

КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ ИЛИ РЕВОЛЮЦИОННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ?

Терехович Владислав Эрикович – кандидат философских наук, доцент. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Российская Федерация, 101000, г. Москва. ул. Мясницкая, д. 20; e-mail: v.terekhovich@gmail.com



Столетие квантовой механики актуализирует вопрос о корректности устоявшейся терминологии для описания происшедших радикальных трансформаций. Критический анализ показывает, что термин «квантовая революция» создает упрощенное представление о некоем едином кардинальном повороте в физике, произошедшем в 20–30-х гг. прошлого века, и поверхностно отражает сложный и многоплановый характер изменений, происшедших в самой физике и в ее философском осмыслении. В статье критически переосмысливается устоявшийся термин «квантовая революция» с точки зрения его концептуальных ограничений при описании реальных изменений за последние 100 лет. Приводятся аргументы в пользу частичной замены его более гибким понятием «революционные трансформации в квантовой теории и ее интерпретациях», подчеркивающим процессуальный и многоаспектный характер изменений. Методологической основой исследования является различие двух типов интерпретаций квантовой теории: прагматических, ориентированных на связь формализма с экспериментом, и объяснительных, направленных на формирование представлений о квантовой реальности. Обосновывается применение понятия квантовой революции к прагматической интерпретации, сформировавшейся в 1925–1927 гг. и позже закрепившейся как ортодоксальная, но не к интерпретациям объяснительного типа. Выделены три первоначальные стратегии сохранения классического языка описания квантовых явлений: классический реализм, квантовый дуализм и инструментализм. Проанализированы устойчивые историографические мифы вокруг Копенгагенской интерпретации – о том, что она вшита в постулаты квантовой теории, о ее инструментализме и субъективизме. Показано различие между ортодоксальной (прагматической) и Копенгагенской (объяснительной) интерпретациями. Особое внимание уделено реалистическому повороту в объяснительных интерпретациях (1952–1958 гг.), во многом связанному с работами позднего Гейзенберга. Делается вывод, что развитие квантовой теории характеризуется не единой революцией, а серией трансформаций разной степени революционности, многие из которых происходили параллельно и все еще далеки от завершения.

Ключевые слова: квантовая революция, революционные трансформации, научные революции, копенгагенская интерпретация, интерпретации квантовой механики, философия квантовой физики, Нильс Бор, Вернер Гейзенберг, научный реализм



QUANTUM REVOLUTION OR REVOLUTIONARY TRANSFORMATIONS?

Vladislav E. Terekhovitch –
PhD in Philosophy,
Associate Professor,
HSE University,
20 Myasnitskaya St., Moscow,
101000, Russian Federation;
e-mail: v.terekhovitch@
gmail.com

The centenary of quantum mechanics brings into focus the question of the accuracy of established terminology for describing the radical transformations that occurred. Critical analysis reveals that the term “quantum revolution” fosters a simplified perception of a single, pivotal turn in physics during the 1920s and 1930s and provides a superficial account of the actual changes over the past 100 years. This article critically re-examines the established term “quantum revolution” from the perspective of its conceptual limitations in describing the real changes of the last century. Arguments are presented for its partial replacement with the more flexible concept of “revolutionary transformations in quantum theory and its interpretations”, which emphasises the processual and multifaceted nature of these changes. The methodological foundation of this research is the distinction between two types of interpretations of quantum theory: “pragmatic” interpretations, which focus on connecting the formalism with experiment, and “explanatory” interpretations, which aim to form conceptions of quantum reality. The application of the concept of a quantum revolution is justified for the pragmatic interpretation, which was formed in 1925–1927 and later became established as the orthodox view, but not for interpretations of the explanatory type. Three initial strategies for preserving classical language in the description of quantum phenomena are identified: classical realism, quantum dualism, and instrumentalism. The analysis addresses persistent historiographical myths surrounding the Copenhagen interpretation – namely, that it is inherent in the postulates of quantum theory, and that it is inherently instrumentalist and subjectivist. A distinction is shown between the orthodox (pragmatic) and the Copenhagen (explanatory) interpretations. Particular attention is paid to the realistic turn in explanatory interpretations (1952–1958), largely associated with the later works of Heisenberg. It is concluded that the development of quantum theory is characterised not by a single revolution, but by a series of transformations of varying revolutionary intensity, many of which occurred in parallel and are still far from complete.

Keywords: quantum revolution, revolutionary transformations, scientific revolutions, Copenhagen interpretation, interpretations of quantum mechanics, philosophy of quantum physics, Niels Bohr, Werner Heisenberg, scientific realism

Введение

Столетие квантовой механики, отмечаемое в 2025 г., символизирует радикальную трансформацию не только физического знания, но и концептуальных оснований всего научного мышления. Новая теория не просто изменила наше понимание микромира – она поставила



под сомнение классические представления о реальности, наблюдении, локальности и причинности. Философские следствия этого события затронули самые различные области знания – от метафизики и теории познания до философии сознания и этики науки, трансформировали дискуссии о научном реализме и природе объяснения, сформировали новые исследовательские программы.

Однако терминология, используемая для описания этих трансформаций, требует критического переосмысления. В статье показано, что термин «квантовая революция», прочно закрепившийся в академической и научно-популярной литературе [Peacock, 2007; Healey, 2017; Rovelli, 2022], создает упрощенное представление о некоем едином кардинальном повороте в физике, произошедшем в 20–30-х гг. прошлого века, и поверхностно отражает реальные изменения за последние 100 лет. Параллельно с ним, а в отдельных случаях вместо него, предлагается использовать термин с более узким и одновременно более гибким содержанием, например *революционные трансформации в квантовой теории и ее интерпретациях*. Подчеркну, что далее речь пойдет не о критике термина «научная революция», а о корректном использовании специального термина «квантовая революция».

