

<https://doi.org/10.30853/manuscript.2018-11-1.25>

Терехович Владислав Эрикович

РЕВОЛЮЦИОННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ И ИННОВАЦИИ В КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Статья посвящена анализу истоков второй квантовой технологической революции, связанной с передачей и обработкой квантовой информации. Цель исследования: описать, как кардинальная перестройка оснований квантовой физики в первой четверти XX века привела к созданию технологических инноваций в начале XXI века. В первой части работы уточняются понятия научных инноваций и революционных трансформаций в науке, а также дается характеристика основных отличий квантовой механики от классической физики. Во второй части аргументируется утверждение, что вторая квантовая революция была подготовлена в процессе экспериментальной проверки разных взглядов на реальность объектов квантовой теории и способов их познания.

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/9/2018/11-1/25.html

Источник

Манускрипт

Тамбов: Грамота, 2018. № 11(97). Ч. 1. С. 119-125. ISSN 2618-9690.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/9.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/9/2018/11-1/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: hist@gramota.net

УДК 167:[530.145.82+530.145.61:004.9]
<https://doi.org/10.30853/manuscript.2018-11-1.25>

Дата поступления рукописи: 05.08.2018

Статья посвящена анализу истоков второй квантовой технологической революции, связанной с передачей и обработкой квантовой информации. Цель исследования: описать, как кардинальная перестройка оснований квантовой физики в первой четверти XX века привела к созданию технологических инноваций в начале XXI века. В первой части работы уточняются понятия научных инноваций и революционных трансформаций в науке, а также дается характеристика основных отличий квантовой механики от классической физики. Во второй части аргументируется утверждение, что вторая квантовая революция была подготовлена в процессе экспериментальной проверки разных взглядов на реальность объектов квантовой теории и способов их познания.

Ключевые слова и фразы: инновации; научные революции; интерпретации квантовой механики; реализм; анти-реализм; вторая квантовая революция; квантовые технологии.

Терехович Владислав Эрикович, к. филос. н.
Санкт-Петербургский государственный университет
v.terekhovich@gmail.com

РЕВОЛЮЦИОННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ В КВАНТОВОЙ ФИЗИКЕ И ИННОВАЦИИ В КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

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».

1. Введение

Хорошо известно, что инновации в науке ведут к инновациям в производстве. Формулировка новых научных теорий, возникновение новых экспериментальных и теоретических методов стимулируют создание нового экспериментального оборудования, а затем новых технологий и продуктов. В этой статье исследуется другой, гораздо менее очевидный вопрос – могут ли новые фундаментальные понятия, новые принципы, новые представления о мире и его познании, возникшие в рамках одной из наук, непосредственно стимулировать проведение новых экспериментов и создание новых технологий? Иначе говоря, может ли сама по себе революционная трансформация оснований, в том числе философских, какой-либо науки оказать прямое влияние на структуру и динамику инновационной деятельности не только в этой науке, что вполне предсказуемо, но и в областях сугубо практических? На примере квантовой физики будет показано, что ответ на этот вопрос может быть утвердительным, причем влияние революционных трансформаций в науке на другие инновационные процессы может быть отложено на довольно длительный срок.

В последнее десятилетие в обиход вошел термин «*вторая квантовая революция*». Его стали использовать для описания перехода от первой квантовой революции в экспериментальной физике и технологиях, когда научились манипулировать не только атомами, группами частиц и их наблюдаемыми свойствами, но и индивидуальными квантовыми объектами в состоянии суперпозиции, а также сложными системами в запутанном состоянии¹.

Основное утверждение статьи состоит в том, что вторая квантовая технологическая революция начала XXI века была подготовлена попытками экспериментальной проверки разных взглядов на реальность объектов квантовой теории, а также роли наблюдателя в их превращении в классические объекты.

2. Научные инновации и революционные трансформации в науке

Для обоснования утверждения, что перестройка оснований какой-либо науки может непосредственно влиять на инновационные процессы в других сферах человеческой деятельности, необходимо предварительно 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.

¹ Подробное описание второй квантовой революции приводится в «Квантовом Манифесте Европы» (2016) [22]. Начиная с 2010 года, правительства Великобритании, Нидерландов, Китая, Сингапура и других стран в рамках второй квантовой революции начали создавать национальные программы для внедрения новых квантовых технологий.

² Приведем 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 [18]. Инновация – это результат инвестирования в разработку получения нового знания по обновлению сфер жизни людей и последующий процесс внедрения с фиксированным получением дополнительной ценности [12]. Обзор дискуссии, связанной с понятием инновации, см. в работе [6].

