

УДК 167.7

DOI:

10.15372/PS20200207

**П.А. Французов, А.В. Нечипоренко****ПРОБЛЕМА ОНТОЛОГИИ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ<sup>1</sup>**

В статье проблемы квантовой физики анализируются в контексте современной ситуации в науке, инженерии и философии. Сформулировано утверждение, что поиск удовлетворительной интерпретации существующей квантовой теории бесперспективен и выдвигается тезис о необходимости запуска научно-философской программы построения новой физической картины мира на основе объединенной квантово-классической теории.

*Ключевые слова:* научная программа, объединенная квантово-классическая теория, проблема, онтология, эпистемология, квантовая физика, квантовая инженерия.

**P.A. Frantsuzov, A.V. Nechiporenko****THE PROBLEM OF QUANTUM PHYSICS' ONTOLOGY**

Problems of quantum physics are analyzed in the context of the modern situation in science, engineering and philosophy. The statement is formulated that the search for a satisfactory interpretation of the existing quantum theory is futile and the thesis is put forward that it is necessary to launch a scientific and philosophical program to build a new physical picture of the world on the basis of a unified quantum-classical theory.

*Keywords:* scientific program, combined quantum-classical theory, problem, ontology, epistemology, quantum physics, quantum engineering.

**Введение**

Квантовая механика на данный момент является самой точной теорией в истории науки. Тем не менее она обладает очевидными недостатками: 1) *не дает общего математического языка описания для квантового мира и классического мира*; 2) *не в состоянии описать процесс измерения*; 3) *не содержит интуитивно понятного представ-*

---

<sup>1</sup> П.А.Французов выражает благодарность Министерству науки и высшего образования за поддержку в рамках проекта «Лаборатория физики перспективных материалов и наноструктур» Московского педагогического государственного университета.

ления о физических явлениях в квантовых системах. В течение почти целого столетия основные усилия по устранению этих недостатков были направлены на разработку интерпретаций квантовой механики. Сегодня известно более десятка различных интерпретаций, в той или иной степени неудовлетворительных. Можно предположить, что если задача не была решена за сотню лет, то она, возможно, и не может быть решена в существующей постановке. В настоящей работе ситуация в квантовой физике реконструируется как проблемная, требующая эпистемологического анализа и реорганизации имеющейся системы знаний, а также смены познавательной стратегии. Предлагается расширенная постановка задачи: построение новой объединенной квантово-классической теории. Это предполагает, в частности, создание математического аппарата, описывающего классическую и квантовую механику, процедуру измерения как предельные случаи, а также разработку онтологии такой теории.

### Проблемная ситуация

Исследователи науки давно отмечают своеобразие становления квантовой физики: она была создана без выработки онтологии. В ситуации кризиса классической физики в начале XX в. были выдвинуты идеи «кванта энергии» М. Планка, «волн материи» Л. де Бройля, модель атома Н. Бора, теория фотоэффекта А. Эйнштейна. Эти идеи предполагали использовать классические понятия, однако по-прежнему тяготели к использованию привычных моделей и физических «интуиций» и не приводили к построению системно-целостной теории. Качественный сдвиг произошел, когда были созданы математические формализмы Э. Шредингера и В. Гейзенберга. Математический аппарат оказался поразительно точным инструментом для описания и предсказания квантовых явлений, а теоретический прорыв, сделанный за счет формальной математики, – из ряда вон выходящим.

Необычность устройства квантовой теории отчетливо осознавалась физиками в первой трети XX в. и понуждала их к интенсивному обсуждению онтологической проблемы и фундаментальных оснований нашего познания природы. Кульминацией стала знаменитая дискуссия между А. Эйнштейном и Н. Бором на V Сольвеевском конгрессе в 1927 г. В качестве итога этой дискуссии обычно выделяют то, что большинство физиков признали квантовый формализм полной теорией, хотя и неклассической. К ее особенностям относятся корпускуляр-

но-волновой дуализм материи, случайность в качестве фундаментальной характеристики реальности, принципиальная неопределенность при измерениях, принцип суперпозиции квантовых состояний. Вместе с тем сама постановка вопроса о «полноте квантовой теории» имела методологический характер и требовала выработки новых представлений о научных теориях как таковых и о методе их построения. Однако исторической магистралью оказался путь активного применения созданного формализма «работающими физиками»<sup>2</sup> при решении предметных задач, а проблемные обсуждения хотя и не прекратились, но были вытеснены на обочину.

Устройство системы научных знаний в абстрактном виде может быть изображено схемой «трех этажей» [10, с. 169] (рис. 1).



Рис. 1. Схематическое изображение научного предмета физики: классическая физика а), современная квантовая физика б)

Первый «этаж» – это эмпирический базис науки, его образуют базовые опыты, эксперименты, и экспериментальные факты. Экспериментатор имеет дело с конкретным природным материалом, а не с общим объектом изучения; последний представлен в виде моделей, призванных изображать объект в его устройстве<sup>3</sup>. Модели и категории оп-

<sup>2</sup> Выражение «работающие физики» отсылает к сложившейся практике решения задач квантовыми физиками. «К. Поппер еще в 1930-х выделил три семейства "интерпретаций": "копенгагенскую" (возглавляемую Н. Бором), "антикопенгагенскую" (во главе с А. Эйнштейном) и "работающих физиков", имея в виду физиков, строящих физические теории и не обращающих внимания на споры первых» [3, с. 104].

<sup>3</sup> Онтологические модели следует отличать от так называемых математических моделей. Последние дают *описание* объекта и его поведения, а первые изображают *устройство объекта* как такового, *какой он есть*. Можно выразиться резче: онтологические модели и *есть объект изучения*. Действительно, например, *газ как обобщенный объект*

ределяют онтологию – форму мыслимости физической реальности «как она есть на самом деле», на схеме она помещена на втором «этаже». Третий этаж – это математический формализм, принципы и законы в математическом виде. В ходе исторического развития науки указанные «этажи» достраиваются и перестраиваются. Так, классическая механика выросла из практической орудийной деятельности человека, и ее первоначальный эмпирический базис составили эффекты колеса, рычага, наклонной плоскости, блока и винта. Первыми теоретическими знаниями выступили законы рычага, доказанные Архимедом с помощью модели. Идеализированные модели пяти механизмов образовали первоначальный арсенал идеальных объектов онтологии. В галилеевско-ньютоновой физике онтология принимает иной вид: она содержит идеализации пространства и времени, систем отсчета, мгновенной скорости и ускорения, силы. Модели конструируются из таких идеальных объектов, как материальная точка, нерастяжимая нить, абсолютно гладкая плоскость, идеальная пружина и т.п. Математический формализм включает аппарат алгебры, аналитической геометрии, интегрально-дифференциальное исчисление. Таким образом, процесс развития идет от производственной и инженерной практики к построению идеализаций, а математический формализм надстраивается над онтологическими моделями как язык их описания (см. рис. 1а)). Исторический анализ и других областей физического знания показывает, что в большинстве случаев опыт инженерного применения возникает до выработки полноценной теории или параллельно с ней. Онтология строится с опорой на инженерный опыт. Квантовая механика является исключением: инженерный опыт применения квантовых свойств отдельных частиц появляется только сейчас. В устройстве квантовой физики есть только первый и третий «этажи» (см. рис. 1б)). Можно выделить группу базовых экспериментов, есть математический аппарат, позволяющий предсказывать результаты экспериментов. Математический формализм выступает самодовлеющими, теоретическим смыслом и содержанием его наполняют уже вторичным образом, рождая *интерпретации*. Интерпретаций выдвинуто много, но как именно устроена физическая реальность, проявляющаяся в экспериментах и выражаемая математически, остается непонятным до сих пор.

