

2015, № 1 (15)

МЕТАФИЗИКА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

МЕТАФИЗИКА

В этом номере:

- Реляционно-статистическая интерпретация квантовой механики
- Геометрия пространства-времени и квантовая механика
- Анализ интерпретаций квантовой механики
- Из наследия прошлого

2015, № 1 (15)

МЕТАФИЗИКА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2015, № 1 (15)

Основан в 2011 г.

Выходит 4 раза в год

- **РЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**
- **ГЕОМЕТРИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА**
- **АНАЛИЗ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ**
- **ИЗ НАСЛЕДИЯ ПРОШЛОГО**

METAFIZIKA

SCIENTIFIC JOURNAL

(Metaphysics)

No. 1 (15), 2015

Founder:
Peoples' Friendship University of Russia

Established in 2011
Appears 4 times a year

Editor-in-Chief:

Yu.S. Vladimirov, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
at the Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University,
Professor at the Academic-research Institute of Gravitation and Cosmology
of the Peoples' Friendship University of Russia,
Academician of the Russian Academy of Natural Sciences

Editorial Board:

S.A. Vekshenov, D.Sc. (Physics and Mathematics),
Professor at the Russian Academy of Education

P.P. Gaidenko, D.Sc. (Philosophy), Professor at the Institute of Philosophy
of the Russian Academy of Sciences,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

A.P. Yefremov, D.Sc. (Physics and Mathematics),
Professor at the Peoples' Friendship University of Russia,
Academician of the Russian Academy of Natural Sciences

Archpriest Kirill Kopeikin, Ph.D. (Physics and Mathematics),
Candidate of Theology, Director of the Scientific-Theological Center
of Interdisciplinary Studies at St. Petersburg State University,
lecturer at the St. Petersburg Orthodox Theological Academy

V.V. Mironov, D.Sc. (Philosophy), Professor at the Department of Philosophy
at Lomonosov Moscow State University,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences

V.I. Postovalova, D.Sc. (Philology), Professor, Chief Research Associate
of the Department of Theoretical and Applied Linguistics at the Institute
of Linguistics of the Russian Academy of Sciences

A.Yu. Sevalnikov, D.Sc. (Philosophy), Professor at the Institute of Philosophy
of the Russian Academy of Sciences, Professor at the Chair of Logic
at Moscow State Linguistic University

V.I. Yurtayev, D.Sc. (History), Professor at the Peoples' Friendship University
of Russia (Executive Secretary)

S.V. Bolokhov, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor
at the Peoples' Friendship University of Russia, Scientific Secretary
of the Russian Gravitational Society (Secretary of the Editorial Board)

МЕТАФИЗИКА НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2015, № 1 (15)

Учредитель:
Российский университет дружбы народов

Основан в 2011 г.
Выходит 4 раза в год

Главный редактор –

Ю.С. Владимиров – доктор физико-математических наук,
профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор Института гравитации и космологии
Российского университета дружбы народов, академик РАЕН

Редакционная коллегия:

С.А. Векшенов – доктор физико-математических наук,
профессор Российской академии образования

П.П. Гайденов – доктор философских наук,
профессор Института философии РАН, член-корреспондент РАН

А.П. Ефремов – доктор физико-математических наук,
профессор Российского университета дружбы народов, академик РАЕН

Протоиерей Кирилл Конейкин – кандидат физико-математических наук, кандидат богословия, директор Научно-богословского центра междисциплинарных исследований Санкт-Петербургского государственного университета,

преподаватель Санкт-Петербургской православной духовной академии

В.В. Миронов – доктор философских наук, профессор философского факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, член-корреспондент РАН

В.И. Постовалова – доктор филологических наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела теоретического и прикладного языкознания Института языкознания РАН

А.Ю. Севальников – доктор философских наук, профессор Института философии РАН, профессор кафедры логики Московского государственного лингвистического университета

В.И. Юртаев – доктор исторических наук, профессор Российского университета дружбы народов (ответственный секретарь)

С.В. Болотов – кандидат физико-математических наук, доцент Российского университета дружбы народов, ученый секретарь Российского гравитационного общества (секретарь редакционной коллегии)