В философской литературе проблема научных инноваций обычно рассматривается как проблема перехода от одной научной традиции к другой. Причем инновации считаются порождением традиции научного исследования [7]. И хотя цель научного познания по определению состоит в получении нового достоверного знания о мире и человеке, не любое научное познание подходит под понятие «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 т.д. Новые теоретические методы включают: новые методы вычислений; новые 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, и 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 завершеному, внедренному 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 непризнание степени ее инновационности всегда отложено во времени и происходит как бы «задним числом». Более подробный анализ причин, почему не всякое научное открытие становится инновацией, можно найти в работе Е. Н. Князевой [5].

Таким образом, 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 науки, парадигмы, научно-исследовательские программы или основания науки под давлением новых экспериментальных данных и новых, более эффективных теорий, периодически заменяются новыми. Такую смену называют «научными революциями».

В литературе используется разная классификация типов научных революций. Например, 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 [9]. Как правило, научная революция обоих типов связана «с качественными преобразованиями физических средств наблюдения и экспериментирования, с новыми способами и методами оценки и интерпретации эмпирических данных» [10].

Н. И. Кузнецова и М. А. Розов выделяют уже четыре типа научных революций [7]. Первый тип связан с появлением новых фундаментальных теоретических концепций. Второй – 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.

Дискуссия о содержании и развитии термина «научные революции» достаточно обширна [16; 21; 25], однако тема настоящей статьи выходит за ее рамки. Поэтому для характеристики изменений, произошедших в квантовой физике в начале XX века, и в контексте их влияния на технологические инновации мы будем использовать термин *«революционные трансформации в науке»*. Под такими трансформациями мы будем подразумевать процессы радикальной перестройки оснований одной или нескольких наук и, как следствие, большинства традиционных характеристик научного познания. Радикальность этих трансформаций заключается в переосмыслении картины мира, во введении новых и пересмотре содержания или даже в отказе от старых фундаментальных понятий и принципов. В результате 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 непризнание той или иной научной деятельности в качестве революционных трансформаций всегда будет отложено во времени. Обычно научное сообщество сначала 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 большинства ученых,

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 признается постепенно – сначала частью авторитетных ученых, и только потом 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. Хотя еще долго продолжают оставаться непривычными и «подозрительными» для старшего поколения, придерживающегося предыдущей картины мира. 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.

3. Революционные трансформации в квантовой физике

В первой четверти XX века в физике произошло несколько революционных трансформаций. В этот период были созданы специальная (1905 г.) и общая (1915-1917 гг.) теории относительности, а также квантовая механика (1925-1927 гг.). Квантовая теория оказалась необычайно успешной, ее формализм позволял делать предсказания, которые подтверждались опытом и быстро превращались в новые технологии. Но тот же формализм требовал поистине революционных изменений в описании явлений, как минимум квантовых. Перечислим основные пункты, по которым квантовая механика (КМ) предлагала перестроить основания как классической механики, в том числе статистической, так и классической теории поля¹.

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

2. Новый взгляд на существование объектов теории. 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. 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-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 оно 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. До измерения волновая функция (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 система непредсказуемым образом переходит только в одно из своих возможных состояний. Как именно происходит такой скачок и как отбирается одна из возможностей, теория не описывает. Теория позволяет вычислить только вероятность каждого отдельного показания прибора (правило М. Борна). В этом кроется еще одно несоответствие классическому детерминизму.

Перечисленные представления следовали из формализма новой теории, но они не являлись аксиомами теории или следствиями из нее. Скорее они формулировались как эпистемологические и онтологические проблемы, требующие решения. Сама квантовая теория не давала готовых решений. Зато это по-разному пытались сделать физики, правда, делали они это уже в рамках собственных философских и методологических убеждений, в форме различных интерпретаций КМ. Каждая интерпретация пыталась ответить минимум на два вопроса: 1. Какие реальные объекты и процессы скрываются за знаками уравнений разных формализмов квантовой теории? 2. Почему формализмы квантовой теории так точно соответствуют экспериментам? Иначе трудно быть уверенным, что уравнения неслучайно совпали с наблюдениями или не были под них подогнаны.

¹ Более подробное описание связи формализма квантовой механики с проблемами реальности см. в работах [2; 3].

4. Экспериментальная метафизика

По мере перехода от революции в квантовой теории к первой и затем ко второй квантовым технологическим революциям менялось отношение физиков к проблеме существования квантовых объектов. Практически сразу после создания квантовой механики ее предсказания стали подтверждаться. Были зарегистрированы волновые свойства электронов, обнаружены предсказанные теорией частицы, объяснены свойства атомов, их строение и взаимодействие. Однако сам по себе формализм теории ничего не говорил о реальности описываемых им объектов (кванта действия, волновой функции, спина, квантовых операторов, Гильбертова пространства, запутанных состояний и т.д.). Его задача ограничивалась непротиворечивым описанием и предсказанием наблюдаемых явлений.

