно несоответствие классическому детерминизму.

³Более подробное описание связи формализма квантовой механики с проблемами реальности см.: [Гринштейн, Зайонц, 2015].

Все перечисленные представления были принципиально новыми и тесно связанными с формализмом новой теории. Но далеко не все из них являлись аксиомами теории или следствиями из нее. Большинство формулировалось как эпистемологические и онтологические проблемы, требующие решения. Сама квантовая теория не давала готовых решений.

Начало дискуссии – а есть ли революционность?

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. Однако сам по себе формализм физической теории ничего не говорил о реальности описываемых им объектов (кванта действия, волновой функции, спина, квантовых операторов, Гильбертова пространства, запутанных состояний и т.д.) и их свойств до измерения. Задача теории ограничивалась непротиворечивым описанием и 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 искали аналогии из других, уже известных физических теорий. Например, классические аналогии с волнами, фазами, полями, интенсивностью излучения и статистической вероятностью. В процессе поиска таких аналогий и началась дискуссия о реальности объектов квантовой теории.

Эта дискуссия велась в форме соревнования между различными интерпретациями КМ, 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? Без ответа на эти вопросы трудно быть уверенным, что уравнения не случайно совпали с наблюдениями или не были под них подогнаны.

Сторонники разных точек зрения придумывали способы экспериментального подтверждения своей правоты. Часть из них были сформулированы в виде мысленных экспериментов, которые обычно апеллировали к принципу противоречия и здравому смыслу⁴. Однако, при текущем уровне экспериментальной базы эти эксперименты было невозможно реализовать. Поэтому, они представляли интерес для небольшого числа философски настроенных физиков, профессиональных философов и историков науки.

В первые годы создания квантовой теории среди физиков была популярна позиция привычного 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 его оппонентами.

Для большинства физиков-теоретиков вопрос о пересмотре взглядов на новые объекты и новые свойства квантовой теории не имел принципиального значения. По мере роста числа экспериментальных подтверждений теории и усложнения ее математического аппарата, среди теоретиков стала набирать популярность Копенгагенская интерпретация.

⁴ Например, А. Эйнштейн с соавторами в ЭПР-парадоксе доказывали, что квантовая теория или неполна, или нелокальна. Э. Шредингер использовал образ кота, чтобы показать, что квантовая теория в изложении Н. Бора и В. Гейзенберга неполна без описания механизма наблюдения-измерения. Позже Дж. Уилер в мысленном эксперименте с отложенным выбором пытался показать, что до наблюдения фотон не имеет ни определенного свойства (волна или частица), ни определенной траектории.

Ведь она предлагала хоть какое-то рациональное объяснение странных свойств квантовых объектов.

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 необходимость 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 постепенно перестало быть особой проблемой, а дискуссии о реальности волновой функции обычно объявлялись философскими и не имеющими отношения к настоящей физике. Любые гипотезы о реальности квантовых объектов (например, волновая механика Шредингера или Бомовская механика) считались маргинальными.

В свою очередь, те, кто не хотел разбираться в тонкостях философских споров сторонников и противников Копенгагенской интерпретации, нашли успокоение в прагматической позиции: не нужно задумываться о смысле квантовых уравнений, достаточно того, что они хорошо предсказывают⁵.

Подобный способ отгородиться от дискуссии, связанной с объяснением и пониманием, называется *инструментализм* – это эпистемологическая установка о предназначении научных теорий, развитая сторонниками позитивизма. В отличие от физикализма⁶, инструментализм в принципе отказывается от обсуждения реальности ненаблюдаемых объектов научных теорий, поскольку эти объекты сами по себе не имеют значения. Физическая теория вообще не должна ничего объяснять (многим ученым такое утверждение покажется странным). Ведь любое объяснение и любое представление о реальности зависит от занятой метафизической позиции. Поэтому будет легче заявить, что теория – «это система математических положений, выведенная из небольшого числа принципов, имеющих целью выразить возможно проще, полнее и точнее цельную систему экспериментально установленных законов» [Дюгем, 1910, С. 25].

Таким образом, несмотря на философские дискуссии между основателями квантовой теории, начиная с середины 30-х годов прошлого века в квантовой физике доминировали физикализм и инструментализм. В каком-то смысле инструменталистскую позицию

⁵ Д. Мермин назвал эту позицию «заткнись и считай» применительно к Копенгагенской интерпретации, что не совсем верно, так как она все-таки предлагала свои решения квантовых парадоксов и свое понимание квантовой реальности. 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 неудобно, раздражались или скучали [Mermin, 1989].