Начнем с оговорки, что сам концепт «научных революций» в современных дискуссиях по истории и философии науки давно не ассоциируется с упрощенной схемой Куна¹: от кризиса к смене парадигм как радикальному и несоизмеримому разрыву в картине мира и научной практике. Исследователи все чаще высказываются в пользу множественности параллельных и локальных трансформационных процессов, обусловленных историческими и социологическими факторами [Wray, 2011; Cohen, 2015; Nickles, 2017]. Даже первая научная революция продолжалась около 100 лет, перейдя в стадию «тихой революции» лишь в XVIII в., благодаря аналитической механике Эйлера, Даламбера и Лагранжа [Дмитриев, 2025].

Революционные трансформации в квантовой теории и ее интерпретациях далеко не всегда сопровождались скачками, связанными с введением новых фундаментальных понятий и принципов или кардинальным изменением представлений о реальности. Под трансформациями в квантовой теории можно понимать множество как параллельных, так и последовательных процессов разной глубины и длительности, связанных с отдельными аспектами научной деятельности. Это может быть создание нового языка, постановка новых проблем, пересмотр методов, в том числе преобразование средств экспериментирования и интерпретации эмпирических данных [Терехович, 2020].

¹ В своих поздних работах Кун предпочитал говорить уже об «эпизодах развития», сравнивая их с видообразованием в биологической эволюции [Kuhn, 2000].



Рассмотрим аргументы в пользу предлагаемой замены терминологии, а затем подкрепим их примерами из двух исторических периодов.

В каком смысле квантовая революция – это революция?

По поводу революционности самой квантовой теории существуют противоречивые мнения. Известно, что введение М. Планком понятия кванта в 1900 г. первоначально не содержало в себе чего-то революционного, скорее это была формальная математическая конструкция без физической трактовки [Дмитриев, 2020]. Не случайно празднование 100-летнего юбилея происходит в 2025 г., а не в 2000 г. Но и текущий юбилей можно трактовать по-разному. С точки зрения Т. Куна, революционный переход от старой квантовой теории к новой произошел в 1921–1925 гг. Старая теория привела лишь к идее дискретности энергетических уровней электронов в атоме, но была не полноценной теорией, а скорее набором алгоритмов для решения проблем и разрешения парадоксов [Kuhn, 1987]. Революция, по Куну, произошла в том, о чем Гейзенберг писал в той самой статье 1925 г.: «представляется более целесообразным полностью отказаться от любой надежды на наблюдение ранее не наблюдававшихся величин... и попытаться построить квантово-теоретическую механику, аналогичную классической механике, в которой присутствовали бы только соотношения между наблюдаемыми величинами» [Гейзенберг, 1977]. Именно такой отказ от надежды на наблюдение показался многим признаком революции.

Существует и другая, более прагматическая трактовка данного перехода. Например, Р. Хили считает, что революционность новой механики заключалась лишь в отказе от буквального описания и репрезентации реальности и в переходе к практическому использованию моделей теории [Healey, 2017]. Но и здесь революционность новой теории выглядит проблематично, ведь в таком случае она ничем особенно не отличается от классической. Более того, если теория не отвечает на вопрос «почему это работает?», она рискует привести к скептицизму или релятивизму [Wallace, 2020].

Еще одна, широко тиражируемая и особенно любимая среди философов позиция состоит в том, что революция в квантовой теории связана с кардинальной трансформацией ее онтологических оснований. Предполагается, что изменились не просто математика или экспериментальные методы, а сам способ мышления о природе объектности, пространства и причинности. Революционность заключалась в переходе от «механического» мышления к радикально новому



способу понимания физического мира [Maudlin, 2019]. Но и к такому пониманию революции есть вопросы.

Согласно недавнему опросу Nature [Gibney, 2025], 47% физиков до сих пор – и это спустя 100 лет – уверены, что волновая функция – лишь полезный инструмент вычислений; 19% полагают, что она частично репрезентирует нечто в физической реальности; и только 17% верят, что она описывает саму реальность. Можно ли говорить о переходе к новому способу мышления, а значит, о какой-либо революции в парадигме или дисциплинарной матрице в смысле Т. Куна, если большинство продолжает интуитивно разделять классические представления о мире? Пока физики пользуются формулами квантовой механики, оставаясь «умом и сердцем» в старой картине мира, это по сути «нормальная наука», а признание научной ценности новой теории еще не означает признание ее революционности. Сам факт обсуждения множества интерпретаций квантовой теории демонстрирует условность серьезного разговора о революции. Тот же опрос показал, что, выбирая предпочтительную интерпретацию, лишь 24% были в ней уверены, большинство видели в ней лишь нечто полезное в определенных обстоятельствах.

Существует ряд исследований о том, что в процессе своего развития квантовая теория стимулировала не одну, а множество революционных трансформации разной глубины, многие из которых далеки от завершения. «Квантовая революция была не революцией во взглядах, а диалогом, который продолжался в течение многих десятилетий и который никогда не прекращался просто потому, что не было консенсуса» [Beller, 1999]. Квантовая революция – не внезапный скачок, а процесс из серии теоретических и экспериментальных сдвигов [Kragh, 2002], она является «незавершенным делом» [Peacock, 2007], а прорыв Гейзенберга в 1925 г. на Гельголанде был еще не революцией, а событием, положившим начало вековой научной революции [Rovelli, 2022].

Еще больше путаницы вносит термин «вторая квантовая революция», недавно вошедший в оборот [Dowling, Milburn, 2003]. Семантически он создает иллюзию, что была некая «первая квантовая революция», которая как будто уже завершилась. Однако революционность «второй квантовой революции» не связана ни с трансформацией оснований квантовой теории, ни с изменением способа мышления о репрезентации реальности или о природе пространства и причинности. И хотя она повлияла на рост интереса к реалистическим интерпретациям [Терехович, 2020], строго говоря, этот термин стали активно использовать лишь для характеристики современной практики в квантовых экспериментах и технологиях, когда специалисты научились манипулировать одиночными квантовыми объектами в суперпозиции и в запутанном состоянии. Для описания данной трансформации скорее подходит фокусировка П. Галисона на «материальную культуру»



квантовой физики, на ее инструменты, технологии и практики, когда абстрактные понятия и явления, ранее описываемые лишь в формулах и мысленных экспериментах, вдруг стали фактами и перешли из «культуры логики» в «культуру образа» [Galison, 1997]. Как показал все тот же опрос Nature, успех квантовых технологий не сильно повлиял на трансформацию представлений о реальности среди физиков, что еще раз подтверждает тезис об ограниченности термина «квантовая революция».