Неудивительно, что отцы-основатели квантовой теории пытались придать новым теоретическим понятиям, моделям и их математическим формализмам хоть какой-то физический смысл, в том числе путем поиска аналогий из других, уже известных физических теорий. Например, через классические аналогии с волнами, фазами, полями, интенсивностью излучения, статистической вероятностью и т.п. В процессе поиска таких аналогий и началась дискуссия о реальности объектов квантовой теории. 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 из классической логики и здравому смыслу¹. Однако при текущем уровне технической базы эти эксперименты было невозможно реализовать. Поэтому они представляли интерес для небольшого числа философов настроенных физиков, а также для профессиональных философов и историков науки.

Для большинства физиков-теоретиков вопрос о реальности математических объектов и свойств квантовой теории не имел принципиального значения. В крайнем случае они удовлетворялись позицией инструментализма относительно квантовой теории. Но по мере роста числа экспериментальных подтверждений теории и усложнения ее математического аппарата среди теоретиков стала набирать популярность Копенгагенская интерпретация. Она предлагала хоть какое-то рациональное, хотя и очень непривычное, объяснение странных свойств квантовых объектов. А с помощью принципа дополнительности и статистической интерпретации волновой функции она позволяла оставаться реалистом одновременно по отношению и к квантовой теории, и к любым другим физическим теориям.

В течение нескольких десятилетий развития квантовой физики благодаря использованию принципиально новых теоретических и экспериментальных методов (научных инноваций) были получены результаты, приведшие к множеству инноваций 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, ее потенциал далеко не исчерпан.

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 версии интерпретации Д. Бома [14].

В 70-80-х годах прошлого века благодаря развитию технологий и экспериментальной базы появилась возможность готовить 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 стимулировало экспериментаторов придумывать различные схемы использования неравенств Белла для проверки мысленного ЭПР-эксперимента с одиночными квантовыми системами [1]. Многочисленные проверки показали, что предсказания квантовой теории верны. Но это еще не означало победу Копенгагенской интерпретации, как иногда утверждается. Эксперименты показали только, что невозможно одновременно сохранить и реализм, и локальность классической физики. Теперь надо или признавать существенно вероятностное поведение даже отдельно взятой частицы и отсутствие скрытых параметров (сохранив локальность), или приписать частицам скрытые параметры (но жертвуя реализмом), признав возможность нелокальной коммуникации между ними. Нужны были новые эксперименты.

В 90-х годах дискуссия между различными подходами к реальности квантовых состояний и их необычных свойств окончательно перешла в лабораторию. Возник даже термин «экспериментальная метафизика» [19]. Философские дискуссии возобновились с новой силой [5; 8; 13; 17, р. 53; 20; 23], а эксперименты снова и снова подтверждали предсказания квантовой теории.

Все точки зрения на реальность объектов квантовой теории можно условно разделить на три больших группы: классический реализм, квантовый анти-реализм и квантовый реализм. Наиболее авторитетным защитником *классического реализма* был А. Эйнштейн. *Квантовый анти-реализм* представлен Копенгагенской

¹ Например, А. Эйнштейн в ЭПР-парадоксе доказывал, 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.

интерпретацией и квантовым байесонизмом (Q-bism). *Квантовый реализм* объединяет множество интерпретаций КМ, стремящихся сохранить реализм и в отношении квантовой теории, и в отношении ее объектов¹. 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.

Например, в экспериментах по интерференции атомов и больших молекул проверялись границы применимости квантовой теории. Для проверки существования определенных свойств у квантовых объектов до измерения проводились эксперименты с «отложенным выбором». А в экспериментах с «квантовым отложенным выбором» фотон заставляли проявлять себя одновременно и как волна, и как частица, плавно переходя от одного проявления к другому. Как и наблюдаемая интерференция макрообъектов, это стало еще одним аргументом, ослабляющим принцип дополнительности квантового анти-реализма. В экспериментах по проверке неравенств Леггетта обосновывалась возможность сохранить реализм, пожертвовав локальностью в пространстве. Для обоснования реализма, совместимого с нелокальностью во времени, в лабораториях проверялись неравенства Леггетта-Гарга. Эксперименты с «квантовым ластиком» проводились с целью восстановить квантовую суперпозицию уже после ее разрушения. В экспериментах, объединяющих механизм «квантового ластика» и «отложенного выбора», пытались сначала зарегистрировать фотон, а уже потом решать, как он должен себя вести.