⁶ *Физикализм* — лингвистический тезис, пришедший из *логического позитивизма*. Отрицает метафизику и постулирует, что любое истинное утверждение синонимично какому-то физическому утверждению. Только физика в союзе с логикой — единственный надежный источник знаний о природе, а значит, онтология физики эквивалентна всей онтологии и всей метафизике.

первоначально занимал и Н. Бор, когда говорил, что целью квантовой механики является вовсе не описание квантовой реальности, а лишь согласование предсказаний с экспериментальными данными. Однако очень быстро естественное для физика желание объяснить, что скрывается за формализмом создаваемой теории, вынудило и Бора, и Гейзенберга включиться в дискуссию по поводу реальности квантовых объектов и механизма возникновения наблюдаемой классической реальности. В результате сформировалась Копенгагенская интерпретация, которую многие до сих пор отождествляют со всей квантовой механикой.

Позже Бор и Гейзенберг, защищаясь от обвинений в позитивизме, уточнили свое мнение о реальности. В беседах с Фоком Бор уже полностью признавал объективность свойств атомных объектов [Фок, 1957]. Гейзенберг даже стал разделять термины «физически реальное» (то, что существует в 3-х мерном пространстве) и «объективное» (то, что не зависит от субъекта). Вслед за Аристотелем он писал об «объективной» физической реальности, связанной с понятием возможности («потенции») [Гейзенберг, 1958, С. 24]. Затем он уточнял, 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]. В другом месте Гейзенберг уже ссылается на Платона, в соответствии с убеждениями которого, «если мы будем разделять материю все дальше и дальше, мы, в конечном счете, придем не к мельчайшим частицам, а к математическим объектам, определяемым с помощью их симметрии, платоновским телам и лежащим в их основе треугольникам» [Гейзенберг, 1975, С. 88]. В. А. Фок во многом разделял философскую позицию Гейзенберга, следующую метафизике Аристотеля, и даже подчеркивал, что требуется разработка «ряда философских вопросов, в особенности вопросов, связанных с анализом акта познания. Вопросы эти возникают [...] в связи с необходимостью рассматривать вероятность как фундаментальное понятие и отличать потенциально возможное от осуществившегося» [Фок, 1957].

В течение нескольких десятилетий развития квантовой физики благодаря использованию принципиально новых теоретических и экспериментальных методов (тех самых научных инноваций) были получены результаты, приведшие к множеству инноваций уже в технологиях. Достаточно упомянуть атомное оружие; атомную энергетику; сверхпроводники; лазеры; полупроводники, впоследствии приведшие к созданию интегральных микросхем, компьютеров, Интернета, оптоволоконной и мобильной связи, медицинских технологий и многого другого. Условно все это можно назвать первым инновационным скачком в экспериментальной физике и в технологиях или ПЕРВОЙ КВАНТОВОЙ РЕВОЛЮЦИЕЙ. Революция эта продолжается до сих пор и, похоже, что ее потенциал далеко не исчерпан.

В ходе первой квантовой революции основным объектом исследования и технического манипулирования были молекулы, атомы, группы частиц и их наблюдаемые свойства. Неудивительно, что почти все отличия квантовой механики от классической физики представлялись не имеющими отношения к реальным объектам и их свойствам, а связывались только с нашим знанием о них, полным или неполным. Исключение составлял лишь новый взгляд на делимость, точнее на дискретность физических величин на квантовом уровне (квантованность). В этот период распространилось стойкое убеждение, что именно дискретность составляет основную особенность квантовых объектов. А значит, «квантовыми» можно называть любые свойства или явления, проявляющие дискретность и описываемые формализмом квантовой теории. Например, ко всему, что связано с полупроводниками или лазерами, можно добавлять термин «квантовое». Тем не менее, если быть точным, понятие «квантовый» следует использовать для единичных объектов, поведение которых подчиняется и всем остальным особенностям квантовой механики, которые здесь уже были подробно описаны. Это и существование возможных состояний в суперпозиции, и отсутствие определенных

величин до измерения, и фундаментальная причинная неопределенность, и роль окружения (в том числе приборов и наблюдателя) при измерении, и нелокальные корреляции между запутанными состояниями.