Полагаю, одна из ключевых причин этой ограниченности связана с самим понятием *интерпретация квантовой теории*. Важно различать два типа интерпретаций, для каждого из которых можно проследить свою историю и свою логику трансформаций разной степени революционности. В частности, *прагматические интерпретации* сконцентрированы на переводе теоретического языка и языка формализма на язык экспериментов и наблюдаемых фактов. Для интерпретаций этого типа достаточно обеспечить предсказательную функцию теории и служить основой для технологий. *Объяснительные интерпретации* квантовой теории, напротив, больше направлены на формирование обоснованных и непротиворечивых представлений о конкретной области мира, через наполнение смыслом понятий, аксиом, уравнений, моделей и экспериментальных фактов. Именно этот тип интерпретаций интересуется проблемами существования квантовых объектов, перехода от квантового описания к классическому (в какой степени это переход онтологический или эпистемологический), а также проблемами индетерминизма и нелокальности. Но будет неверно утверждать, что все объяснительные интерпретации являются чисто философскими, у них есть и вполне прагматическая цель. В частности, они призваны объяснить, почему уравнения, оперирующие абстрактными символами, не имеющими наблюдаемых референтов, так точно соответствуют экспериментам и не были ли они подогнаны под них с помощью *ad hoc* гипотез, констант и прочих математических уловок.

Таким образом, после непродолжительного скачка во время создания квантовой теории, к которому вполне применимо понятие квантовой революции, наступил длительный период эволюции интерпретаций, стремящихся объяснить, а иногда и оспорить эту самую революцию.

В оставшейся части статьи будет показано на исторических примерах, как менялось отношение к этим двум типам интерпретации квантовой теории на разных этапах революционных трансформаций, связанных с этой теорией.



Первоначальный этап сохранения классического языка: три стратегии

С середины 20-х гг. между создателями квантовой теории развернулась дискуссия не только о ее истинности, но и о том, как она связана с классической физикой. Для иллюстрации показателен диалог В. Гейзенберга и А. Эйнштейна, произошедший в 1926 г. Гейзенберг доказывал Эйнштейну, что только наблюдения – единственный источник знания и построения теории. Например, если орбиты электронов в атоме нельзя наблюдать, от понятия орбит следует отказаться. В ответ Эйнштейн признавал, что в молодости тоже так считал (В.Т. – рассуждая об абсолютном времени при создании СТО), но теперь он уверен, что эта позитивистская философия – чушь, поскольку «только теория решает, что именно можно наблюдать», а настоящая теория должна описывать реальность [Гейзенберг, 1989, с. 187–197]. Там же Гейзенберг говорит о роли языка: «Пока мы вообще не знаем, на каком языке можно говорить о том, что происходит внутри атома. У нас, правда, есть математический язык... Но мы еще не знаем – по крайней мере полностью не знаем, – как этот язык связан с обычным языком» [Там же]. На вопрос Эйнштейна о том, как объяснить переход из одного состояния атома в другое, он ссылается на Бора, говоря, что о таком переходе нельзя говорить как о процессе в пространстве и времени. Наконец, на вопрос Эйнштейна: Почему Вы так верите в свою теорию, когда многие основополагающие вопросы неясны? – Гейзенберг неожиданно ответил, как настоящий реалист: «Я считаю, как и Вы, что простота природных законов носит объективный характер» [Там же]. В этом диалоге видны сразу три очень разные стратегии того, как можно сохранить классический язык для описания и объяснения квантовых явлений. Опишем их подробнее.

Первая стратегия, представленная Эйнштейном (назовем ее – «классический реализм» относительно квантовых явлений), состоит в стремлении остаться в рамках классической релятивистско-полевой картины мира. Квантовые явления не могут принципиально отличаться от классических, квантовые объекты и их свойства должны существовать объективно и не зависеть от наблюдения, для квантовых явлений должны соблюдаться принципы локальности и детерминизма. Для решения проблем объяснения достаточно найти аналогии с понятиями из хорошо разработанных физических теорий. Тогда волновая функция будет описывать лишь наше неполное знание о реальном состоянии объекта и похожа на статистическое распределение вероятностей [Терехович, 2020]. Статья Эйнштейна, Подольского и Розена 1935 г. начиналась с прямого требования различать объективную реальность и понятия, которыми оперирует теория, а также с утверждения, что квантово-механическое описание реальности неполно потому, что



противоречит представлению об объективности состояния физическо-го объекта [Фок и др., 1936]. В том же году Э. Шрёдингер использовал образ одновременно живого и мертвого кота, чтобы путем сведения к очевидному абсурду показать, что квантовая теория в изложении Бора и Гейзенберга неполна без описания механизма наблюдения/измерения.

Вторую стратегию, которой придерживались Бор и Гейзенберг, можно назвать «квантовым дуализмом», поскольку она предлагала использовать параллельно два языка описания – классический для наблюдений в экспериментах и математический для описания поведения ненаблюдаемых квантовых явлений до измерения. Ее обычно ассоциируют с Копенгагенской интерпретацией, хотя само это понятие Гейзенберг придумал и популяризировал лишь в публикациях середины 50-х гг. прошлого века.

К сожалению, в научной литературе сложилось путаница, если не сказать мифология, вокруг термина «Копенгагенская интерпретация» [Howard, 2004]. До сих пор многие ошибочно полагают (и это первый миф), что существует единая Копенгагенская интерпретация, причем она и квантовая теория – чуть ли не одно и то же, поэтому ее часто называют ортодоксальной. Ряд исследований показал, что Копенгагенская интерпретация «предстает не как единая доктрина, а как результат исторической и социальной конструкции» [Beller, 1999], а Бор и Гейзенберг имели довольно разные философские предпочтения в объяснительных интерпретациях, причем взгляды обоих заметно эволюционировали [Faye, 2024].