---

*изучения* существует только в виде молекулярно-кинетической модели, а в эксперименте всегда имеют дело только с конкретно-эмпирическим объектом оперирования: данным воздухом, кислородом или гелием из данного конкретного баллона и т.п. *Общие и необходимые знания* могут быть сформулированы только *о газе вообще*, на что указывал еще И. Кант.

Однако в настоящее время онтологические обсуждения активизировались вновь. В чем своеобразие ситуации?

1) За 100 лет накопилось множество экспериментальных и Теоретических результатов исследований как в физике микромира и высоких энергий (элементарные частицы), так и в области «больших» квантовых систем (сверхтекучесть, сверхпроводимость, наночастицы и пр.). Развились новые области, такие как нанооптика, спектроскопия одиночных молекул, выводящие на «стык» классических теорий макроявлений и квантовых теорий микромира.

2) В последние 40 лет появились технологии, позволившие работать с одиночными частицами, в частности, с одиночными фотонами или фотонными парами. То, что раньше было лишь мысленным экспериментом (напр., эксперимент Эйнштейна-Подольского-Розена) стало возможным реализовать в лаборатории. В этих экспериментах реализуются эффекты суперпозиции или запутанности состояний квантовых систем, состоящих из одной или нескольких частиц. Эти эффекты совершенно не имеют аналогов в классической физике.

3) Математический формализм квантовой физики ни разу не «дал сбой» и является теорией, дающей предсказания с наивысшей в истории человечества точностью.

4) Появился принципиально новый по отношению к дискуссиям первой половины 20 века теоретический и экспериментальный результат – неравенства Белла и подтверждение их нарушения. Согласно этому результату квантовые объекты в запутанном состоянии сами по себе не имеют атрибутивных свойств, эти свойства порождаются измерением.

5) Возникла и стала развиваться инженерия когерентных квантовых систем – квантовой криптографии, квантовых компьютеров и т.п. Близкой перспективой стало создание квантовых технологий и промышленное производство, основанное на специфических эффектах таких квантовых систем.

Ситуация новая, и в ней проблематизация проходит сразу по нескольким линиям и для разных позиций – ученого-исследователя, инженера, философа.

1) Научные знания – это всегда знания об объекте изучения. Но «копенгагенская интерпретация» квантовой физики обосновывает не-

нужность и неправомерность попыток создать представления об объекте как таковом.

2) Инженерное мышление опирается на понимание внутреннего устройства объектов, оно оперирует самим объектами (их моделями, выраженными в схемах, чертежах) как конструктивными элементами – функциональными узлами, модулями и компонентами. Инженер не может удовлетвориться только математическим формализмом, не имеющим непротиворечивой интерпретации на реальность «объекта как такового». Однако ни одной удовлетворительной интерпретации современная квантовая физика дать не может. Поэтому в деятельности квантовых инженеров (и физиков-экспериментаторов) сегодня реализуется «архаический способ»: подобно тому, как в доньютоновской механике онтологическими сущностями были блоки, рычаги и наклонные плоскости, так в квантовой инженерии «онтологическим конструктором» являются схемы базовых экспериментов, их функциональные узлы и компоненты.

3) В условиях отсутствия собственной онтологии, квантовые физики продолжают, там где это возможно, использовать классические категории и идеализации.

Остановимся на последнем моменте подробнее. Стандартная процедура «квантования» опирается на принцип соответствия [5]. В основу берется классическая «затравочная модель» объекта, в ней строится функция Гамильтона (энергия) и другие наблюдаемые величины, как функции классических обобщенных координат  $q$  и импульсов  $p$ . Соответствующие квантовые операторы получаются в результате подстановки в классические функции вместо  $q$  и  $p$  некоммутирующих операторов  $\hat{q}$  и  $\hat{p}$ . Признается что процедура квантования классической «затравочной модели» относится к самой сути мышления квантового физика: с одной стороны, ее осознанное использование практиковалось всеми основателями квантовой механики, а с другой, она опосредствует основополагающие постулаты [3, с. 106]. Однако классические модели онтологически противоречат результатам квантовой теории, и значит в одном процессе рассуждения при решении единой задачи «работающий физик» использует две противоречащие друг другу мыслительные сущности. Иными словами, в своем мышлении «работающий физик» не может не использовать классические онтологические модели, и не может использовать никаких онтологических моделей. Для нас это означает, что мышление квантового физика содержит фундаментальное внутреннее противоречие.

4) Современная философия пока не может предоставить средства и методы для решения проблемы. Это вынуждает физиков выходить за рамки своего предмета, самим осуществлять философскую рефлексию и метафизические конструирование. Столетний диалог физиков и философов оказывается малорезультативен, что является вызовом для философов, работающих в области теории познания, логики и онтологии.

В целом культурно-историческая ситуация современной квантовой физики может быть охарактеризована как *проблемная*. Она схожа с той, в которой творил Галилео Галилей, создавая и новую, неаристотелеву, картину мира, и новый метод познания – собственно научный метод.

### **Эмпирический базис квантовой механики**

Очертим эмпирический базис квантовой механики на примере одной предметной области – физики одиночных фотонов [2].

**Базовый эксперимент 1:** *Прохождение одиночного фотона через полупрозрачное зеркало.*

Вопрос: является ли фотон неделимой частицей?

В 1922 г. А. Эйнштейн получил нобелевскую премию за объяснение фотоэлектрического эффекта с помощью гипотезы о существовании частиц света – фотонов, и долгое время после этого существование фотонов считалось экспериментально доказанным. Однако в 1969 г. Ламб и Скалли [27] и Крисп и Джеймс [22] независимо построили теоретическое объяснение явление фотоэффекта без использования гипотезы о фотонах. Понадобилось существенное развитие технологий, чтобы лишь в 1986 г. Грэнджером, Роджером и Аспе был проведен эксперимент, удостоверяющий в том, что неделимые фотоны существуют [24]. Схема, передающая идею эксперимента, показана на рис.2. Свет из источника одиночных фотонов проходит через полупрозрачное зеркало. Если фотон является неделимой частицей, то он не должен вызывать одновременное срабатывание обоих детекторов: частица по определению не может одновременно находиться в двух разных местах.

Здесь же уместно обратить внимание на особенность квантового эксперимента: каждый раз испускается одиночный фотон, но в эксперименте используется множество (серия) испусканий. При этом после полупрозрачного зеркала в среднем 50% фотонов идет по пути 1, а 50% – по пути 2. Каждый отдельный фотон оказывается в одном из двух детекторов случайно; случайность признается фундаментальным свой-

ством квантовой реальности, поэтому при описании последней принципиально используется понятие вероятности.

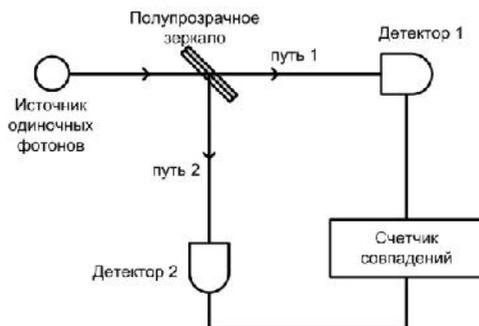


Рис.2. Принципиальная схема эксперимента по прохождению одиночного фотона через полупрозрачное зеркало

### Базовый эксперимент 2: Интерференция одиночного фотона в интерферометре Маха-Цандера

Вопрос: Возможна ли интерференция одиночного фотона?

В данном эксперименте одиночный фотон пропускается через экспериментальную установку, схема которой изображена на рис. 3.