Реально или не реально – вот в чем вопрос?

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 соответствуют 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. Лэдман, 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.

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).

Рассмотрим пример дискуссии о реальности основного объекта квантовой теории – волновой функции. 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.

Полагаю, что современный ретроспективный анализ 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 анти-реализмом в отношении квантовых объектов. Такая же альтернатива возможна и для реализма по отношению к квантовой теории. Подробно об этом писал Хакинг.

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 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» «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 полную информацию 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 анти-реализм* (или *квантовый дуализм*) 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 (анти-реализм по отношению к теории), ни в какую-либо реальность волновой функции (анти-реализм 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 анти-реализм* (или *квантовый дуализм*), представленный Копенгагенской интерпретацией, интерпретациями Дж. фон Неймана, Ю. Вигнера, раннего Дж. Уилера (позже он стал ближе к квантовым реалистам), 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 же⁷.

Квантовый анти-реализм предполагает, что формализм КМ полон, то есть 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 в духе инструментализма, что целью КМ является вовсе не описание квантовой реальности, а лишь согласование предсказаний с экспериментальными данными.

Чтобы совместить второе утверждение с полнотой теории, придется признать, что до измерения не имеет смысла говорить о какой-либо реальности, ни о квантовой, ни о классической. Как будто есть только наше субъективное знание, его-то и описывает волновая функция. Недаром сторонники пси-эпистемического подхода часто разделяют

⁷ Термин Копенгагенская интерпретация довольно размыт. По сути, это набор не всегда согласующихся друг с другом утверждений, высказанных разными физиками. Например, см. [Гриб, 2013].

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 анти-реализм по отношению к квантовым состояниям до измерения, но реализм по отношению к квантовым частицам после измерения⁸. 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 соответствует реальному физическому процессу, а является лишь математическим приемом⁹.

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 пси-эпистемологической точке зрения, согласно которой одно и то же реальное физическое состояние может быть совместимо с различными квантовыми состояниями. 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.

Еще раз подчеркну, все сказанное относится не к утверждениям квантовой теории, а к ее Копенгагенской интерпретации в рамках квантового анти-реализма (или *квантового дуализма*).

⁸ Как было отмечено в предыдущем параграфе, и Бор, и Гейзенберг позже полностью признавали объективность свойств атомных объектов. Поэтому название *квантовый анти-реализм* верно только отчасти, применительно к формализму квантовой теории, а не к микрообъектам. Поэтому, более удачным был бы термин *квантовый дуализм*.

⁹ Хотя, как было замечено ранее, для В.А. Фока и В. Гейзенберга этот скачок в каком-то смысле представлялся объективным процессом «перехода от возможного к действительному», причем переход вызывает не наблюдатель, а нарушение изолированности системы.

Экспериментальная метафизика – как это возможно?

Новый этап дискуссий о реальности объектов квантовой теории начался после того, как в 1964 году Дж. Белл опубликовал свои знаменитые неравенства. С их помощью он надеялся в опыте проверить мысленный ЭПР-эксперимент и тем самым доказать реальность квантовых состояний, хотя бы и в нелокальной в версии интерпретации Д. Бома [Bell, 1987]. В 70-80-х годах прошлого века, благодаря развитию технологий и экспериментальной базы появилась возможность приготавливать стабильные одиночные и запутанные квантовые состояния, изучать их поведение и манипулировать ими еще до измерения классическими приборами. Одно это возродило интерес к проблемам природы квантовых объектов и способов их изучения.

Научное любопытство экспериментаторов заставило их придумывать различные схемы использования неравенств Белла для проверки мысленного ЭПР-эксперимента с одиночными квантовыми системами [Гриб, 1984]. Эксперименты показали, что сохранить одновременно и реализм и локальность классического реализма невозможно. Надо или признать существенно вероятностное поведение даже отдельно взятой частицы и отсутствие скрытых параметров, или приписать частицам скрытые параметры, признав при этом возможность нелокальной коммуникации между ними. В первом случае мы сохраняем локальность, жертвуя реализмом, во втором — сохраняем реализм, отказавшись от локальности.