Традиция отождествлять ортодоксальную и Копенгагенскую интерпретации вносит методологическую путаницу. Первая является *прагматической интерпретацией*, вторая – *объяснительной*. Ортодоксальная интерпретация нацелена на перевод математического языка на язык измерений без каких-либо онтологических обязательств и претензий на объяснение сущности явлений. Для этого вводятся постулаты квантовой механики, изложенные в любом учебнике по квантовой физике. Не удивительно, что эта интерпретация часто ассоциируется с самой теорией. Ярлык «копенгагенская» приклеился к ней по ассоциации с научной школой Бора, а также других известных физиков, которые с ним работали: Гейзенберга, Паули, Йордана и др. Как показал Р. Коллинз, огромную роль в этом сыграла именно плотность социальной сети вокруг института Бора [Collins, 1998].

Собственно Копенгагенскую интерпретацию следует рассматривать как объяснительную, она вовсе не обязательна для работы с квантовой теорией или проведения экспериментов и включает в себя не слишком систематизированную смесь философских идей Бора, Гейзенберга и фон Неймана. К ней можно отнести идею коллапса волновой функции как интерпретацию проекционного постулата; принцип дополнительности Бора; фундаментальность (а не инструментальность) вероятностной интерпретации волновой функции как



интерпретацию правила Борна; наконец, утверждения об отсутствии реальности квантовых состояний до измерения и о нелокальности между запутанными состояниями. Сложность разделения двух этих типов интерпретаций ведет к тому, что многие физики, утверждающие, что они разделяют положения Копенгагенской интерпретации, на самом деле имеют в виду ортодоксальную версию, входящую в состав теории².

Второй миф утверждает, что Копенгагенская интерпретация – инструменталистская и позитивистская, поскольку имеет дело исключительно с тем, что можно измерить³. Часто приводится цитата Бора из сборника 1934 г.: «[в] нашем описании природы цель состоит не в том, чтобы раскрыть истинную сущность явлений, а лишь в том, чтобы проследить, насколько это возможно, связи между многообразными аспектами нашего опыта» [Bohr, 1934, p. 18]. Правда, цитата эта взята из статьи 1925 г., отражающей самые ранние взгляды Бора. В дальнейшем Бор приложил много сил, чтобы исследовать эту самую сущность, уточняя, что «классическая теория не может сама по себе объяснить тех новых закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомной физике» [Фок и др., 1936]. А по утверждению Гейзенберга, «теория, созданная и оформившаяся в 1927 г. в Копенгагене, представляла собой не только однозначные правила объяснения экспериментов, но и язык, на котором можно было говорить о природе в атомном масштабе, а следовательно, относилась к философии». Гейзенберг особо подчеркивал, что Копенгагенская интерпретация никоим образом не является позитивистской, поскольку «состояние замкнутой системы, которую можно представить при помощи гильбертова вектора, на самом деле объективно, но

² Это подтверждает все тот же опрос Nature [Gibney, 2025], где Копенгагенская интерпретация снова оказалась самой популярной (36%). Показательно, что ее выбрала почти половина физиков-экспериментаторов (очевидно, из прагматических соображений), а среди теоретиков доля была только 33%. Но уже на вопрос об их уверенности в своем выборе Копенгагенской интерпретации лишь около 5% посчитали ее верной. О соотношении объяснительной и прагматической версий среди выбравших Копенгагенскую интерпретацию говорит другой вопрос: представляет ли волновая функция что-то реальное? «Да» ответили 29%, «нет» ответили 63%, имея в виду, что это лишь информация о вероятностях обнаружения различных значений при измерении. Кстати, это говорит и о некорректности самой методики опросов с предложением выбрать конкретную интерпретацию. Если конкретный физик не интересовался дискуссией о квантовых парадоксах, ему психологически проще всего выбрать максимально безобидный и знакомый вариант – копенгагенский. Более подробный анализ данного опроса представлен в обзоре А.А. Фурсова в этом номере журнала.

³ Многие физики вплоть до 80-х гг. ошибочно ассоциировали Копенгагенскую интерпретацию с выражением Мермина «Заткнись и считай!» [Mermin, 1989]. Позже он сам признал, что неверно определил смысл этой явно философской интерпретации.



не реально, и что классическая идея об “объективно реальных предметах” должна быть в этом отношении отвергнута» [Гейзенберг, 1958, с. 42–43]. Таким образом, инструментализм в рассуждениях Бора и Гейзенберга был не философской позицией (им была ближе неокантианская философия), а прагматическим подходом, опирающимся на неизбежность использования двух дополняющих друг друга языков описания – классического и квантового.

Еще один популярный миф состоит в том, что Копенгагенская интерпретация по своей сути субъективистская, поскольку результат наблюдения порождается коллапсом волновой функции, зависящим исключительно от знания наблюдателя. Да, так считали Дж. фон Нейман и позже Ю. Вигнер, но с этим категорически не соглашались Бор и Гейзенберг. Бор не упоминал коллапс волнового пакета и не придавал фундаментальной роли наблюдателю в его субъективном аспекте, наблюдатель для него лишь участник физического взаимодействия [Howard, 2004]. Гейзенберг хотя и принимал идею коллапса, но также упорно отмежевывался от субъективистской трактовки своей позиции [Гейзенберг, 1989, с. 25–26].

Третья стратегия, о которой Гейзенберг упомянул в диалоге с Эйнштейном, заключалась в фокусе на прагматических проблемах непротиворечивого описания и предсказания наблюдаемых явлений с одновременным осознанным отказом от попыток объяснения. Это классический инструменталистский подход, наследующий принципы логического позитивизма: только «наблюдаемые» термины имеют физическую интерпретацию, а теория – это формальный аппарат для расчета результатов экспериментов. В какой-то степени такая стратегия связана с мифом об инструментализме самой Копенгагенской интерпретации, и для этого были некоторые основания. Во-первых, принцип соответствия, защищаемый Бором в период «старой квантовой теории», вполне вписывался в позитивистскую идеологию. Во-вторых, принцип верификации логических позитивистов, казалось бы, соотносился с ранними высказываниями Бора по поводу исключительного приоритета измерений.