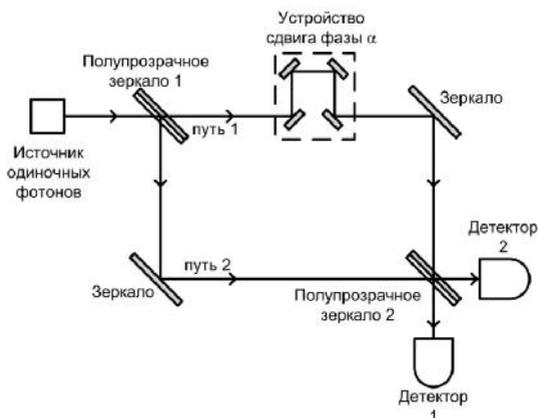


Рис. 3. Эксперимент по интерференции одиночного фотона в интерферометре Маха-Цандера.

Убрав полупрозрачное зеркало 2, мы сведем установку к виду, показанному на рис. 2; при этом фотоны будут регистрироваться или детектором 1, или детектором 2, с вероятностью 50%. Однако при наличии полупрозрачного зеркала 2 установка превращается в интерферометр Маха – Цандера. Если через интерферометр пропускается «классический» свет лазерного луча, то детекторы 1 и 2 будут регистрировать различную интенсивность попадающего света, закономерно зависящую от разности фаз  $\alpha$  световых волн, идущих по двум разным путям – 1 и 2. В этом и заключается эффект классической интерференции света. Эксперимент показывает [24], что в случае пропускания одиночных фотонов проявляется та же самая закономерная зависимость от разности фаз: в детекторы 1 и 2 попадает различное число фотонов. Например, можно так подобрать значение фазового сдвига  $\alpha$ , что детектор 1 будет регистрировать все фотоны (с вероятностью 100%), а детектор 2 – ни одного (вероятность 0%). Результат выглядит так, будто каждый одиночный фотон после полупрозрачного зеркала движется одновременно по двум путям и интерферирует сам с собой на полупрозрачном зеркале 2, но при этом регистрируется детекторами как единая неделимая и локализованная частица.

### **Базовый эксперимент 3: Прохождение одиночного фотона через призму Глана – Тейлора**

Вопрос: Можно ли приписывать поляризацию одиночному фотону?

Схема эксперимента показана на рис. 4. Отметим, что этот эксперимент похож на базовый эксперимент 1. В последнем множество фотонов делилось случайным образом на два подмножества детектируемые детектором 1 и детектором 2 с помощью полупрозрачного зеркала с вероятностями 50% и 50%. Здесь множество фотонов также делится на два подмножества [8], но вероятность детектирования в каждом из детекторов зависит от наклона поляризатора<sup>4</sup>.

Если направление поляризатора совпадает с направлением поляризации обычного луча призмы Глана, то вероятность срабатывания детектора 2 будет 100%, а 1 – 0%. Если же направление поляризатора совпадает с направлением поляризации необычного луча, то вероятность срабатывания детектора 1 будет 100%, а 2 – 0%. Эксперимент

---

<sup>4</sup> При этом общее число зарегистрированных фотонов вкупе детектором 1 и детектором 2 равно общему числу испущенных фотонов.

показывает, что одиночный фотон обладает поляризацией. Однако, что такое «волновая поляризация» у одиночной частицы?

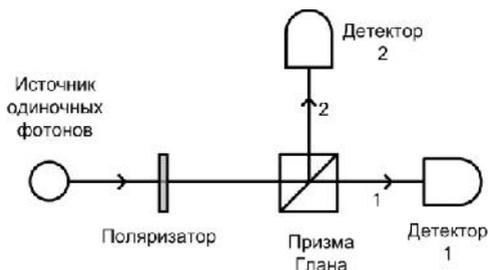


Рис.4. Принципиальная схема эксперимента по прохождению одиночного фотона через призму Глана-Тейлора

#### Базовый эксперимент 4: Эксперимент Эйнштейна – Подольского – Розена и проверка неравенство Белла

Вопрос: существует ли общее квантовое состояние частиц, разнесенных на большое расстояние?

В 1935 г. была опубликована статья А. Эйнштейна, Б. Подольского и Н. Розена [23], в которой описывался мысленный эксперимент (ЭПР-эксперимент, названный по первым буквам фамилий авторов), призванный обосновать неполноту квантовой теории. В 1981–1982 гг. А. Аспе и его сотрудники осуществили ЭПР эксперимент в формулировке Давида Боба [21] в лаборатории [13–15]. Схема эксперимента приведена на Рис. 5.

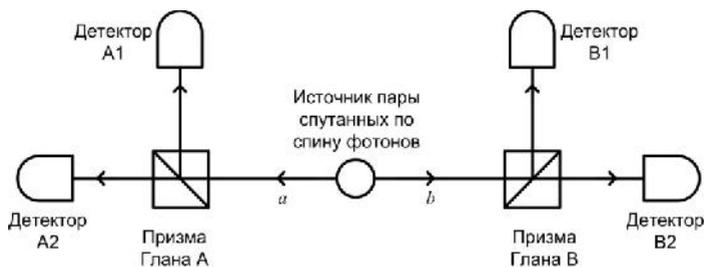


Рис. 5. Схема эксперимента Эйнштейна – Подольского – Розена

В эксперименте Аспе в качестве источника спутанных фотонов использовался одиночный атом кальция. После возбуждения в состояние  $4p^2\ ^1S_0$  с нулевым полным моментом атом излучает два фотона, переходя в состояние  $4s^2\ ^1S_0$ , также с нулевым полным моментом. В экспериментальной установке отбирались только пары фотонов, излученные в противоположных направлениях вдоль одной оси. В этом случае фотоны находятся в квантовом состоянии с нулевым суммарным спином (ЭПР-состояние). При описании данного эксперимента стало принятым вводить двух наблюдателей – Алису и Боба – каждый из которых проводит измерение со «своим» фотоном ЭПР-пары. Измерение призвано определить поляризацию фотона. Это делается за счет использования призмы Глана (см. базовый эксперимент 3). Оси призм А и В в ЭПР-эксперименте совпадают. Эффект, зафиксированный в эксперименте, заключается в том, что Алиса, измерив поляризацию «своего» фотона  $a$ , может а priori определить поляризацию второго фотона ЭПР-пары. Измерение Боба, производимое реально с фотоном  $b$ , точно совпадает с предсказанием Алисы. В чем парадоксальность эксперимента? Дело в том, что состояние каждого фотона проецируется на ось поляризации кристалла случайным образом и, поскольку случайность фундаментальна, эта проекция не существует до проведенного измерения. Детекторы А и В могут быть разнесены на сколь угодно большое расстояние так, что в интервале времени между измерениями Алисы и Боба фотоны не успеют обменяться никаким сигналом взаимодействия, движущимся со световой скоростью. Тем не менее, направление поляризации фотона  $b$  оказывается коррелированным с направлением поляризации фотона  $a$ . Наблюдается явление *квантовой нелокальности*: частицы ЭПР-пары связаны друг с другом при сколь угодно большом расстоянии между ними.

Эффект можно объяснить тем, что поляризации фотонов  $a$  и  $b$  зависят от некоего локального параметра, присущего каждому фотону, что и обуславливает корреляцию результатов измерений. В 1964 и 1966 гг. Джон Белл опубликовал две статьи [16; 17], в которых он показал, с одной стороны, возможность теорий скрытых локальных параметров, альтернативных квантовой механике, и, с другой стороны, возможность критического эксперимента по проверке истинности теорий данного класса. Критический эксперимент может быть проведен на установке, показанной на рис. 5, где направление осей поляризации призм А и В может меняться. Такой эксперимент и был проведен группой А. Аспе [13–15]. Его результаты подтвердили предсказания кван-

тово-механической теории и опровергли возможность существования теорий с локальными скрытыми параметрами.

Результаты проверки неравенства Белла опровергают представления *локального реализма*. ЭПР-пара предстает как единый нелокальный объект независимо от расстояния разлета фотонов. При этом каждый фотон по отдельности не существует как обладающий собственными свойствами объект (т.е. как объективная реальность, не зависящая от эксперимента и только проявляющаяся в нем).