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 КМ¹⁰. С другой стороны, в это время в философии науки активизировались критики инструментализма и всех форм позитивизма, постепенно возрождался интерес к философским основаниям науки (К. Поппер, Т. Кун, И. Лакатос и др.), формировались концепции научного реализма (Дж. Сمارт, Р. Бойд, Х. Патнэм и др.), о которых уже было сказано выше. В ответ на критику инструментализма анти-реалисты выдвинули новые аргументы. Достаточно упомянуть исторический релятивизм (Т. Кун, П. Фейерабенд, Л. Лаудан) и конструктивный эмпиризм (Б. Ван Фраассен).

Начиная с 90-х годов дискуссия между тремя подходами к реальности квантовых состояний и их необычных свойств окончательно перешла в лаборатории. Возник даже термин «экспериментальная метафизика» [Stachel, Horne, Cohen, 1997]. Философские дискуссии возобновились с новой силой [Albert, 1994; D'Espagnat, Scalettar, 1995; Healey, 1991; Maudlin, 2011]. А эксперименты снова подтверждали предсказания квантовой теории. Например, для проверки возможности сохранить реализм свойств квантовых объектов до измерения, пожертвовав локальностью, были сформулированы неравенства Леггетта. Если бы они соблюдались, то, возможно, квантовые объекты все-таки имеют определенные свойства до измерения, при условии, что они могут организовать мгновенные корреляции друг с другом. Однако в экспериментах 2007 и 2010 годов неравенства Леггетта нарушались, а это означает, что мгновенного влияния недостаточно для объяснения запутанности, и значит, отказ от локальности не решает проблемы. Нужно отказаться, по крайней мере, от наивного реализма, что у частицы есть определенные свойства, не зависящие от наблюдений. Кстати, недавняя экспериментальная проверка других неравенств Леггетта—Гарга (их иногда называют временными неравенствами Белла), подтвердила принципиальную невозможность свести эволюцию не только фотонов, но атомов к движению по какой-либо определенной траектории. Мы всегда

¹⁰ Б. ДеВитт возродил интерпретацию Х. Эверетта, назвав ее многомировой. Позже были сформулированы интерпретации согласованных историй, транзакционная, модальная, объективного коллапса и ряд других.

имеем дело с суперпозицией многих траекторий.

Сильным аргументом в пользу квантового реализма явились эксперименты, где наблюдалась интерференция не только частиц, но и макромолекул [Juffmann et al., 2012.]. Ведь если квантовая теория работает для макрообъектов и является фундаментальной теорией, то ее выводы о существовании могут быть верны и для классических явлений.

Чтобы доказать, что до наблюдения фотон не имеет ни определенного свойства (волна или частица), ни определенной траектории, Уилер предложил эксперимент с «отложенным выбором» [Wheeler, 1984]. В отличие от двух-щелевого эксперимента, детекторы ставятся не у щелей, а после того, как фотон пролетел через них – непосредственно перед вторым экраном. Ряд экспериментов, проводимых последнее десятилетие подтвердили предсказания квантовой теории [Manning et al., 2015].

В эксперименте с квантовым отложенным выбором [Peruzzo et al., 2012] удалось наблюдать, как фотон проявил себя одновременно и как волна, и как частица. Более того, он плавно переходил от одного проявления к другому. А как известно, понятие дополненности этих несовместимых между собой аспектов – одно из центральных в стандартной Копенгагенской интерпретации.

Веским аргументом в пользу квантового реализма можно считать эксперименты с квантовым ластиком [Ma, Kofler, Zeilinger, 2014]. Вместо того чтобы наблюдать, через какую щель (каким путем) прошли фотоны, тем самым влияя на них, можно «пометить» их информацией с помощью вспомогательных запутанных фотонов. Когда основные фотоны промаркированы, интерференционная картина исчезает, но если после прохождения фотонов через щели информацию об их пути стереть, интерференционная картина появится вновь. Создается впечатление, что квантовые свойства не исчезают безвозвратно после измерения, а смешанное состояние можно снова превратить в суперпозицию. В других экспериментах можно было сначала зарегистрировать фотон, а уже потом решать, как он должен себя вести. Причем физическая локальная связь между выбором наблюдателя и интерференцией исключается. И вновь была продемонстрирована нелокальность не только в пространстве, но и во времени.