ISSN 2224-7580

CONTENTS

EDITORIAL NOTE	6
RELATIONAL STATISTICAL INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS	
<i>Vladimirov Yu.S.</i> A Relational Statistical Interpretation of Quantum Mechanics	10
<i>Aristov V.V.</i> Relational Statistical Concept of Space-Time and New Possibilities of Description	25
<i>Belinsky A.V., Lapshin V.B.</i> A Model of the Photon: An Electromagnetic Field or the Concept of Long-Range Action?	37
THE GEOMETRY OF SPACE-TIME AND QUANTUM MECHANICS	
<i>Sevalnikov A.Yu.</i> The Concept of Existence in Modern Quantum Mechanics	50
<i>Vekshenov S.A.</i> Generation of Space-Time from Abstract Structures of Quantum Mechanics	68
<i>Erekayev V.D.</i> On Space in Quantum Mechanics	79
ANALYSIS OF INTERPRETATIONS OF QUANTUM MECHANICS	
<i>Archpriest Kirill Kopeikin.</i> Einstein’s Mouse, Schroedinger’s Cat and Wigner’s Friend: The Opening of an “Inner” Reality	92
<i>Lipkin. A.I.</i> The Quantum Particle and the Postulates Determining It in a “Theorphysical” Interpretation	104
<i>Panov A.D.</i> Bell’s Theorem, the Calculability of the Quantum Theory and the Relativity of Local Realism	114
<i>Terekhovich V.E.</i> Modal Approaches in Metaphysics and Quantum Mechanics	129
FROM THE LEGACY OF THE PAST	
<i>Mandelstam L.I.</i> Lectures on the Foundations of Quantum Mechanics	153
<i>Alekseyev I.S.</i> Towards the Question of Validity of Using the Concepts of Space and Time in the Physics of the Microworld	165
OUR AUTHORS	171

© Metafizika. Authors. Editorial Board.
Editor-in-Chief Yu.S. Vladimirov, 2015
© Peoples' Friendship University of Russia, Publishing House, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ	6
РЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ	
<i>Владимиров Ю.С.</i> Реляционно-статистическая интерпретация квантовой механики	10
<i>Аристов В.В.</i> Реляционно-статистическая концепция пространства-времени и новые возможности описания	25
<i>Белинский А.В., Лапшин В.Б.</i> Модель фотона: электромагнитное поле или концепция дальнего действия?	37
ГЕОМЕТРИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА	
<i>Севальников А.Ю.</i> Концепция существования в современной квантовой механике	50
<i>Векшенов С.А.</i> Генерация пространства-времени из абстрактных структур квантовой механики	68
<i>Эрекаев В.Д.</i> О пространстве в квантовой механике	79
АНАЛИЗ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ	
<i>Протоиерей Кирилл Копейкин.</i> Мышь Эйнштейна, кот Шрёдингера и друг Вигнера: открытие «внутренней» реальности	92
<i>Липкин А.И.</i> Квантовая частица и определяющие ее постулаты в «теорфизической» интерпретации	104
<i>Панов А.Д.</i> Теорема Белла, вычислимость квантовой теории и относительность локального реализма	114
<i>Терехович В.Э.</i> Модальные подходы в метафизике и квантовой механике	129
ИЗ НАСЛЕДИЯ ПРОШЛОГО	
<i>Мандельштам Л.И.</i> Лекции по основам квантовой механики	153
<i>Алексеев И.С.</i> К вопросу о правомерности применения понятий пространства и времени в физике микромира	165
НАШИ АВТОРЫ	171

ОТ РЕДАКЦИИ

В настоящее время высказываются разные соображения о времени рождения квантовой механики. Одни предлагают начинать отсчет от основополагающей гипотезы М. Планка в самом начале XX в., другие – со времени пионерских работ Н. Бора о строении атома (1913 г.), третьи – от идей Л. де Бройля и Э. Шредингера о волновой природе частиц (середина 1920-х гг.), наконец, четвертые – от создания копенгагенской интерпретации квантовой механики. Так или иначе, но дискуссии о природе квантовых закономерностей начались с самых первых шагов на пути создания квантовой механики и продолжают, не затихая, уже в течение более ста лет.