В 1930-х гг. идеи позитивизма были достаточно влиятельными в интеллектуальной среде Европы. Известно, что Гейзенберг был вдохновлен идеями Э. Маха и общался с М. Шликом, а Бор поддерживал связь с Р. Карнапом и О. Нейратом [Faye, Jaksland, 2021]. Но делал Бор это не потому, что идеи Венского кружка сильно повлияли на него, а чтобы убедить включить в их программу единства науки принцип дополнительности, кроме прочего, утверждающий, что объективное описание природы неотделимо от условий наблюдения и эксперимента, в которых мы ее исследуем⁴. Хотя усилия Бора

⁴ В 1927 г. Бор сформулировал принцип дополнительности, по которому некоторые наблюдаемые свойства, например пространственно-временная локализация



оказались тщетными, участники Венского кружка находили поддержку своей философии в его интерпретации. В своем манифесте 1929 г. они с удовлетворением отмечают: «Под влиянием квантовой теории множатся даже сомнения относительно применимости понятия строгой каузальной закономерности к явлениям в мельчайших пространственно-временных областях. Понятие вероятности сводится к эмпирически доступному понятию относительной частотности» [Карнап и др., 2005].

Таким образом, несмотря на философские дискуссии между основателями квантовой теории, начиная с середины 30-х гг. прошлого века в квантовой физике мирно сосуществовали сразу три противоречащие друг другу стратегии, в разной степени опирающиеся на язык классической физики. В научном сообществе идеи Бора воспринимались скорее не как объяснительная интерпретация, а как прагматическая часть теории; постепенно сформировалось представление о некоей ортодоксальной интерпретации. Проблемы совместимости квантовой механики с классическими теориями решались с помощью методологических версий принципа соответствия, принципа дополнительности, статистической интерпретации волновой функции и проекционного постулата. Большинство физиков-теоретиков в принципе не интересовались объяснительными интерпретациями, а дискуссии о реальности квантовых объектов и возврате к детерминизму объявлялись философскими и не имеющими отношения к настоящей физике, поскольку не согласовывались с ортодоксальной интерпретацией, якобы вшитой в теорию. Все вместе это подтверждает некорректность применения термина «квантовая революция» к рассматриваемому периоду.

Реалистический поворот в объяснительных интерпретациях

К началу 50-х гг. прошлого века в физике накопилось большое число теоретических и экспериментальных данных. Вместо долгое время доминирующей идеологии позитивизма с ее отрицанием метафизики и отказом от объяснения среди философов науки популярной становится идея множества «языков» и «онтологий теорий». В ряде работ в период с 1948 по 1968 г. У.В.О. Куайн показал, что невозможно строгое разделение между «реальными» (наблюдаемыми) и «теоретическими» (ненаблюдаемыми) сущностями. В каком-то смысле он

и причинно-следственная связь, а также волновое и корпускулярное описания (от последнего он позже отказался) при наблюдении являются взаимоисключающими, но дополняющими друг друга для полного описания явлений.



снял табу с таких понятий, как сущность, объяснение и онтология теории, куда входят утверждения о существовании ненаблюдаемых сущностей, постулируемых научной теорией.

О влиянии дебатов вокруг реалистической интерпретации квантовой теории на философию науки говорит статья Г. Максвелла 1962 г. [Максвелл, 2005], где он ссылается на квантовую теорию, чтобы показать, что не существует априорных или философских критериев для разделения наблюдаемого и ненаблюдаемого. Онтологическая граница между ними размыта, поскольку сам язык наблюдения привязан к приборам, теориям и парадигмам. То, что когда-то было «чисто» теоретической сущностью, вполне может стать наблюдаемой.

В той же статье же Максвелл выдвинул аргумент, что инструменталисты не могут объяснить успеха вычислений с помощью ненаблюдаемых сущностей, а реалисты могут. Логика его рассуждений проста: если мы имеем хорошо подтвержденную теорию, из которой следует утверждение, что какая-то теоретическая сущность существует, то эту сущность следует принимать как реальную. Позже Х. Патнэм сформулировал это как “no miracle argument”, согласно которому реализм – единственная философия, которая не превращает успех науки в чудо [Putnam, 1975]. Применительно к квантовой теории его можно переформулировать примерно так: если бы ненаблюдаемые объекты типа электрона, спина или волновой функции не имели референта в реальности, то необычайный успех квантовой теории, где эти объекты принимаются как примитивные сущности, был бы чудом, а чудес, как известно, не бывает.

Рискну предположить, что именно послевоенная интеллектуальная атмосфера в академических кругах, тяготеющая к рациональному объяснению окружающего мира, способствовала всплеску интереса к объяснению квантовой теории, что в итоге привело к реалистическому повороту в ее объяснительных интерпретациях. Не случайно в этот же период активизировались дискуссии между физиками, которых не устраивал ни инструменталистский подход, ни отказ от интерпретации («заткнись и считай»), ни идеи Бора, «вшитые» в учебники по квантовой физике в форме ортодоксальной интерпретации. В качестве иллюстрации такого поворота дискуссии упомяну работы Д. Бома, В. Гейзенберга, А.В. Фока, К. Поппера и Х. Эверетта, изданные в период 1952–1958 гг.

В 1952 г. Д. Бом [Bohm, 1952] выступил против общепринятого понимания квантовой теории (очевидно, он подразумевал ее ортодоксальную интерпретацию), которое предлагало отказаться от любой возможности точно определить поведение системы на квантовом уровне. В качестве реалистической альтернативы, пусть и ценой отказа от локальности, Бом реанимирует идею волны-пилота Л. де Бройля в форме интерпретации со скрытыми параметрами, постулирующей



реальные положения частиц, детерминистически управляемые волновой функцией.

Понимая, что в научном сообществе формируется сильный запрос на реалистическое объяснение, Гейзенберг начинает кампанию по продвижению своей (и частично Бора) философии под именем «Копенгагенская интерпретация». В 1955/56 г. он читает цикл Гиффордских лекций, где высказывает идею, что интерпретация Боба дает такие же предсказания, как и Копенгагенская интерпретация (эмпирически ей эквивалентна), но предлагает ошибочную философию, возвращая к онтологии материализма [Гейзенберг, 1989, с. 77–78]. Защищаясь от обвинений в инструментализме, к которому он склонялся в молодости, в сборнике о Боре 1955 г. Гейзенберг уже сам критикует позитивистов. Теперь он уверен, что именно их с Бором интерпретация предложила новый язык, чтобы говорить о реальности: «Бор сформулировал новую интерпретацию квантовой теории на философском языке... Но это не был язык одной из традиционных философских систем – позитивизма, материализма или идеализма..., трудно пытаться втиснуть новые идеи в старую систему понятий, принадлежащих более ранней философии» [Гейзенберг, 1958, с. 28].