Таким образом, классический реализм постепенно оказался в роли обороняющегося, а активность его сторонников свелась к поиску возможных лазеек в схемах экспериментов и противоречиях в интерпретациях их результатов. Их оппоненты, в свою очередь, придумывали все новые и новые эксперименты для устранения этих лазеек и для проверки предсказаний квантовой теории.

Все проводимые эксперименты подтверждали свойства квантовых объектов, следующие из математического формализма теории. На этом основании многие противники классического реализма стали утверждать, что эксперименты окончательно опровергли его утверждения о том, что свойства квантовых объектов локальны, существуют до наблюдения и независимы от него. Хотя, как это часто случалось в истории физики, сами по себе эксперименты для многих ученых не являются достаточным основанием для отказа от привычных представлений о реальности. Основная конкуренция сегодня происходит между квантовым реализмом и квантовым анти-реализмом. Первый уже давно перестал быть маргинальным, а позиции Копенгагенской интерпретации сильно пошатнулись [Reich, 2011]. При этом многие ее сторонники не знают об этом просто потому, что не в курсе результатов перечисленных здесь экспериментов.

Можно предположить, что конкуренция между квантовым анти-реализмом и квантовым реализмом будет продолжаться до тех пор, пока мы не поймем, как возможные состояния из суперпозиции переходят сначала в смешанное состояние, а затем в одно из наблюдаемых? А также, почему разложение возможных состояний зависит от знания и выбора наблюдателя? И, что означает пространственно-временная нелокальность квантовых корреляций?

Вдохновленные впечатляющими успехами экспериментальной метафизики, сторонники квантового реализма продолжали предлагать новые интерпретации КМ¹¹. 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.

К концу прошлого века накопился большой объем новых данных благодаря экспериментам, проводимых первоначально исключительно в рамках дискуссии о реальности квантовых объектов. Эти результаты неожиданно оказались востребованы при создании новых технологий. Их потенциальная эффективность и привлекательность для рынка оказалась важнее, чем теоретические споры о реальности объектов теории, с помощью которой эти технологии могут создаваться. В крупнейших научных центрах начали проводиться квантовые эксперименты и создаваться технологии, уже никак не связанные с проблемами реализма¹². Зачастую эти проблемы даже не формулировались. Экспериментаторам и инженерам было не обязательно быть в курсе проблем реальности, которые послужили стимулом для экспериментов на предыдущих этапах. Важнее для них было успеть раньше конкурентов использовать потенциальную новизну и эффективность технологических инноваций.

В первую очередь инновации касались технологий передачи и обработки информации, в том числе квантовой криптографии и квантового компьютера. Особые свойства квантовых состояний могли быть также использованы в квантовых часах, квантовых датчиках, в новых методах когнитивных наук, в создании искусственного интеллекта и так далее. По сути, начался второй инновационный скачок в экспериментальной физике и технологиях. Началась, так называемая, **ВТОРАЯ КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ**. Этот термин недавно стали использовать для характеристики существенных отличий современной экспериментальной и технологической революции, вызванной развитием квантовой теории. Как было сказано выше, 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 состоянии суперпозиции, а также сложными системами в запутанном состоянии. Именно эти новые навыки стимулировали вторую квантовую революцию¹³.

¹² Сегодня центры квантовых технологий и квантовой информации действуют в большинстве крупнейших университетов мира. Наиболее известные из них находятся в Канаде, Австрии, США, Великобритании и Германии. Собственные центры созданы в корпорациях Google, IBM, Intel и Microsoft.

¹³ О термине «вторая квантовая революция» см. [Dowling, Milburn, 2003]. Подробное описание новых технологий в рамках второй квантовой революции приводится в «Квантовом Манифесте Европы» (2016) [<https://ec.europa.eu/futurium/en/content/quantum-manifesto-quantum-technologies> (дата обращения: 01.05.2018)].

С началом второй квантовой революции взгляд на проблемы, которые раньше считались философскими, изменился и стал скорее прагматичным. Теперь «загадочные черты квантовой механики рассматриваются как ресурс, который нужно развивать, а не проблема, которую нужно решить» [Bub, 2000]. Сегодня «задним числом» можно утверждать, что революционные трансформации, произошедшие в физике в начале XX века, к концу столетия начали приносить новые плоды. Для инженеров уже не стоит вопрос, существует ли суперпозиция квантовых состояний или нет. Квантовые вычисления и другие манипуляции уже происходят в этой самой суперпозиции (не в классических битах, а в кубитах). В наши дни идет гонка за квантовое превосходство, цель которого – создание многокубитных устройств для вычислений, невозможных на классическом компьютере. Но для этого необходимо решить ряд чисто технических задач: увеличить число кубитов, оградить их от влияния окружающей среды и увеличить время жизни каждого кубита, а значит и время хранения квантовой информации. Но, главное, уменьшить процент ошибок.