Сам по себе феномен квантовой теории уникален. Она добилась впечатляющих успехов в описании, использовании и предсказаниях явлений в условиях их существенного непонимания. По сути, квантовая теория является эффективным инструментом осуществления расчетов в довольно широкой области явлений, границы которой, надо признать, очерчены весьма приблизительно. При этом следует отметить, что квантовая механика занимает уникальное положение среди физических теорий – она не опирается исключительно на свою собственную систему понятий и принципов, а самым существенным образом использует представления классического пространства-времени и классической механики. Об этом, в частности, пишется в «Квантовой механике» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица: «...квантовая механика занимает очень своеобразное положение в ряду физических теорий – она содержит классическую механику как свой предельный случай и в то же время нуждается в этом предельном случае для самого своего обоснования» [1. С. 16].

Это и ряд других обстоятельств оказались причиной того, что до сих пор многие считают, что в квантовой механике (теории) содержится нечто таинственное, до сих пор неразгаданное, причем так думают не только дилетанты, но так считали и классики теоретической физики, внесшие значительный вклад в становление квантовой физики. Приведем ряд их высказываний по этому вопросу.

Луи де Бройль: «Что касается меня, то я начал заниматься квантами, когда мне было около двадцати лет, и продолжал изучать их в течение четверти века. И все же я должен честно признаться, что если за это время я и добился несколько более глубокого понимания некоторых сторон этого вопро-

са, то я не могу еще с полной уверенностью сказать, что таится под маской, скрывающей подлинное лицо квантов» [2. С. 7].

М. Ляуэ: «Квантовая механика математически применяется с большим мастерством, но ее физическое содержание, по моему мнению, до сих пор не вполне ясно. <...> Дальнейшее развитие квантовой теории, например, вопрос о совместимости волнового и корпускулярного представлений в настоящее время не является еще исторически зрелым» [3. С. 162].

А. Эйнштейн: «Нет сомнения, что в квантовой механике имеется значительный элемент истины и что она станет пробным камнем для любой будущей теоретической основы, из которой она должна будет быть выведена как частный случай, подобно тому, как электростатика выводится из уравнений Максвелла для электромагнитного поля или термодинамика из классической механики. Однако я не думаю, что квантовая механика является *исходной точкой* поиска такой основы» [4. С. 56].

Р. Фейнман: «Но, мне кажется, я смело могу сказать, что квантовой механики никто не понимает» [5. С. 139]. В своей Нобелевской лекции он также заметил: «Я хочу сказать, что, по-моему, сейчас еще нет удовлетворительной квантовой электродинамики, хотя я и не уверен в этом до самого конца» [5. С. 227].

А один из физиков даже заявил: «Основания квантовой механики – это то, на чем будет вечно покоиться ее прах».

И сегодня мысль о неполноте (или незавершенности) квантовой механики (теории) остается вполне актуальной. Следствием этой неполноты как раз и является множество интерпретаций квантовой теории, обсуждению которых посвящен данный выпуск журнала.

Относиться к сложившейся ситуации можно двояко.

Первый путь заключается в том, чтобы признать *status quo* данной ситуации и углублять копенгагенскую, фейнмановскую, эвереттовскую и прочие интерпретации, а также их взаимосвязи. Безусловно, это полезная деятельность, поскольку совокупность таких интерпретаций позволяет лучше понять область явлений, осмыслить которые призвана квантовая теория. По сути, мы здесь сталкиваемся с концепцией языкового релятивизма, в которой каждая интерпретация – это некоторый язык, который описывает определенный «мир». При этом всегда есть опасность, что такой мир психологически может стать уникальным, в то время как осмысление самой области явлений как таковой требует оперирования со всеми возможными языками – интерпретациями.

Второй путь основан на более глубоком подходе к данной проблеме, – он состоит в отказе от априорного использования классических представлений, их замене системой принципиально иных понятий и закономерностей, ответственных за сущности, вскрытые квантовой теорией. Ставится задача не размышлять о сути квантовомеханических представлений на фоне классического пространства-времени, а, наоборот, выводить привычные классические представления из понятий и закономерностей физики микромира.