Такой результат подрывает саму сущность устройства науки физики, неизменную со времен Аристотеля. На это указывал А. Эйнштейн: «Понятия физики относятся к реальному внешнему миру, т.е. они предполагают идеи о вещах, требующих независимого от воспринимающих субъектов «реального существования» ... Характерным для этих физических объектов является, далее, то, что они мыслятся распределенными некоторым образом в пространственно-временном континууме. Существенным для этого распределения вводимых в физику объектов является требование существования вещей в некоторый момент времени независимо друг от друга, поскольку они «находятся в разных частях пространства». Без признания такой независимости существования («бытия как такового») пространственно отдаленных друг от друга объектов, которое берет свое начало от обыденного мышления, было бы невозможно физическое мышление в привычном для нас смысле» [12, с. 613–614].

### **Базовый эксперимент 5: Интерференция двух фотонов**

Вопрос: различимы ли фотоны?

В 1987 году Хонгом, О и Манделем [25] был проведен эксперимент по интерференции двух одиночных фотонов (см. схему эксперимента на рис. 6). В освещенном лазером нелинейном кристалле спонтанно генерируются пары фотонов. Затем они направляются на полупрозрачное зеркало так, чтобы направление движения 1-го фотона, отраженного от зеркала совпадало с направлением движения прошедшего 2-го фотона и наоборот.

Возможны следующие состояния после прохождения зеркала:

- a) оба фотона прошли сквозь зеркало:  $\Phi 1 \rightarrow D1$ ,  $\Phi 2 \rightarrow D2$  (фотон 1 летит в Детектор 1, фотон 2 летит в Детектор 2);
- b) оба фотона отразились:  $\Phi 1 \rightarrow D2$ ,  $\Phi 2 \rightarrow D1$ .

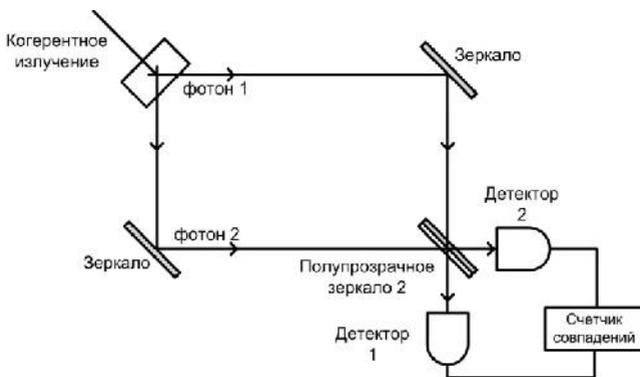


Рис. 6. Схема эксперимента по интерференции двух фотонов

с)  $\Phi 1 \rightarrow D1, \Phi 2 \rightarrow D1$ .

д)  $\Phi 1 \rightarrow D2, \Phi 2 \rightarrow D2$

Рассмотрим фотоны как отличные друг от друга частицы. Тогда по результатам базового эксперимента 1 можно предсказать, что с вероятностью 50% первый фотон будет зарегистрирован в Детекторе 1 и с вероятностью 50% – в Детекторе 2. То же самое можно предсказать и для второго фотона. В результате, с вероятностью 50% оба фотона должны попасть в один детектор, а с вероятностью 50% детекторы должны сработать одновременно.

Эксперимент показал совершенно другой результат: число одновременных срабатываний детекторов оказалась равно нулю. Фотоны регистрируются парами либо в одном детекторе, либо в другом. Как объяснить подавление состояний а) и б)?

Из-за тождественности фотонов, квантовые состояния а) и б) неразличимы: невозможно определить, в детектор Д1 пришел Ф1, или Ф2; также и для детектора Д2. Но состояния а) и б) получаются в результате отражения одного из фотонов от противоположных сторон зеркала, поэтому их фазы отличаются на  $180^\circ$ . Вследствие этого они деструктивно интерферируют и подавляются.

### Противоречия между экспериментами

Базовые эксперименты 1 и 2, взятые совместно, демонстрируют парадокс корпускулярно-волнового дуализма. В эксперименте 1 суще-

ствование неделимой частицы света доказывалось тем, что фотон движется строго по пути 1 или по пути 2, попадает либо в детектор 1, либо в детектор 2, и никогда не «раздваивается» по двум путям. А в эксперименте 2 получен результат, который не может быть объяснен ничем иным, кроме как интерференцией. Суть интерференции в том, что на полупрозрачном зеркале 1 исходная волна делится на две, идущие одновременно по двум путям 1 и 2, и затем образующие суперпозицию на полупрозрачном зеркале 2.

Свет оказывается *немыслимым* объектом, имеющим противоположные и несводимые друг ко другу категориальные характеристики: в эксперименте 1 фотон един, неделим и локализован в пространстве (аналогичен *точке*), в эксперименте 2 фотон распространен в пространстве (аналогичен *отрезку*) и делим (интерferирует «сам с собой»). Проявляясь в одном эксперименте как частица, а в другом как волна, свет оказывается *и не частицей и не волной*. Но частица (тело) и волна (поле) – две фундаментальные онтологические сущности, иных сущностей не было выработано за более чем две тысячи лет существования физической науки, и ничего иного *физика не имеет в качестве арсенала онтологического конструирования*.

Эксперимент 3 показывает, что отдельный фотон обладает поляризацией, проявляющейся как *атрибутивное свойство* фотона. Но результаты эксперимента 4 показывают, что отдельный фотон ЭПР-пары *не имеет собственной поляризации*. Не получается даже мыслить так, будто некоторое направление поляризации имеется имплицитно, и проявляется в измерении. Поляризация фотона *порождается* самим измерением, она – *не атрибутивная, а относительная, функциональная характеристика*.

В эксперименте 4 фотон регистрируется как отдельно существующая частица, как автономный физический объект. Однако результаты эксперимента и математическая форма волновой функции показывают, что единым объектом является ЭПР-пара в целом. Здесь мы опять сталкиваемся с антиномией единого и многого: пара фотонов суть *единый неделимый* объект, хотя при этом налицо *два разных* фотона.

Эксперимент 5 показывает, что фотоны различаются только *нумерически*<sup>5</sup> – какие именно из фотонов «заселяли» в нем определенное квантовое состояние принципиально нельзя различить.

Во втором эксперименте было  $1=2$ , в четвертом  $2=1$ , в пятом:  $1_1=1_2$ .

### Структура знаний квантовой механики

Согласно схематизму рис.1. система знаний надстраивается над эмпирическим базисом. Покажем принципиальное устройство этой структуры на примере двух базовых экспериментов: 3 и 5.

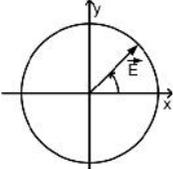
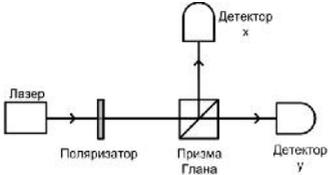
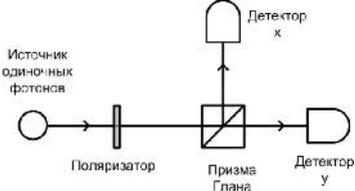
Классический поляризованный свет	Поляризация одиночного фотона
$\vec{E}(t) = \text{Re}[(E'_x + iE''_x)e^{-i\omega t}] \vec{e}_x + \text{Re}[(E'_y + iE''_y)e^{-i\omega t}] \vec{e}_y$	$ \psi(t)\rangle = (a'_x + ia''_x)e^{-i\omega t}  x\rangle + (a'_y + ia''_y)e^{-i\omega t}  y\rangle$
	
	

Табл. 1. Три «этажа» системы научных знаний для описания поляризации классического света и одиночного фотона

<sup>5</sup> Когда неразличимые сущности различаются по их количеству, это называется нумерическим различием, например, две нумерически различные единицы: 1 и 1.