Гейзенберг не просто отвергает философию Боба, теперь он настаивает на своей версии квантового реализма, утверждая, что Копенгагенская интерпретация, насколько возможно, соответствует «идеалу объективного описания мира» и «не содержит никаких действительно субъективных черт» [Гейзенберг 1989, с. 26]. Правда, реализм у него снова выражается в дуалистической форме, теперь не лингвистической, а онтологической. Гейзенберг считает, что надо отделить объективный мир квантовых явлений от реальности, которую мы описываем на языке классической физики. А для этого необходимы два языка: один основан на понятиях пространства и времени, второй – на математике квантовой теории. Чтобы усилить аргументацию, Гейзенберг создает оригинальную метафизическую концепцию, используя понятие «потенций» Аристотеля: квантовая математика «управляет миром возможного, но не действительного», а переход от суперпозиции к наблюдаемому состоянию соотносится с переходом от возможности к действительности в процессе наблюдения, причем процесс этот чисто физический. Гейзенберг настаивал: «Состояние замкнутой системы, которую можно представить при помощи гильбертова вектора, на самом деле объективно, но не реально» [Гейзенберг, 1958, с. 42]. Объективность у него означает независимость от наблюдателя, а реальность – область действительного⁵.

⁵ Исследуя соотношение понятий действительности и реальности у Гейзенберга, И.А. Рыбакова замечает, что в названии его работы, написанной в 1939–1942 гг., “*Ordnung der Wirklichkeit*”, переведенном на английский как “*Reality and its order*” корень *wirk* в слове “*Wirklichkeit*” указывает на то, что «реальность»



Оправдания Гейзенберга не помогли, миф о мнимом субъективизме и позитивизме Копенгагенской интерпретации оказался крайне живучим. Наоборот, после выступлений и публикаций Гейзенберга Бом попытался еще больше легитимизировать свою программу скрытых параметров, «противопоставив ее объективизм и реализм предполагаемым копенгагенским абсурдам коллапса волнового пакета, индуцированного наблюдателем, и вытекающему из него субъективизму» [Howard, 2004]. Однако реалистические идеи Гейзенберга имели другое неожиданное продолжение. Упомяну в этом контексте три работы 1957 г., опубликованные всего через два года после лекций и статьи Гейзенберга.

Начиная с конца 1950-х гг. очень много для закрепления в общественном сознании негативного представления о якобы субъективистской интерпретации Бора и Гейзенберга сделал К. Поппер. Любопытно, что параллельно с критикой ортодоксальной интерпретации, отстаивая реализм квантовой теории, Поппер разработал собственную пропензитивную интерпретацию [Popper, 1957], согласно которой квантовая реальность – это реальность не актуальных свойств объектов, а их предрасположенностей к некоторому поведению, причем предрасположенности – такие же реальные физические сущности, как силы или поля. Только много лет спустя Поппер признался, что вдохновился он именно идеей Гейзенберга о потенциях Аристотеля [Popper, 1992].

В этом же году В.А. Фок излагает свою интерпретацию, очень схожую с философскими идеями Гейзенберга (он на него сослался) [Фок, 1957]. Одновременно Х. Эверетт предлагает совершенно иной способ реалистического объяснения проблемы измерения – через отказ от понятия «коллапс волновой функции». Для этого он рассматривает множество наборов соотнесенных возможных состояний между объектами и наблюдателями [Everett, 1957]. В отличие от объяснительных интерпретаций Гейзенберга, Фока и Поппера, Эверетт подчеркивает, что его интерпретация хотя и использует понятие «возможные состояния», не содержит никаких метафизических компонентов. Ее цель прагматическая – создать минимальную онтологию теории, упростив набор первичных сущностей и аксиом теории, достаточных для предсказаний экспериментов. Позже Б. деВитт, Д. Дойч и другие, используя эту идею Эверетта, создадут несколько уже объяснительных версий многомировой интерпретации, содержащих метафизические элементы.

Гейзенберга «действует» (от нем. “wirken” – ‘действовать, влиять, творить’) [Рыбакова, 2020].



Заключение

Обобщая, можно сделать вывод, что понятие квантовой революции больше применимо к прагматической интерпретации, сформировавшейся в период 1925–1927 гг. и закрепившейся как ортодоксальная к середине 30-х гг., благодаря быстрым теоретическим и экспериментальным успехам, а также авторитету самого Бора и его учеников. Долгое доминирование этой интерпретации очень похоже на куновскую «нормальную науку». Именно этот «копенгагенский дух» (а не сама Копенгагенская интерпретация) навязывался как единственно верная идеология. Отклонения от нее рассматривались научным сообществом как «аномалии», и даже идеи Эйнштейна, Шрёдингера, а позже Боба, не соответствующие этой идеологии, маргинализировались. Любое противодействие ортодоксальной интерпретации воспринималось как метафизическая привязанность к классическому детерминизму и изображалось как консервативное и догматическое [Beller, 1999]. В какой-то степени эта прагматическая интерпретация до сих пор имеет негласный статус «научной», благодаря проникновению в учебные курсы по квантовой физике (что подтверждает опрос Nature).