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 дополнительную 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 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 приёма. Благодаря такой квантовой телепортации можно существенно увеличить расстояние передачи информации и ее секретность. Примечательно, что тех, кто реализует эту технологию не смущает, что сторонники классического реализма отрицают сам возможность существования явления квантовой запутанности и любых нелокальных свойств.

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 его идея в том, что процесс вычисления происходит в состоянии суперпозиции (в кубитах), 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?

В попытках найти ответ на последний вопрос особенно обострился спор квантового реализма и квантового анти-реализма. 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 [Bub, 2004]. В рамках компромисса между классическим и квантовым реализмом продолжается дискуссия о реализме в его нелокальной версии. А совсем 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].

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.

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.

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.

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, P. 475]. 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, P. 157]. 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 et al., 2015, P. 249].

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.

Заключение

Даже беглый исторический обзор показывает, что эволюция взглядов на природу объектов квантовой теории подчиняется определенной логике. В момент создания теории, когда ее объекты и принципы только формировались, было необходимо разнообразие взглядов на реальность новых, еще слишком непривычных объектов. Острая, иногда чисто философская дискуссия способствовала прояснению основных положений новой теории. Но когда основной концептуальный каркас теории был сформирован, наступил длительный этап развития математического аппарата и экспериментальных проверок.

Из-за того, что сразу не получилось совместить квантовую теорию с классическим реализмом господствующей парадигмы, на первом этапе более эффективным оказался инструменталистский подход по отношению к теории. Дискуссии реалистов и анти-реалистов померкли на фоне потрясающих успехов новой теории. Но чем более успешной оказывалась квантовая теория, тем сложнее было уклоняться от подобных дискуссий. А поскольку долгое время аргументов в пользу квантового реализма почти не было, быстро усилились позиции квантового анти-реализма (квантового дуализма) по отношению к объектам квантовой теории. Причудливым образом этот подход совмещался с реализмом по отношению к классическим объектам. Все вместе это называлось версиями Копенгагенской интерпретации.

В принципе, не трудно объяснить, почему онтологические и эпистемологические проблемы в оценке способов существования и познания ненаблюдаемых объектов вынуждают многих физиков-теоретиков становиться анти-реалистами. Простота и практическая направленность такого подхода с его отказом от объяснения всегда будут гарантировать ему популярность в науке. Даже, несмотря на его внутреннюю противоречивость. Сегодня этот подход продолжает успешно развиваться, например, в концепциях релятивизма и конструктивного эмпиризма.

Одновременно, особенно в последние десятилетия, как только позволяла экспериментальная база, физики стремились снова и снова проверить аргументы сторонников разных взглядов на реальность ненаблюдаемых объектов. Сегодня многие 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 вовсе не являются достаточным основанием для отказа от привычных представлений о реальности. Классическая парадигма не собирается сдавать позиции в умах своих сторонников, которые, наверняка будут изобретать новые лазейки в экспериментах и требовать более 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 анти-реализмом. 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, благодаря которой любые пси-эпистемологические модели могут быть исключены или ограничены [Briggs, Butterfield, Zeilinger, 2013].

Как было показано выше, многочисленные эксперименты в рамках экспериментальной метафизики привели ко второй квантовой революции в технологиях, где квантовые объекты используются так, как будто они существуют в форме, предсказанной теорией. Удивительным образом дискуссия, спровоцированная революционными трансформациями в квантовой физике, привела к технологическим инновациям, которые невозможно было даже представить в первые десятилетия развития

квантовой физики. Они просто не укладывались ни в одну из доминирующих в то время парадигм – ни в парадигму Эйнштейна, ни в парадигму Бора. Сегодня эти технологии сами становятся аргументом в этом споре, чаще всего в пользу квантового реализма. Более того, уже невозможно представить, чтобы дискуссия о реалистичности моделей квантовой теории и реального существования объектов этих моделей игнорировала работающие прототипы квантовых технологий [Whitaker, 2012].