О постановке этой задачи писал ряд известных физиков-теоретиков (среди них были и некоторые из создателей квантовой теории): Л. де Бройль, Д ван Данциг [6], Л.И. Мандельштам (см. его статью в рубрике «Мысли из прошлого» данного выпуска), Р. Пенроуз и др. В последнее время эта мысль высказывается все чаще. Однако, как правило, эти авторы обращают внимание на исключительную сложность данной задачи.

В данном выпуске журнала представлены оба подхода к интерпретации квантовой механики. Однако нам представляется, что второй путь более плодотворен. Более того, есть достаточно оснований утверждать, что в настоящее время созрели необходимые условия для существенного продвижения на этом пути исследований. Об этом свидетельствует, в частности, все более набирающая силу тенденция замены доминирующей ныне теоретико-полевой парадигмы, в рамках которой сформулирована квантовая теория, на менее известную реляционную парадигму. Здесь у отечественных исследователей имеются несомненные козыри в виде, во-первых, уже созданного у нас математического аппарата теории систем отношений, а во-вторых, ряда ранее высказывавшихся идей в реляционном духе Я.И. Френкелем, И.Е. Таммом, Г.В. Рязановым, Ю.И. Кулаковым и некоторыми другими физиками (см. [8; 9]).

С идеями реляционного подхода к геометрии и к физике можно ознакомиться в 12-м выпуске нашего журнала, специально посвященном обсуждению реляционной парадигмы в физике. В статьях первого раздела данного выпуска обсуждается использование этих идей непосредственно для построения новой реляционно-статистической интерпретации квантовой механики.

Во втором разделе «Геометрия пространства-время и квантовая механика» рассмотрен ряд аспектов связи классических пространственно-временных представлений и квантовой механики. Здесь предлагается обратить особое внимание на то, что физика микромира формулируется на базе комплексных чисел, что обусловлено отсутствием в микромире общепринятого в классике понятия «больше-меньше» (упорядоченности). В связи с постановкой задачи вывода классических представлений из физики микромира возникает необходимость физического обоснования перехода от комплексных чисел (без упорядоченности) к вещественным числам, обладающим этим свойством. Это побуждает еще раз обратиться к истории развития математики в направлении от целых чисел к рациональным, затем к вещественным, потом к комплексным и далее к кватернионам... Теперь, по существу, ставится обратная задача, – как от комплексных чисел прийти к вещественным и даже целым числам. Об этой задаче, в частности, писал Дж. Уилер. Как нам представляется, решение этой проблемы самым непосредственным образом связано с построением теории атомов.

Третий раздел посвящен обсуждению известных интерпретаций квантовой механики, сопоставлению их идеологий, достоинств и недостатков. Все

эти вопросы относятся к ранее названному первому пути исследований по интерпретации квантовой механики.

Наконец, в традиционный для нашего журнала последний раздел «Из наследия прошлого» помещены две статьи. Первая статья представляет собой выдержки из «Лекций по основам квантовой механики» (30-х гг.) академика Л.И. Мандельштама, в которых, в частности, ставилась задача вывода закономерностей макромира из физики микромира. Вторая статья с характерным названием «К вопросу о правомерности применения понятия пространства и времени в физике микромира» была написана в 80-х гг. философом И.С. Алексеевым (выпускником физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова), безвременно ушедшим из жизни в те же годы.

Отметим, что данный выпуск нашего журнала не смог вместить всех предложенных для публикации статей по данному вопросу. По этой причине в следующем номере намечено продолжить обсуждение данной столь важной проблемы явно метафизического характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – М.: Госизд-во физ.-мат. лит-ры, 1963.
2. Бройль Л. де. Революция в физике. – М.: Госатомиздат, 1963. (См. также: Луи де Бройль. Избранные научные труды. Т. 2: Квантовая механика и теория света: работы 1934–1951 годов. – М.: МГУП, 2011. – С. 42–204.)
3. Лауэ М. История физики. – М.: Гостехиздат, 1956.
4. Эйнштейн А. Физика и реальность. – М.: Наука, 1965.
5. Фейнман Р. Характер физических законов. – М.: Мир, 1968.
6. Dantzig D. van. On the relation between geometry and physics and concept of space-time // *Funfzig Jahre Relativitätstheorie. Konferenz Bern, Basel.* – 1955. – Bd. 1. – S. 569.
7. Пенроуз Р. Структура пространства-времени. – М.: Мир, 1972.
8. Владимиров Ю.С. Метафизика. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
9. Владимиров Ю.С. Физика дальнего действия. Ч. 1: Природа пространства-времени. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012.

РЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

РЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Ю.С. Владимиров

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова,
Институт гравитации и космологии РУДН*

Дано обоснование реляционно-статистической интерпретации квантовой теории а также сформулирована тесно связанная с ним главная задача фундаментальной теоретической физики – вывода классических пространственно-временных представлений из более элементарных закономерностей физики микромира. Показано, что эти проблемы могут быть решены лишь в рамках реляционного подхода на базе теории бинарных систем комплексных отношений симметричных рангов. Приведены уже полученные результаты на данном пути исследований.

Ключевые слова. Реляционная природа пространства-времени, интерпретация квантовой теории, макроскопический характер пространства и времени, спиноры, теория атома.

Введение

На заре создания квантовой механики Л. де Бройль писал о том, что ее следует строить не на фоне классического пространства-времени, справедливого лишь для описания макроявлений, а на базе иной геометрии. При этом он написал пророческие слова: «Однако пока мы не добились успеха в распространении наших представлений в указанном направлении, мы должны с большими или меньшими трудностями втиснуть микроскопические явления в рамки понятий пространства и времени, хотя нас все время будет беспокоить чувство, что мы пытаемся втиснуть алмаз в оправу, которая ему не подходит» [1]. Пророчества де Бройля сбываются, и свидетельством этому является состоявшаяся недавно в Институте философии РАН конференция по интерпретации квантовой механики.

В настоящее время открывается новый путь интерпретации и дальнейшего развития квантовой теории – на базе реляционно-статистического подхода к природе классического пространства-времени и физических взаимодействий.

Как известно, существенный вклад в развитие реляционного подхода к физическому мирозданию был сделан Р. Фейнманом. В его работах следует выделить два достижения в этой области: во-первых, это развитие классической теории прямого межчастичного электромагнитного взаимодействия, в рамках которой совместно с Дж. Уилером [2] было показано, что учет принципа Маха позволяет исключить из теории опережающие взаимодействия и тем самым теоретически обосновать принцип причинности. Вторым важным достижением является построение фейнмановского варианта квантования на основе суммирования по историям частиц [3], причем этот результат был получен именно благодаря желанию распространить концепцию дальнего действия с классической физики на квантовую теорию. Как он писал: «Теорию электромагнетизма, развитую Уилером и Фейнманом... можно сформулировать в виде принципа наименьшего действия, содержащего только координаты частиц. Именно попытка проквантовать эту теорию, не обращая к представлению о поле, и привела к изложенной здесь формулировке квантовой механики» [4. С. 202]. Как отмечал сам Фейнман в своей Нобелевской лекции, его знаменитая диаграммная техника была сформулирована в рамках идеологии концепции дальнего действия.

Однако так получилось, что дальнейшие исследования в рамках концепции дальнего действия привели Фейнмана к осторожности и, даже можно сказать, к некоторому разочарованию. Об этом свидетельствуют заключительные слова его Нобелевской лекции:

«А что же стало со старой теорией, в которую я влюбился еще юношей? Она теперь стала почтенной старой дамой, почти совсем потерявшей былую привлекательность. Сердце юноши уж не забьется учащенно при виде ее. Но о ней можно сказать самое лучшее, что можно сказать о пожилой женщине: что она хорошая мать и у нее очень хорошие дети. И я благодарен Шведской Академии наук за высокую оценку одного из них» [5. С. 231].