Чтобы показать на простом примере как «работающий физик» использует одновременно и классические, и квантовые представления в Таблице 1 представлены параллельно «три этажа» системы знаний классической физики о поляризации света (слева) и ее квантового аналога, поляризации одиночного фотона (справа). Первый «этаж» классической системы представляет собой экспериментальную установку, состоящую из источника поляризованного света (лазер и поляризатор), а также измерительного прибора, включающего призму Глана – Тейлора и два детектора. Онтологическая модель классической физики (второй «этаж») описывает поляризацию света как вектор напряженности электрического поля электромагнитной волны, изменяющийся во времени<sup>6</sup>. Возможны как линейная, так и эллиптическая (правовинтовая и левовинтовая) поляризации. На третьем «этаже» находятся уравнения эволюции вектора  $\vec{E}$  как функции координат и времени. Для единообразного математического описания поляризации всех видов на третьем «этаже» используется переход из «физического» пространства в математическое пространство комплексных векторов, введением «вектора»  $\vec{\varepsilon}$ , проекции которого на оси  $Ox$  и  $Oy$  являются комплексными числами:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= E'_x + iE''_x \\ \varepsilon_y &= E'_y + iE''_y\end{aligned}$$

Здесь предполагается, что свет распространяется вдоль оси  $Oz$ . Возврат к «обычному» вектору напряженности электрического поля  $\vec{E}(t)$  производится взятием реальной части от комплексных проекций. Призма Глана разделяет входящий луч на два луча, в одном из которых вектор электрического поля направлен вдоль оси  $Ox$  (обыкновенный луч) и равен  $\text{Re}[\varepsilon_x e^{-i\omega t}] \vec{e}_x$ , а во втором вектор электрического поля направлен вдоль оси  $Oy$  (необыкновенный луч) и равен  $\text{Re}[\varepsilon_y e^{-i\omega t}] \vec{e}_y$ . При этом доля интенсивности входящего луча света, измеряемая детектором  $x$  в экспериментальной установке равна

<sup>6</sup> Хотя знаковые изображения пространственно-временных отношений апеллируют к чувственной наглядности, онтологические модели не сводятся к последней. С одной стороны, они организуют умозрение физического объекта, а с другой стороны являются математическим объектом, выступая *посредником* между первым и третьим «этажами» структуры знания [6].

$$\frac{|\varepsilon_x|^2}{|\varepsilon_x|^2 + |\varepsilon_y|^2},$$

а доля интенсивности, измеряемая детектором  $y$  равна

$$\frac{|\varepsilon_y|^2}{|\varepsilon_x|^2 + |\varepsilon_y|^2}.$$

Таким образом, математический аппарат третьего «этажа» позволяет предсказать результаты эксперимента на первом «этаже».

Теперь перейдем к квантовому аналогу (правый столбец). Соответствующий первый «этаж» представляет собой базовый эксперимент 3, установка которого получается из предыдущей при замене лазера на источник одиночных фотонов. Поляризация одиночного фотона не может быть изображена как вектор направления электрического поля в электромагнитной волне, поскольку единичный фотон – и не волна, и не частица (см. базовые эксперименты 1 и 2). На третьем «этаже» поляризация одиночного фотона описана как *квантовое состояние*, представляемое вектором  $|\psi\rangle$  в двумерном гильбертовом пространстве. Математическое понятие *вектора состояния*  $|\psi\rangle$  (или *волновой функции*  $\psi$ ) является фундаментальными понятиями квантовой физики, собирающим на себе основные физические понятия квантовой физики: *состояния* квантового объекта, *суперпозиции* состояний и *вероятности*.

Вектор  $|\psi\rangle$  можно записать в виде линейной комбинации векторов  $|x\rangle$  и  $|y\rangle$ , соответствующих поляризациям вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  соответственно.

$$|\psi\rangle = a_x |x\rangle + a_y |y\rangle$$

где коэффициенты  $a_x$  и  $a_y$  являются комплексными числами

$$\begin{aligned} a_x &= a'_x + i a''_x \\ a_y &= a'_y + i a''_y \end{aligned}$$

причем выполняется условие нормировки:

$$|a_x|^2 + |a_y|^2 = 1$$

Вероятность того, что фотон будет зарегистрирован детектором  $x$  равна  $|a_x|^2$ , а вероятность регистрации детектором  $y$  равна  $|a_y|^2$ .

Видна очевидная аналогия между первыми «этажами» и третьими «этажами» Таблицы 1, но при этом отсутствует онтологическая модель фотона с поляризацией на втором «этаже».

В качестве второго примера рассмотрим систему знаний, характеризующих ЭПР состояние двух фотонов (Таблица 2). На первом «этаже» находится установка ЭПР-эксперимента. Состояние ЭПР-пары на третьем «этаже» описывается вектором состояния

$$|\psi_{\text{EPR}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle_1|x\rangle_2 - |y\rangle_1|y\rangle_2)$$

Принято говорить, что фотоны находятся в *спутанном (перепутанном) состоянии* – для каждого фотона по отдельности нельзя написать вектор состояния. Иначе говоря, *ни одному из фотонов ЭПР-пары нельзя приписать никакое состояние поляризации*, вектором состояния обладает только *вся пара целиком*. Гильбертово пространство, в котором существует вектор  $|\psi_{\text{EPR}}\rangle$ , является прямым произведением поляризационных пространств первого фотона и второго фотона. Его базис состоит из четырех векторов  $|x\rangle_1|x\rangle_2$ ,  $|x\rangle_1|y\rangle_2$ ,  $|y\rangle_1|x\rangle_2$  и  $|y\rangle_1|y\rangle_2$ . В этом пространстве спутанное состояние пары фотонов выступает как единый математический объект. Расчет вероятностей измерений поляризаций как первого, так и второго фотона на третьем «этаже», дает предсказание корреляции их результатов в полном согласии с результатами эксперимента на первом «этаже». Но для ЭПР-состояния отсутствует не только онтологическая модель, но и ее классический аналог.

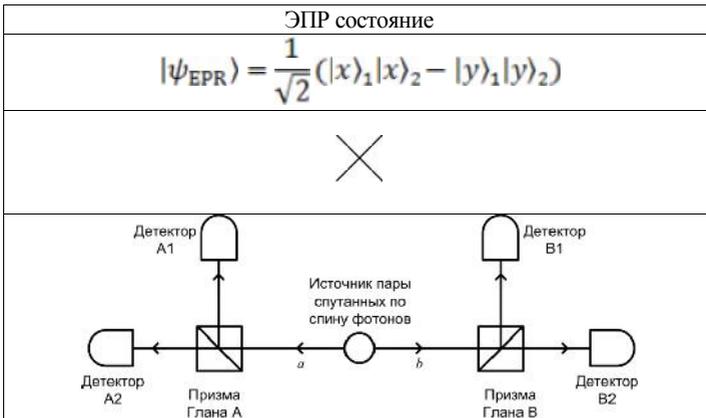


Табл. 2. Три «этажа» системы научных знаний для описания ЭПР состояния двух фотонов.

## Программа создания объединенной теории

На разработку интерпретаций в течение почти целого столетия были направлены огромные усилия. Сегодня известно более десятка различных интерпретаций [8; 28], все они конкурируют друг с другом и в той или иной степени неудовлетворительны. Можно предположить, что задача построения интерпретации квантовой механики не может быть решена в существующей постановке. По всей видимости, постановка задачи должна быть расширена и переопределена.

Современная физическая картина мира, следуя Бору, разделяет окружающую действительность на квантовый (условно – микроскопический) мир и классический (макроскопический) мир (см. рис. 7).