Как я попытался показать выше, термин «квантовая революция» слабо применим к эволюционным процессам в объяснительных интерпретациях, один из периодов активизации которых пришелся на 1955–1958 гг. На этом этапе инициатива перешла от Бора к Гейзенбергу, который не только ввел в оборот термин «Копенгагенская интерпретация», но и переформулировал ее в философском и объективистском ключе. Сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны, усилия Гейзенберга привели к еще большей легитимизации ортодоксальной интерпретации в среде работающих физиков. С другой стороны, его оппоненты, в первую очередь Бом и Поппер, нашли в Копенгагенской интерпретации нечто совсем другое (видимо, то, что хотели найти) и с энтузиазмом начали критиковать ее создателей за субъективизм и отказ от идеалов научной объективности. Удивительным образом концептуализация Гейзенберга в совокупности с популяризацией идей Бора стимулировала развитие сразу нескольких семейств будущих интерпретаций: многомировой, модальной и реляционной. А его идея, что волновая функция содержит как объективные, так и субъективные аспекты, в какой-то степени предвосхитила дискуссию между пси-онтическими и пси-эпистемическими интерпретациями в начале XXI в.

Полагаю, можно констатировать, что в интерпретациях квантовой теории объяснительного типа в научном сообществе так и не произошло парадигмального сдвига, соответственно, трудно говорить и о периоде нормальной науки. Две привычные стратегии – сохранение



классического языка и инструментализм – по-прежнему популярны у большинства работающих физиков. Одновременно в среде философов науки и физиков, интересующихся основаниями своей науки, наблюдается перманентный кризис и эволюционный процесс трансформаций в объяснительной функции теорий, включая квантовую теорию поля и квантовую гравитацию. Они продолжают искать новые языки, новые онтологии теории и, в какой-то степени, новые метафизики, что подтверждается потоком публикаций как в специализированных журналах, так и в научно-популярных изданиях.

Игорь Сергеевич Дмитриев [Дмитриев, 2025] делит революцию в классической механике на два этапа – натурфилософский и научный. Полагаю, с революционными трансформациями в квантовой теории можно поступить наоборот. В период становления теории наблюдался научный этап прагматической интерпретации, а с середины 50-х гг. начался этап ее активного философского осмысления. Позже было еще как минимум два этапа постепенных трансформаций, происходящих параллельно. Один связан с успешными экспериментами по проверке неравенств Белла. Другой – с дискуссией в философии науки вокруг критики тезисов научного реализма. Первый усилил позиции сторонников реалистических версий объяснительных интерпретаций квантовой теории, второй их ослабил. Но это тема отдельного исследования.

Список литературы

Гейзенберг, 1989 – *Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое / Пер. с нем. М.: Наука, 1989. 400 с.

Гейзенберг, 1977 – *Гейзенберг В.* О квантовотеоретическом истолковании кинематических и механических соотношений // *Успехи физических наук.* 1977. Т. 122. № 8. С. 574–586.

Гейзенберг, 1958 – *Гейзенберг В.* Развитие интерпретации квантовой теории // Нильс Бор и развитие физики. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958. 260 с.

Дмитриев, 2020 – *Дмитриев И.С.* Консерватор в роли революционера (М. Планк и квантовая революция) // *Революционные трансформации в науке как фактор инновационных процессов: концептуальный и исторический анализ.* М.: РОИФН, 2020. Гл. 2. С. 35–47.

Дмитриев, 2025 – *Дмитриев И.С.* Кто создал ньютоновскую парадигму? (О «бархатных» революциях в науке) // *Журнал Российского национального комитета по истории и философии науки и техники.* 2025. № 1.

Карнап и др., 2005 – *Карнап Р., Ган Г., Нейрат О.* Научное миропонимание – Венский кружок // *Actual Problems of Mind.* 2005. № 6. С. 197–214.

Максвелл, 2005 – *Максвелл Г.* Онтологический статус теоретических сущностей // *Философия науки.* 2005. № 1. С. 20–48.



Рыбакова, 2020 – Рыбакова И.А. Метафизика «Порядка действительности» В. Гейзенберга // Гуманитарные исследования в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. 2020. № 2 (52). С. 117–127.

Терехович, 2020 – Терехович В.Э. От революционных трансформаций в квантовой физике к инновациям в квантовых технологиях и обратно // Революционные трансформации в науке как фактор инновационных процессов: концептуальный и исторический анализ. М.: РОИФН, 2020. Гл. 3. С. 48–77.

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

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

References

Beller, 1999 – Beller, M. *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago: University of Chicago Press, 1999.

Bohm, 1952 – Bohm, D. “A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of ‘Hidden’ Variables. I”, *Physical Review*, 1952, vol. 85 (2), p. 166.

Bohr, 1934 – Bohr, N. *Atomic Theory and the Description of Nature*. Cambridge: Cambridge University Press, 1934.

Carnap et al., 2005 – Carnap, R., Hahn, G., Neurath, O. “Nauchnoe Miroponimanie – Venskii Kruzhok” [Scientific Worldview – Vienna Circle], *Actual Problems of Mind*, 2005, vol. 6, pp. 197–214. (In Russian)

Cohen, 2015 – Cohen, H.F. *The Rise of Modern Science Explained. A Comparative History*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 296 p.

Collins, 1998 – Collins, R. *The Sociology of Philosophies: A Global Theory of Intellectual Change*. Cambridge: Belknap Press of Harvard University Press, 1998.

Dmitriev, 2020 – Dmitriev, I.S. “Konservator v Roli Revolyutsionera (M. Plank i Kvantovaya Revolyutsiya)” [Conservative in the Role of a Revolutionary (M. Planck and the Quantum Revolution)], in: *Revoljucionnye Transformatsii v Nauke kak Faktor Innovatsionnykh Protsessov: Kontseptual’nyi i Istoricheskii Analiz* [Revolutionary Transformations in Science as a Factor in Innovation Processes: Conceptual and Historical Analysis]. Moscow: ROIFN, 2020, Chapter 2, pp. 35–47. (In Russian)

Dmitriev, 2025 – Dmitriev, I.S. “Kto Sozdal N’yutonianskuyu Paradigmu? (O ‘Barkhatnykh’ Revolyutsiyakh v Nauke)” [Who Created the Newtonian Paradigm? (On “Velvet” Revolutions in Science)], *Zhurnal Rossiiskogo Natsional’nogo Komiteta po Istorii i Filosofii Nauki i Tekhniki*, 2025, vol. 1. (In Russian)

Dowling, Milburn, 2003 – Dowling, J.P., Milburn, G.J. “Quantum Technology: The Second Quantum Revolution”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2003, vol. 361, no. 1809, pp. 1655–1674.