Заметим, что аналогичная эволюция взглядов от яркой защиты концепции дальнего действия до разочарования ранее произошла и у его предшественника – российского физика-теоретика Я.И. Френкеля, кстати, на работы которого Фейнман ссылался в своей Нобелевской лекции. Напомним что говорил Френкель в 1930 г.: «Позвольте прежде всего доказать вам, что физическим абсурдом является именно представление о близкодействии, а физической реальностью, физически обоснованным является представление о дальнем действии. Как нам ни трудно представить себе это дальнее действие, да еще запаздывающее, все же нам необходимо сделать соответствующее усилие для того, чтобы освободиться от тех привычек, которые сложились у нас в эпоху, когда наши знания были недостаточны» [6. С. 25]. В дальнейшем под напором успехов в развитии квантовой теории поля и ряда других об-

стоятельств Френкель стал отступать, признавая понятие поля, правда, в своеобразном понимании.

Еще раньше нечто подобное происходило и с Эйнштейном, который, создавая общую теорию относительности, следовал реляционным идеям Маха, а когда она была построена, осознал, что общая теория относительности ознаменовала создание новой парадигмы – геометрической. И он фактически отрекся от идей Маха.

А один из корифеев отечественной теоретической физики 20–30-х гг. О.Д. Хвольсон в своем некогда популярном «Курсе физики» даже посвятил специальный параграф критике концепции дальнего действия, где писал: «Термином “action in distans” то есть “действие на расстоянии” обозначается одно из наиболее вредных учений, когда-либо господствовавших в физике и тормозивших ее развитие» [7. С. 181–183]. А в завершении этого параграфа призывал «юных читателей не вдаваться в эту область фантазий» (имелось в виду учение о дальнем действии).

Возникает естественный вопрос о причинах подобных откатов приверженцев дальнего действия от своих взглядов. На это имеется несколько причин как субъективного, так и объективного характера. К основной субъективной причине следует отнести укоренившуюся привычку мыслить в рамках концепции ближнего действия, когда воздействие от одного объекта передается к другому через все промежуточные точки между ними. А к главной объективной причине следует отнести половинчатый, эклектический характер позиций большинства сторонников концепции дальнего действия.

Дело в том, что реляционный подход к физическому мирозданию содержит в себе две неразрывно связанные между собой составляющие: во-первых, это реляционная трактовка природы пространства-времени и, во-вторых, реляционное описание физических взаимодействий, соответствующее концепции дальнего действия. Упомянутые выше видные сторонники концепции дальнего действия опирались лишь на вторую составляющую реляционного подхода, практически полностью игнорируя первую. В их работах пространство-время рассматривалось как априорно заданное, фактически имеющее субстанциальный характер. Это проявилось у Фейнмана в его методе квантования посредством суммирования траекторий на фоне априорно заданного классического пространства-времени. Френкель также предполагал пространство-время заданным и пытался обосновать концепцию дальнего действия на его фоне. При этом позиции этих авторов выглядели недостаточно убедительными для их оппонентов. Но если бы они исходили из реляционного понимания пространства-времени, то использование концепции дальнего действия выглядело бы неизбежным. Правда, тогда дискуссия переместилась бы на выбор одного из двух подходов к природе пространства-времени: реляционного или субстанциального.

Отметим, что сейчас доминирующей является трактовка пространства-времени как самостоятельной сущности, что соответствует субстанциальному подходу, а реляционный взгляд менее известен. В связи с этим напомним

ним, реляционная трактовка природы пространства-времени означает, что оно не является самостоятельной сущностью, а выступает лишь абстракцией от отношений между реально существующими материальными объектами и событиями с их участием. Четкое различие реляционной и субстанциальной трактовок проявилось в известной дискуссии Г. Лейбница с Кларком (а по сути – с И. Ньютоном) [8]. Лейбниц ставил вопрос: останется ли пространство, если из него убрать все вещество? Согласно взглядам Ньютона, оно останется, а Лейбниц считал, что нет, – оно потеряет свой смысл.