Несмотря на критику схем экспериментов и выводов из них, все они подтверждали свойства квантовых объектов, следующие из математического формализма теории. На этом основании многие противники классического реализма считают, 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 не является маргинальным, а позиции Копенгагенской интерпретации сильно пошатнулись [24]. Похоже, что спор этот будет продолжаться до тех пор, пока мы точно не выясним, как именно возможные состояния из суперпозиции переходят в одно из наблюдаемых, какую роль в этом играет знание и выбор наблюдателя, а также что означает пространственно-временная нелокальность квантовых корреляций. Как оказалось, важную роль в поиске ответов на эти вопросы стали играть новые квантовые технологии.

5. От экспериментов к новым технологиям

К концу прошлого века накопился большой объем новых данных благодаря экспериментам, проводимым сначала исключительно в рамках дискуссии о реальности квантовых объектов. Неожиданно эти результаты оказались востребованы при создании новых технологий. Их потенциальная эффективность и привлекательность для рынка оказались 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 реализма². Зачастую эти проблемы даже не формулировались. Экспериментаторам и инженерам было необязательно 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.

Инновации в первую очередь касались технологий передачи и обработки информации, в том числе квантовой криптографии и квантового компьютера. Кроме этого, особые свойства квантовых состояний могли быть 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*, основанная на умениях специалистов манипулировать отдельными квантовыми системами (ионами, фотонами и атомами) в состоянии суперпозиции, а также сложными системами в запутанном состоянии. Этим она отличается от первой квантовой революции, где основным объектом исследования и технического манипулирования были молекулы, атомы, группы частиц и их наблюдаемые свойства.

Неудивительно, что до второй квантовой революции почти все отличия квантовой механики от классической физики (см. раздел 3) 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 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». Хотя, если быть точным, понятие «квантовый» правильнее использовать для единичных объектов, поведение которых подчиняется и всем остальным особенностям квантовой механики. Это и существование возможных состояний в суперпозиции, и отсутствие определенных

¹ Характеристику этих трех подходов и краткое описание некоторых экспериментов см. в работе [11].

² 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.

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

С началом второй квантовой революции взгляд на проблемы, раньше считавшиеся философскими, изменился и стал скорее прагматичным. Теперь, по словам Дж. Баба, «загадочные черты квантовой механики рассматриваются как ресурс, который нужно развивать, а не проблема, которую нужно решить» [15, р. 597]. Сегодня, снова «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 происходят в этой самой суперпозиции (хотя и не в классических битах, а в кубитах). В наши дни идет жесткая гонка за квантовое превосходство, цель которого – создание многокубитных устройств для вычислений, невозможных на классическом компьютере. 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.

Квантовая криптография основана на манипуляциях с волновыми функциями перепутанных квантовых систем. Передача зашифрованной информации производится с помощью объектов, предварительно запутанных и разнесенных в пространстве. При манипуляции с одним из таких объектов в точке отправления его состояние разрушается и нелокально воссоздается для второго объекта в точке приёма. Такое явление называют квантовой телепортацией. И тех, кто реализует эту технологию, не смущает, что сторонники классического реализма отрицают саму возможность квантовой запутанности, а сторонники квантового анти-реализма и квантового реализма расходятся во мнении о природе квантовой нелокальности. Сегодня уже невозможно представить, чтобы эта философская дискуссия игнорировала квантовые технологии [26; 27].

6. 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.

Поскольку квантовую теорию сразу не получилось совместить с классическим реализмом господствующей парадигмы, на первом этапе более эффективным оказался инструменталистский подход. Тем более что дискуссии реалистов и анти-реалистов померкли на фоне потрясающих успехов новой теории. Но чем более успешной оказывалась квантовая теория, тем сложнее было уклоняться от ее концептуальных проблем. А поскольку аргументов в пользу квантового реализма почти не было, быстро усилились позиции квантового анти-реализма по отношению к объектам квантовой теории. Причудливым образом этот подход совмещался с реализмом по отношению к классическим объектам. Все вместе это стали называть версиями Копенгагенской интерпретации, несмотря на то, что многие из них противоречили друг другу.

В течение последних десятилетий, как только позволяла экспериментальная база, физики стремились снова и снова проверить на опыте аргументы сторонников разных взглядов на реальность ненаблюдаемых объектов. В свою очередь, эксперименты привели ко второй квантовой революции в технологиях, где квантовые объекты используются так, как будто они существуют в форме, предсказанной теорией. Таким образом, квантовые технологии стали следствием дискуссии между классическим реализмом, квантовым анти-реализмом и квантовым реализмом. Но постепенно технологии и сами становятся аргументом в этом споре, чаще всего в пользу квантового реализма.