Everett, 1957 – Everett, H. “‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics”, *Reviews of Modern Physics*, 1957, vol. 29 (3), pp. 454–462.



Faye, Jaksland, 2021 – Faye, J., Jaksland, R. “What Bohr Wanted Carnap to Learn from Quantum Mechanics”, *Studies in History and Philosophy of Science*, 2021, vol. 88, pp. 110–119.

Faye, 2024 – Faye, J. “Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2024 [https://plato.stanford.edu/archives/sum2024/entries/qm-copenhagen, accessed 10.08.2025].

Fok et al., 1936 – Fok, V.A., Einstein, A., Podolskiy B. & N. Rosen, Bohr, N. “Mozhno Li Schitat’, Chto Kvantovo-Mekhanicheskoe Opisaniye Fizicheskoi Real’nosti Yavlyayetsya Polnym?” [Can We Consider the Quantum Mechanical Description of Physical Reality to Be Complete?], *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1936, vol. 16, Issue 4, pp. 436–457. (In Russian)

Fok, 1957 – Fok, V.A. “Ob Interpretatsii Kvantovoi Mekhaniki” [On the Interpretation of Quantum Mechanics], *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1957, vol. 62, Issue 8, pp. 461–474. (In Russian)

Galison, 1997 – Galison, P. *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. Chicago: University of Chicago Press, 1997.

Gibney, 2025 – Gibney, E. “Physicists Disagree Wildly on What Quantum Mechanics Says about Reality, Nature Survey Shows”, *Nature*, 2025, vol. 643 (8074), pp. 1175–1179.

Healey, 2017 – Healey, R. *The Quantum Revolution in Philosophy*. Oxford: Oxford University Press, 2017.

Heisenberg, 1958 – Heisenberg, W. “Razvitie Interpretatsii Kvantovoi Teorii” [Development of the Interpretation of Quantum Theory], in: *Nil’s Bor i Razvitie Fiziki* [Niels Bohr and the Development of Physics]. Moscow: Izd-vo Inostr. Lit-ry, 1958, 260 pp. (In Russian)

Heisenberg, 1977 – Heisenberg, W. “O Kvantovoteoreticheskom Istolkovanii Kinematicheskikh i Mekhanicheskikh Sootnoshenii” [On the Quantum-Theoretical Interpretation of Kinematic and Mechanical Relations], *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1977, vol. 122 (8), pp. 574–586. (In Russian)

Heisenberg, 1989 – Heisenberg, W. *Fizika i Filosofiya. Chast’ i Tseloe* [Physics and Philosophy. Part and Whole]. Moscow: Nauka, 1989. 400 pp. (Trans. into Russian)

Howard, 2004 – Howard, D. “Who Invented the ‘Copenhagen Interpretation’? A Study in Mythology”, *Philosophy of Science*, 2004, vol. 71 (5), pp. 669–682.

Kragh, 2002 – Kragh, H. *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*. Princeton: Princeton University Press, 2002.

Kuhn, 1987 – Kuhn, T.S. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894–1912*. Chicago: University of Chicago Press, 1987.

Kuhn, 2000 – Kuhn, T.S. *The Road Since Structure: Philosophical Essays, 1970–1993, with an Autobiographical Interview*. Chicago: University of Chicago Press, 2000.

Maudlin, 2019 – Maudlin, T. *Philosophy of Physics: Quantum Theory*. Princeton: Princeton University Press, 2019.

Maxwell, 2005 – Maxwell, G. “Ontologicheskii Status Teoreticheskikh Sushchnostei” [Ontological Status of Theoretical Entities], *Filosofiya Nauki*, 2005, vol. 1, pp. 20–48. (In Russian)

Mermin, 1989 – Mermin, N.D. “What’s Wrong with this Pillow?”, *Physics Today*, 1989, vol. 42 (4), p. 9.



Nickles, 2017 – Nickles, T. “Scientific Revolutions”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2017 [<https://plato.stanford.edu/archives/spr2024/entries/scientific-revolutions>, accessed 10.08.2025].

Peacock, 2007 – Peacock, K.A. *The Quantum Revolution: A Historical Perspective*. USA: Bloomsbury Publishing, 2007.

Popper, 1957 – Popper, K.R. “The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability and the Quantum Theory”, in: S. Körner (ed.). *Observation and Interpretation: A Symposium of Philosophers and Physicists*. New York: Academic Press, 1957.

Popper, 1992 – Popper, K.R. *Quantum Theory and the Schism in Physics*. Vol. 3. London: Psychology Press, 1992.

Putnam, 1975 – Putnam, H. “What is Mathematical Truth?”, *Historia Mathematica*, 1975, vol. 2 (4), pp. 529–533.

Rovelli, 2022 – Rovelli, C. *Helgoland: Making Sense of the Quantum Revolution*. London: Penguin, 2022.

Rybakova, 2020 – Rybakova, I.A. “Metafizika Poryadka ‘Deystvitelnosti’ V. Geizenberga” [Metaphysics of the “Order of Reality” by W. Heisenberg], *Humanitarian Research in Eastern Siberia and the Far East*, 2020, vol. 2 (52), pp. 117–127. (In Russian)

Terekhovich, 2020 – Terekhovich, V.E. “Ot Revolyutsionnykh Transformatsii v Kvantovoi Fizike k Innovatsiyam v Kvantovykh Tekhnologiyakh i Obratno” [From Revolutionary Transformations in Quantum Physics to Innovations in Quantum Technologies and Back], in: *Revolutsionnye Transformatsii v Nauke kak Faktor Innovatsionnykh Protssessov: Kontseptual’nyi i Istoricheskii Analiz* [Revolutionary Transformations in Science as a Factor in Innovation Processes: Conceptual and Historical Analysis]. Moscow: ROIFN, 2020, Chapter 3, pp. 48–77. (In Russian)

Wallace, 2020 – Wallace, D. “The Quantum Revolution in Philosophy”, *Analysis*, 2020, vol. 80 (2), pp. 381–388.

Wray, 2011 – Wray, K.B. *Kuhn’s Evolutionary Social Epistemology*. New York: Cambridge University Press, 2011.