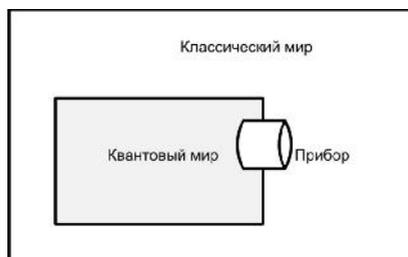


Рис. 7. Современная физическая картина мира

В этой картине эволюция квантового мира подчиняется уравнениям квантовой теории (уравнениям нерелятивистской квантовой механики либо квантово-полевые уравнениям, в зависимости от ситуации). Динамика классического мира описывается уравнениями классической либо релятивистской механики, включая общую теорию относительности. Единственной возможностью для исследователей, принадлежащих классическому миру, выяснить, что происходит в квантовом мире, является использование измерительных приборов. Согласно Бору прибор, производя измерения над квантовым миром, необратимо изменяет его.

Описанная выше картина мира демонстрирует несомненные достоинства, позволяющие предсказывать результаты многочисленных экспериментов с одиночными элементарными частицами, атомами, молекулами и спутанными состояниями нескольких частиц с точностью, недоступной на более ранних этапах развития физики. Но она же обладает следующими очевидными недостатками:

1. *Не существует общего математического языка описания для квантового мира и классического мира.* Это, в частности означает, что классическая механика не является предельным случаем квантовой теории. Физики успешно применяют квазиклассическое приближение для описания квантовых систем в «классических» условиях. Однако, квазиклассические решения квантовых уравнений не эквивалентны классическим состояниям системы. К ним применим один из основных постулатов квантовой теории, принцип суперпозиции. Но возможность существования суперпозиции существенно различных макроскопических состояний, очевидно, противоречит всему нашему практическому и экспериментальному опыту.

2. *Нет адекватной теории описания измерений.* В существующей физической картине мира измерительные приборы находятся в «мертвой» зоне. Они не могут быть описаны ни квантовой, ни классической теорией. Неудивительно, что многочисленные попытки построить физическую теорию измерений, не сводящуюся к простой феноменологии, провалились.

3. *Проблемы с интуитивным пониманием физических явлений.* Необходимость при рассмотрении явления мыслить одновременно в квантовых и классических понятиях, противоречащих друг другу, регулярно вызывает у профессионалов состояние резкого кризиса адекватности понимания.

Мы считаем, что необходимо развернуть комплексную исследовательскую программу развития квантовой механики, включающую следующие компоненты:

1. эпистемологическое распрямление наличной квантовой теории;
2. разработка онтологии объединенной квантово-классической теории;
3. создание математического аппарата объединенной теории, описывающего классическую и квантовую механику, а также процедуру измерения как предельные случаи.

***А) Проблема объективации: к эпистемологическому анализу квантовой теории***

«Работающие физики», с одной стороны, используют классические «затраченные» модели, с другой – мысленно оперируют принци-

пиальными схемами базовых экспериментов, подобно тому, как в доньютоновской механике оперировали пятью простыми механизмами. При этом физики в той или иной степени натурализуют математический формализм («считывают» устройство реальности с устройства волновой функции). Они либо прямо считают волновую функцию «реальной», либо присоединяются к одной из интерпретаций квантовой механики, либо занимают «копенгагенскую позицию» с характерным «вето» на попытки онтологизации.

Следует признать правоту Н. Бора: в квантовой механике отчетливо проявляется недостаток рассудочного реализма и натуралистического подхода к познанию. Объективная реальность существует через реальность деятельности – опытно-практической и познавательной, – на что указывал еще И. Кант, противопоставив «вещь для нас» потусторонней всякому опыту «вещи самой по себе». Об этом, мы полагаем, пишет Н. Бор, утверждая, что квантовый объект нельзя рассматривать вне контекста экспериментальной установки в целом и что проблемой является разграничения объекта и прибора. Однако, с нашей точки зрения, Н. Бор не прав в том, что результатом своего философско-методологического анализа делает позитивистский вывод о невозможности и ненужности объективации. Скорее прав А. Эйнштейн, указывающий, что в таком случае физика теряет собственную предметность.

С позиции деятельностного подхода объектом может быть только объект деятельности или знания, это мыслительная конструкция, основанная на идеализации [10]. Ее неверно приписывать «самой природе», что подтверждается исторически-преходящим характером любых знаний в истории науки. И вместе с тем объект – не плод субъективной фантазии или чувственно-наглядной достоверности. Еще И.Г. Фихте показывал, что *объект* является *средством* самоорганизации и развития деятельности. Например, построив новый объект – механическое движение как таковое – Г. Галилей открыл человечеству горизонты практики, недоступные для аристотелева мира. Диалектика деятельного подхода состоит в том, что, отвергая натуралистическую установку как предельную философскую рамку, он признает натурализм в качестве необходимого момента мышления и деятельности.

Итак, ситуация заключается в том, что, при наличии разработанной системы знаний квантовой физики, до сих пор не удалось осуществить требуемую *объективацию*. Это понуждает сделать характерный методологический разворот: от реальности квантовых систем следует

обратиться к реальности объективации, к методам и нормам объективирующего мышления как такового. На первом этапе программы нужно сменить предмет исследования с натурально-физического на эпистемологический.

Так, например, эксперименты 1 и 2 показывают свойства фотона, противоречащие друг другу, а в эксперименте 4 у фотона из ЭПР-пары отсутствует поляризация как атрибутивное свойство. В этом можно видеть проблему, типичную для раннего периода становления любой науки<sup>7</sup>: первоначальные знания «схватывают» объект *в функциональном рассмотрении*, в зависимости от той или иной ситуации взаимодействия с материальной действительностью. «Переход к структурно-морфологическим представлениям объекта – это огромный шаг вперед в развитии познания. Он дал возможность аккумуляции различных функциональных картин действительности, возможность свертывания их в одной картине. ... Это аналогично введению некоторой единой системы координат или единой системы единиц измерения» [7].

Н. Бор видел здесь проявление релятивизма знания: «Несмотря на все различия между физическими проблемами, породившими теорию относительности и теорию квантов, если сравнивать релятивистский и дополненный способ описания в их чисто логическом аспекте, то бросается в глаза замечательное сходство в отношении отказа от придания абсолютного смысла обычным физическим атрибутам объектов.» [1, с. 431] Бор подчеркивал «неоднозначность, присущую всякой попытке приписать определённые физические атрибуты объектам в тех случаях, когда имеем дело с явлениями, не допускающими резкого разграничения между поведением объектов самих по себе и их взаимодействием с измерительными приборами» [1, с. 427]. В.А. Фок формулировал эту особенность квантовой физики в форме *принципа относительности к средствам наблюдения*. При этом фундаментальную случайность квантовых явлений он соотносил с регулированием возможностей посредством приборных установок: «Законы квантовой физики, которые проявляются во взаимодействии объекта с прибором, должны учитывать как возможность выбора приборов разного типа, так и потенциальные возможности реагирования объекта на включение того или иного прибора. ... Уже само понятие вероятности говорит о потенциальных возможностях... Пока прибор не выбран и не приведен

---

<sup>7</sup> С этой точки зрения квантовая физика предстает не законченной теорией, а областью знания, проходящей ранний период первоначального становления.

в действие, существуют только потенциальные возможности, совокупность которых и характеризует состояние объекта» [9, с. 649].

Показателен пример того, как А. Эйнштейн разрешил онтологическую проблему релятивизма, описав измерения времени и длины как операции с идеализированными часами и нерастяжимыми стержням [11]. Этот деятельностный операционализм впоследствии был снят в определенных представлениях о пространстве-времени Минковского. Таким образом, объективация в теории относительности была осуществлена за счет двух процедур: а) операционального моделирования измерений, б) задания законов (правил) преобразования знаний при переходах между системами отсчета и определения инвариантов этих преобразований.