Нетрудно объяснить, почему онтологические и эпистемологические проблемы в оценке способов существования и познания ненаблюдаемых объектов вынуждают многих физиков-теоретиков становиться анти-реалистами. Но, как показала практика, 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. Опираясь на этот пример, можно предположить, что сам факт признания или непризнания научными сообществами революционных трансформаций в основаниях науки влияет на эффективность научных исследований в конкретной научной области.

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». Этот пример показывает, что в некоторых случаях 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 в новых взглядах на реальность.

Список источников

1. Гриб А. А. Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // Успехи физических наук. 1984. Т. 142. № 4. С. 619-634.
2. Гринштейн Д., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. М.: Интеллект, 2008. 400 с.

3. **Иванов М. Г.** Как понимать квантовую механику. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2015. 552 с.
4. **Клышко Д. Н.** Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты // *Успехи физических наук*. 1994. Т. 164. № 11. С. 1187-1214.
5. **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. С. 76-92.
6. **Крючкова С. Е.** Инновации: философско-методологический анализ: дисс. ... д. филос. н. М., 2001. 296 с.
7. **Кузнецова Н. И., Розов М. А.** О разнообразии научных революций // *Традиции и революции в истории науки* / отв. ред. П. П. Гайденок. М.: Наука, 1991. С. 60-81.
8. **Печенкин А. А.** Три классификации интерпретаций квантовой механики // *Философия науки*. 1999. Вып. 5. Философия науки в поисках новых путей. С. 164-182.
9. **Стёпин В. С.** Теоретическое знание. М.: Прогресс-традиция, 2000. 744 с.
10. **Стёпин В. С., Порус В. Н.** Научная революция [Электронный ресурс] // *Гуманитарные технологии*. URL: <https://gtmarket.ru/concepts/6961> (дата обращения: 01.07.2018).
11. **Терехович В. Э.** Существование квантовых объектов. Экспериментальная проверка метафизических установок // *Метафизика*. 2017. № 1 (23). С. 104-112.
12. **Экономика и право: энциклопедический словарь Габлера** / пер. с нем. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 432 с.
13. **Albert D.** *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1994. 206 p.
14. **Bell J. S.** *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 290 p.
15. **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.
16. **Cohen H. F.** *The scientific revolution: a historiographical inquiry*. Chicago: University of Chicago Press, 1994. 680 p.
17. **D'Espagnat B., Scalettar R.** Veiled reality: an analysis of present-day quantum mechanical concepts // *Physics Today*. 1995. Vol. 48. № 7.
18. **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.
19. **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.
20. **Healey R.** *The philosophy of quantum mechanics: An interactive interpretation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 288 p.
21. **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.
22. <https://ec.europa.eu/futurium/en/content/quantum-manifesto-quantum-technologies> (дата обращения: 01.05.2018).
23. **Maudlin T.** *Quantum non-locality and relativity: Metaphysical intimations of modern physics*. Singapore: John Wiley & Sons, 2011. 314 p.
24. **Reich E. S.** Quantum theorem shakes foundations // *Nature*. 2011. Vol. 201. № 1.
25. **Scientific revolutions** / ed. by I. Hacking. Oxford: Oxford University Press, 1981. 186 p.
26. **Whitaker A.** *The new quantum age: From Bell's theorem to quantum computation and teleportation*. Oxford: Oxford University Press, 2012. 408 p.
27. **Zeilinger A.** *Dance of the photons: from Einstein to quantum teleportation*. N. Y.: Macmillan, 2010. 305 p.

REVOLUTIONARY TRANSFORMATIONS IN QUANTUM PHYSICS AND INNOVATIONS IN QUANTUM TECHNOLOGIES

Terekhovich Vladislav Erikovich, Ph. D. in Philosophy
Saint Petersburg University
v.terekhovich@gmail.com

The article is devoted to the analysis of the origins of the second quantum technological revolution associated with the transmission and processing of quantum information. The objective of the study is to describe how radical restructuring of the foundations of quantum physics in the first quarter of the XX century led to the creation of technological innovations in the early XXI century. The first part of the paper clarifies the notions of scientific innovations and revolutionary transformations in science, and characterizes the main differences between quantum mechanics and classical physics. The second part argues that the second quantum revolution was prepared in the process of experimental verification of different views on the reality of the objects of quantum theory and the ways of their cognition.

Key words and phrases: innovations; scientific revolutions; interpretations of quantum mechanics; realism; anti-realism; second quantum revolution; quantum technologies.