Резюмируя, можно констатировать, что кардинальная перестройка оснований квантовой физики в первой четверти XX века, выразившаяся в новых взглядах на реальность объектов теории, привела к созданию новых технологий в начале XXI века. А значит, влияние революционных трансформаций на инновации может быть отложено на довольно длительный срок и «ожидать своего часа».

По сути, можно говорить о подтверждении выводов другого автора настоящего сборника Л.В. Шиповаловой. Она формулирует несколько уроков инновационности. Один урок состоит в том, что любая новация будет таковой, если ученые ее производящие будут способны на формирование поддержки не только в сообществе таких же ученых, но и людей, занимающихся практическим применением в технологиях и потенциальных потребителей этих технологий. Другой урок говорит, что для возникновения значимого нового знания в науке необходимо обращение к прошлому, к традиции, поскольку благодаря этому научное сообщество может «из современности определить тот или иной научный жест как революционный» [Шиповалова, 2018].

Сделаю еще один, возможно, не совсем очевидный вывод. Опираясь на пример квантовой физики, можно предположить, что сам факт признания или не признания научным сообществом революционных трансформаций в основаниях конкретной научной области влияет на эффективность научных исследований в этой области. С другой стороны, только при определенном уровне развития технологий у специалистов может возникать потребность в новых понятиях и принципах, в новых методах исследования и объяснения, в новой научной картине мира и даже в новых взглядах на реальность. Это значит, что чем быстрее экспериментаторы, а затем инженеры станут реалистами по отношению к объектам квантовой теории, тем быстрее будут происходить инновации в квантовых технологиях. Причем в разных технологиях в качестве реальных могут приниматься совсем разные объекты: волновая функция, калибровочные бозоны, кубиты, операторы квантового поля и так далее.

Все сказанное 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 в будущем 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 очередные революционные трансформации не только в физике, но также в биологии и когнитивных науках.

Литература

- Гейзенберг В. Развитие интерпретации квантовой теории // Нильс Бор и развитие физики / под ред. В. Паули. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
- Гейзенберг В. Развитие понятий в физике XX столетия // Вопросы философии. 1975. № 1.
- Гриб А. А. К вопросу об интерпретации квантовой физики // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. №12. С. 1337-1352.
- Гриб А. А. Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // Успехи физических наук. 1984. Т. 142. № 4. С. 619-634.

- Гринштейн Д., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. М.: Интеллект, 2008. 400 с.; Иванов М. Г. Как понимать квантовую механику. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2015. 552 с.
- Дойч Д. Структура реальности. Наука параллельных вселенных. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 460 с.
- Дюгем П. Физическая теория. Ее цель и строение. СПб., 1910.
- Клышко Д. Н. Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. №9. С. 975–1015.
- Князева Е. Н. От открытия к инновации: синергетический взгляд на судьбы научных открытий // Эволюция, культура, познание / отв. ред. И. П. Меркулов. М.: ИФ РАН, 1996.
- Крючкова С. Е. Инновации: философско-методологический анализ: дисс. ... д. филос. н. М., 2001. 296 с.
- Кузнецова Н. И., Розов М. А. О разнообразии научных революций // Традиции и революции в истории науки / отв. ред. П. П. Гайденко. М.: Наука, 1991.
- Максвелл Г. Онтологический статус теоретических сущностей // Философия науки. 2005. №1 (24). С. 20-48.
- Стёпин В. С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-традиция, 2000. 744 с.
- Стёпин В. С., Порус В. Н. Научная революция [Электронный ресурс] // Гуманитарные технологии. URL: <https://gtmarket.ru/concepts/6961> (дата обращения: 01.07.2018).
- Терехович В. Э. Модальные подходы в метафизике и квантовой механике // Метафизика. 2015. №1. С. 129-152.
- Терехович В. Э. Революционные трансформации в квантовой физике и инновации в квантовых технологиях // Манускрипт. 2018. №11. С. 119-125.
- Терехович В. Э. Три подхода к проблеме квантовой реальности и вторая квантовая революция // Epistemology & Philosophy of Science / Эпистемология и философия науки. 2019. Т. 56. № 1. С. 169-184.
- Терехович В. Э. Реальность волновой функции и манипулятивный аргумент // Метафизика. 2019. №1(31). С. 155-165.
- Терехович В.Э. Действительно ли философия слишком важна для физики, чтобы оставлять ее на откуп философам? // Метафизика. 2020. № 1(35). 8-29.
- Фейнман Р. КЭД - странная теория света и вещества. М.: АСТ, 2014. 191 с.
- Фейнман Р. Характер физических законов / пер. с англ. М.: Наука, 1987.
- Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 3: Излучение. Волны. Кванты. М.: Мир. 1965. 238 с.
- Фейнман Р., Хибс А. Квантовые интегралы по траекториям. М., 1968. 384 с.
- Фок В. А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. 1957. Т. 62. № 8. С. 461–474.
- 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 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.