Однако непосредственно перенести этот способ объективации на случай инструментального релятивизма не удастся. По-видимому, требуется как-то моделировать «сущностное устройство» прибора, или строить теорию прибора как такового. Но прибор не является естественным объектом, он – искусственно-инженерная конструкция, и, значит, теория прибора должна задавать логику переходов между «естественным» и «искусственным».

Рассмотрим, например, интерферометр (см. эксперименте 2). Видя в нем структуру физических тел, с которыми взаимодействует фотон, мы не усмотрим искусственной специфики. В чем ее искать? Обращаясь к истории науки, мы обнаруживаем, что первый интерферометр был создан Т. Юнгом, причем в проблемной ситуации спора между сторонниками корпускулярной и волновой гипотез света, длившегося более ста лет. Т. Юнг провел критический эксперимент, подтвердивший волновую теорию. Можно предположить, что конструкция прибора есть не что иное, как инобытие мысленного эксперимента, который задумывался как критический и единый в отношении к противоположными объектами – частице и волне. Но значит, *эмпирический факт* интерференции фотона несет в себе форму *конструкции*, задающей столкновение противоположностей и снимающей его особым образом.

Мы можем предположить, что для разрешения проблемы объективации недостаточно только операционального моделирования процедуры измерения, требуется более глубокое – культурно-историческое – распрямление экспериментальных установок. Должны быть выявлены исходные исторические противоречия, снимающие их идеализации и конфигурации категорий, материализованные в приборах. Именно эти основания и конструкции должны быть переопределены и заново конфигурированы при разрешении онтологической проблемы.

### **Б) Понятие события: к построению онтологии объединенной теории**

На наш взгляд, базовым категориальным понятием новой онтологии должно стать понятие *события*. В современной физической картине мира существует единственный вид события в приложении к квантовому миру – это измерение, происходящее во взаимодействии квантовой системы с измерительным прибором. Но у нас нет адекватного теоретического аппарата описания даже для таких событий, поскольку эволюция измерительного прибора не удовлетворяет ни уравнениями классической механики, ни уравнениями квантовой теории. С другой стороны современная наука явно сталкивается с примерами явлений на молекулярном уровне, которые могут считаться событиями но, очевидно, не являются измерениями. К таким явлениям можно отнести поглощение одиночного фотона и спонтанное излучение одиночного фотона молекулой, а также элементарный акт химической трансформации молекулы в экспериментах по спектроскопии одиночных молекул.

Более явным примером события, отличного от измерения, могло бы быть испускание фотона идеальным источником одиночных фотонов по запросу (*single photon source on demand*). Идеальным можно назвать источник, который порождает срабатывание подключенного к нему напрямую детектора одиночных фотонов с вероятностью 100% после подачи запроса. В настоящий момент лучшие образцы источников по запросу на одиночных квантовых точках демонстрируют вероятность испускания фотона выше 70%. В случае идеального источника, даже не проводя измерения, мы были бы уверены в том, что после подачи запроса фотон испущен (то есть произошло явно необратимое событие, не являющееся измерением) с вероятностью 100%.



Рис. 8. Физическая картина мира в объединенной квантово-классической теории

Математический аппарат объединенной теории, по всей видимости, должен объединять «явную» классическую динамику, базирующуюся на событиях (актуальное бытие) и «скрытую» квантовую динамику (потенциальное бытие).

В результате этой исследовательской программы должна появиться новая физическая картина мира. Один из вариантов подобной картины мира (см. рис. 8) выглядит следующим образом. Квантовый мир представляет собой «океан», в котором происходит квантовая эволюция, недоступная для наблюдений. Классический мир – подобен льду на поверхности. Квантовая эволюция приводит к возникновению событий – «пробоев» льда, наблюдаемых следов на поверхности льда. События необратимым образом меняют состояние квантового мира. Вся динамика классического мира представляет собой лишь последовательность событий, связывание следов.

*Событие* должно обладать следующими признаками:

1. Событие – это не обязательно измерение
2. Измерение – это специально спроектированное событие
3. Событие необратимо
4. Событие дискретно (неделимо)
5. Событие классично (не может быть суперпозиции событий)
6. Некоторые события не являются локальными

Если рассматривать существующие теории, то наиболее близкой к заявляемому подходу представляется расширенная квантовая теория с событиями (Event-enhanced quantum theory), предложенная Blanchard и Jadczyk [18–20 26]. В этой теории рассматривается параллельная (дуальная) динамика квантовой и классической систем, которая названа авторами *бинамикой*. Краткое описание математического аппарата ЕЕQT дано в Приложении. Явным недостатком этого подхода является отсутствие общего онтологического определения события.

## Заключение

Мы проанализировали состояние квантовой физики в контексте современной ситуации в науке, инженерии и философии, на примере экспериментов с фотонами мы рассмотрели принципиальную структуру знаний в квантовой механике. В результате было реконструировано поле проблем. Прделанный анализ убеждает нас в бесперспективно-

сти поиска новых интерпретаций существующей квантовой теории. Мы выдвинули тезис о необходимости запуска научно-философской программы, включающей три направления: эпистемологическое (распредмечивание существующей квантовой теории), онтологическое (разработка онтологии новой объединенной квантово-классической теории), теоретическое (создание математического аппарата квантово-классической теории).

## Литература

1. Бор Н. Избранные научные труды. В двух томах. Т. II, М., «Наука», 1971.
2. Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. Пер. с англ. Долгопрудный, Издательский Дом «Интеллект», 2008.
3. Липкин А.И. Метафизика, 2015, № 1 (15), с. 104–112.
4. Липкин Г. Квантовая механика. Новый подход к некоторым проблемам. М., «Мир» 1977.
5. Нейман И., фон. Математические основы квантовой механики. М. «Наука», 1964.
6. Розов М.А. Операция инверсии и инверсивные модели / На теневой стороне. Материалы семинара М.А. Розова по эпистемологии и философии науки в Новосибирском Академгородке. Новосибирск, 1996. С. 172–180.
7. Розов М.А., Розова С. О закономерности формирования науки (на материале почвоведения) / На теневой стороне. Материалы семинара М.А. Розова по эпистемологии и философии науки в Новосибирском Академгородке. Новосибирск, 1996. С. 172–180.
8. Севальников А.Ю. Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
9. Фок В.А. Квантовая физика и философские проблемы. / Нильс Бор. Избранные научные труды. В двух томах. Т. II, М., «Наука», 1971.
10. Щедровицкий Г.П. Синтез знаний: проблемы и методы / Щедровицкий Г.П. Избранные труды. М., 1995. С. 634–666.
11. Эйнштейн А. / Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов в четырех томах. Т. III, М., «Наука», 1965.
12. Эйнштейн А. К электродинамике движущихся тел. / Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов в четырех томах. Т. I, М., «Наука», 1965.
13. Aspect A., Grangier P., and Roger G. Phys. Rev. Lett. 47 (1981) 460–463.
14. Aspect A., Grangier P., and Roger G. Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 91–94.
15. Aspect A., Dalibard J., and Roger G. Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1804–1808.
16. Bell J. Physics 1 (1964) 195–200.
17. Bell J. Rev. Mod. Phys. 38 (1966) 447–452.
18. Blanchard Ph. and Jadczyk A. Phys. Lett. A 175 (1993) 157–164.
19. Blanchard Ph. and Jadczyk A. Ann. Physik 4 (1995) 583–599.
20. Blanchard Ph. and Jadczyk A. Phys. Lett. A 203 (1995) 260–266.
21. Bohm D. Quantum Theory. New York: Prentice-Hall, 1951.
22. Crisp M.D. and Jaynes E.T. Phys. Rev. 179 (1969) 1253–1261.
23. Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. Phys. Rev. 47 (1935) 777–780.

24. Granger P., Roger G. and Aspect A. *Europhys. Lett.* 1 (1986) 173–179.
25. Hong K., Ou Z.Y., and Mandel L. *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987) 2044–2046.
26. Jadczyk A. *Progr. Theor. Phys.* 93 (1995) 631–646.
27. W.E. Lamb Jr. and Scully M.O. The photoelectric effect without photons / *Polarisation, Matiere et Rayonnement*. Presses University de France, 1969.
28. Schlosshauer M., Kofler J., and Zeilinger A. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (2013) 222–230.

## References

1. Nil's Bor. *Izbrannye nauchnye trudy. V dvukh tomakh. T. II, M, «Nauka», 1971. (in Russ)*
2. Dzh. Grinshteyn, A. Zayonts. *Kvantovyy vyzov. Sovremennyye issledovaniya osnovaniy kvantovoy mekhaniki. Per. s angl. Dolgoprudnyy, Izdatel'skiy Dom «Intelpekt», 2008. (in Russ)*
3. A.I. Lipkin, *Metafizika*, 2015, № 1 (15), s. 104–112. (in Russ)
4. G. Lipkin. *Kvantovaya mekhanika. Novyy podkhod k nekotorym problemam. M., «Mir» 1977. (in Russ)*
5. I. fon Neyman, *Matematicheskie osnovy kvantovoy mekhaniki. M. «Nauka», 1964. (in Russ)*
6. M.A. Rozov. *Operatsiya inversii i inversivnyye modeli. / Na tenevoy storone. Materialy seminar M.A. Rozova po epistemologii i filosofii nauki v Novosibirskom Akademgorodke. Novosibirsk, 1996. S. 172–180. (in Russ)*
7. M.A. Rozov, S. S. Rozova, *O zakonomernosti formirovaniya nauki (na materiale pochvovedeniya) / Na tenevoy storone. Materialy seminar M. A. Rozova po epistemologii i filosofii nauki v Novosibirskom Akademgorodke. Novosibirsk, 1996. S. 172–180. (in Russ)*
8. A.Yu. Seval'nikov, *Interpretatsii kvantovoy mekhaniki: V poiskakh novoy ontologii. M., Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2009. (in Russ)*
9. V.A. Fok, *Kvantovaya fizika i filosofskie problemy. / Nil's Bor. Izbrannye nauchnye trudy. V dvukh tomakh. T. II, M, «Nauka», 1971. (in Russ)*
10. G.P. Shchedrovitskiy. *Sintez znaniy: problemy i metody. / Shchedrovitskiy G. P. Izbrannye trudy. M., 1995. s. 634–666. (in Russ)*
11. A. Eynshteyn / Al'bert Eynshteyn. *Sobranie nauchnykh trudov v chetyrekh tomakh. T. III. M., «Nauka», 1965. (in Russ)*
12. A. Eynshteyn. *K elektrodinamike dvizhushchikhsya tel. / Al'bert Eynshteyn. Sobranie nauchnykh trudov v chetyrekh tomakh. T. I. M., «Nauka», 1965. (in Russ)*
13. A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 47 (1981) 460–463.
14. A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 91–94.
15. A. Aspect, J. Dalibard, and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 49 (1982) 1804–1808.
16. J. Bell, *Physics* 1 (1964) 195–200.
17. J. Bell, *Rev. Mod. Phys.* 38 (1966) 447–452.
18. Ph. Blanchard and A. Jadczyk, *Phys. Lett. A* 175 (1993) 157–164.
19. Ph. Blanchard and A. Jadczyk, *Ann. Physik* 4 (1995) 583–599.
20. Ph. Blanchard and A. Jadczyk, *Phys. Lett. A* 203 (1995) 260–266.
21. D. Bohm. *Quantum Theory*. New York: Prentice-Hall, 1951.
22. M.D. Crisp and E.T. Jaynes, *Phys. Rev.* 179 (1969) 1253–1261.
23. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, *Phys. Rev.* 47 (1935) 777–780.

24. P. Granger, G. Roger, and A. Aspect, *Europhys. Lett.* 1 (1986) 173–179.
25. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* 59 (1987) 2044–2046.
26. A. Jadczyk, *Progr. Theor. Phys.* 93 (1995) 631 – 646.
27. W.E. Lamb Jr. and M.O. Scully, The photoelectric effect without photons. / *Polarisation, Matiere et Rayonnement.* Presses University de France, 1969.
28. M. Schlosshauer, J. Kofler, and A. Zeilinger, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 44 (2013) 222–230.

## Приложение

Аппарат квантовой теории с событиями (ЕЕQT) описывается следующей математической процедурой. В каждый момент времени система находится в некотором классическом состоянии, обозначаемом греческой буквой. Квантовая динамика в классическом состоянии  $\alpha$  описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}|\Psi_{\alpha}(t)\rangle = \left(-\frac{i}{\hbar}\hat{H}_{\alpha} - \frac{1}{2}\hat{\Lambda}_{\alpha}\right)|\Psi_{\alpha}(t)\rangle \quad (1)$$

где  $|\Psi_{\alpha}(t)\rangle$  - вектор состояния системы и  $\hat{H}_{\alpha}$  - гамильтониан в классическом состоянии  $\alpha$ . Нормировка волновой функции не сохраняется, из-за наличия в правой части уравнения эрмитового оператора  $\hat{\Lambda}_{\alpha}$ . Вероятность того, что система к моменту времени  $t$  останется в классическом состоянии  $\alpha$  (вероятность отсутствия события) равна:

$$P_{\alpha}(t) = \langle\Psi_{\alpha}(t)|\Psi_{\alpha}(t)\rangle$$

**Событием** в ЕЕQT является скачкообразный переход в другое классическое состояние. Пусть в момент времени  $t_1$  произошло событие. Вероятность того, что в результате этого события система перейдет в классическое состояние  $\beta$  определяется выражением

$$p_{\alpha\rightarrow\beta} = \frac{\langle\Psi_{\alpha}(t_1)|\hat{g}_{\beta\alpha}^{\dagger}\hat{g}_{\beta\alpha}|\Psi_{\alpha}(t_1)\rangle}{\langle\Psi_{\alpha}(t_1)|\hat{\Lambda}_{\alpha}|\Psi_{\alpha}(t_1)\rangle}$$

где  $\hat{g}_{\beta\alpha}$  - оператор перехода. Требование нормировки вероятностей дает выражение для оператора  $\hat{\Lambda}_{\alpha}$

$$\hat{\Lambda}_\alpha = \sum_\beta \hat{g}_{\beta\alpha}^\dagger \hat{g}_{\beta\alpha}$$

При этом волновая функция системы в состоянии  $\beta$  сразу после события определяется как

$$|\Psi_\beta(t_1)\rangle = \frac{\hat{g}_{\beta\alpha} |\Psi_\alpha(t_1)\rangle}{\langle \Psi_\alpha(t_1) | \hat{g}_{\beta\alpha}^\dagger \hat{g}_{\beta\alpha} | \Psi_\alpha(t_1) \rangle}$$

#### Сведения об авторах

*Нечипоренко Александр Валерьевич* – кандидат философских наук. Институт философии и права, Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2;  
a.v.nechiporenko@gmail.com

*Французов Павел Анатольевич* – кандидат физико-математических наук. Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 3  
Московский педагогический государственный университет, 119435, г. Москва, ул. Малая Пироговская 1/1  
pavel.frantsuzov@gmail.com

#### Information about the authors

*Nechiporenko Alexander Valeryevich* – Novosibirsk State University 2, Pirogova st., Novosibirsk, 630090, Russia,  
a.v.nechiporenko@gmail.com

*Frantsuzov Pavel Anatolievich* – Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3 Institutskaya st. 3, Novosibirsk 630090, Russia, Moscow Pedagogical State University, 1/1 M. Pirogovskaya str., Moscow, 119991, Russia  
pavel.frantsuzov@gmail.com

Дата поступления 11.05.2020