- Шиповалова Л. В. Научная революция-разрыв с прошлым или его возобновление? О двусмысленном ответе современной историографии // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2018. № 45.
- Шиповалова Л. В. Научная революция-разрыв с прошлым или его возобновление? О двусмысленном ответе современной историографии // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2018. № 45.
- Экономика и право: энциклопедический словарь Габлера / пер. с нем. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 432 с.
- Albert D. Quantum Mechanics and Experience. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994. 206 p.
- Bell J. S. Speakable and unspeakable in quantum mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 290 p.
- 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. 20130299.
- Bub J. Indeterminacy and entanglement: the challenge of quantum mechanics // The British Journal for the Philosophy of Science. 2000. Vol. 51. № 4. P. 597-615.
- 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.
- Cohen H. F. The scientific revolution: a historiographical inquiry. Chicago: University of Chicago Press, 1994. 680 p.
- D'Espagnat B., Scalettar R. Veiled reality: an analysis of present-day quantum mechanical concepts // Physics Today. 1995. Vol. 48. № 7.
- 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.
- Edison H., Bin A. N., Torkar R. Towards innovation measurement in the software industry // Journal of Systems and Software. 2013. Vol. 86. № 5. P. 1390-1407.
- Experimental Metaphysics. Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony: in 2 vols. / ed. by J. J. Stachel, M. Horne, R. S. Cohen. Dordrecht: Kluwer, 1997. Vol. 1. 262 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. pp. 113-134.
- 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.
- Healey R. The philosophy of quantum mechanics: an interactive interpretation. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 288 p.
- Holmes F. L. The "Revolution in Chemistry and Physics": Overthrow of a Reigning Paradigm or Competition between Contemporary Research Programs? // Isis. 2000. Vol. 91. № 4. P. 735-753.
- Juffmann T. et al. Real-time single-molecule imaging of quantum interference // Nature nanotechnology. 2012. Vol. 7(5), P. 297-300.
- Ma X., Kofler J., Zeilinger A. Delayed-choice gedanken experiments and their realizations // arXiv preprint arXiv:1407.2930. 2014.
- Manning A.G. et al. Wheeler's delayed-choice gedanken experiment with a single atom // Nature Physics. 2015. Vol. 11, P. 539-542.
- Maudlin T. Quantum non-locality and relativity: Metaphysical intimations of modern physics. Singapore: John Wiley & Sons, 2011. 314 p.
- Mermin N. D. What's Wrong with this Pillow? Physics Today. 1989. Vol. 42(4)., p. 9.

- Peruzzo A. et al. A quantum delayed-choice experiment // Science. 2012. Vol. 338(6107). p. 634-637.
- Pusey M. F., Barrett J., & Rudolph T. On the reality of the quantum state. Nature Physics. 2012. Vol. 8(6).
- Reich E. S. Quantum theorem shakes foundations // Nature. 2011. Vol. 201. № 1.
- Reich, E. S. A boost for quantum reality. Nature. 2012. Vol. 485(7397).
- Ringbauer M. et al. Measurements on the reality of the wavefunction. Nature Physics. 2015. Vol. 11(3).
- Shimony A. The Relationship between Physics and Philosophy // Philosophies of Nature: The Human Dimension. Springer, Dordrecht, 1998.
- Wheeler J.A. Quantum Theory and Measurement / Eds. J.A. Wheeler and W.H. Zurek, 1984. P. 182-213.
- Whitaker A. The new quantum age: from Bell's theorem to quantum computation and teleportation. Oxford: Oxford University Press, 2012. 408 p.; Zeilinger A. Dance of the photons: from Einstein to quantum teleportation. N. Y.: Macmillan, 2010. 305 p.