Сторонниками реляционного подхода к природе пространства и времени являлись Г. Лейбниц, Д. Беркли, Р.И. Бошкович, Э. Мах и ряд других мыслителей. Вызывает удивление тот факт, что в середине XX в. в дискуссиях сторонников концепций близкодействия или дальнодействия практически не упоминались идеи, отстаивавшиеся в трудах Лейбница и Маха. Ссылки на их работы отсутствуют в трудах Фейнмана, не упоминались идеи Маха и в дискуссиях на рубеже 1920–1930-х гг. в Ленинградском политехническом институте и в других местах. Правда, в отечественных дискуссиях упоминать Маха было небезопасно по известным политическим причинам.

Сейчас в трудах физиков-теоретиков и математиков все чаще высказывается мысль о необходимости замены субстанциального подхода к природе пространства-времени на реляционный, причем, как правило, эти мысли высказываются в связи с обсуждением проблем физики микромира. Так, Б. Грин в своей известной книге «Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории» пишет: «Готфрид Лейбниц и другие шумно спорили, провозглашая, что пространство и время – всего лишь регистрационные приборы для удобной записи соотношений между объектами и событиями во Вселенной. Положение объекта в пространстве и во времени имеет смысл только в сравнении с другим объектом. Пространство и время есть лишь словарь для разговора об этих отношениях, ничего более. Несмотря на то, что точка зрения Ньютона, поддержанная его тремя экспериментально проверенными законами движения, господствовала в течение больше двух сотен лет, концепция Лейбница, развитая австрийским физиком Эрнстом Махом, гораздо ближе к современной картине» [9. С. 242–243].

Реляционная трактовка пространства и времени

Возникает естественный вопрос: что препятствует переходу к реляционным представлениям о природе пространства и времени? Ответ состоит в том, что для реализации этой концепции не было найдено подходящего математического аппарата, который мог бы конкурировать с дифференциальным и интегральным исчислением, самым существенным образом используемым в общепринятой концепции теории поля.

В конце 60-х гг. XX в. такой математический аппарат был предложен Ю.И. Кулаковым в виде математической части так называемой теории фи-

зических структур [10], однако тогда, в расцвете работ в области квантовой теории поля, на него не обратили должного внимания. Лишь академик И.Е. Тамм на закате своих дней оценил новый подход к мирозданию, написав: «В рамках теории физических структур по-новому осмысливается проблема единства мира, – у современных ученых еще силен искус решения этой проблемы в субстанциалистическом духе. Однако не исчерпал ли себя этот подход? С точки зрения теории физических структур более перспективно искать не исходную “первоматерию”, а исходные “первоструктуры”, – такая переформулировка проблемы единства мира представляется нам несравненно более преимущественной и в логическом, и в естественно-научном отношении» [11. С. 2].

Поясним суть математического аппарата, положенного в основу теории физических структур. Без преувеличения можно утверждать, что Кулаковым была открыта универсальная теория отношений между объектами (элементами) произвольной природы. Постулировалось, что между любой парой элементов имеет место некое вещественное **отношение**. Более того, постулировалось, что имеется некий **закон**, которому удовлетворяют парные отношения между любыми r элементами рассматриваемого множества элементов. На основе этих постулатов и вспомогательного предположения о непрерывности множества строилась система функционально-дифференциальных уравнений, из которых были найдены все возможные законы для соответствующих значений r (**ранга** системы отношений). Так, оказалось, что для $r = 5$ имеется 10 и только 10 видов законов, соответствующих 3-мерным геометриям, в число которых попадает геометрия Евклида, гиперболическая геометрия Лобачевского, сферическая геометрия Римана и ряд других известных (и мало известных) геометрий. Для описания 4-мерной геометрии Минковского эту теорию необходимо обобщить на случай ранга $r = 6$. В общем случае ранг r систем отношений (структур) на одном множестве элементов связан с размерностью n соответствующей геометрии соотношением $n = r - 2$.

При этом после получения законов геометрии можно было отказаться от вспомогательного промежуточного предположения о непрерывности и рассматривать дискретные множества элементов, соответствующие реально существующим в мире телам (или частицам). В отсутствии тел теряют смысл отношения между ними, а следовательно, и возникающая на этой основе абстракция в виде классических пространства и времени. Таким образом, был сделан важный шаг в переформулировке геометрии пространства и времени в терминах реляционных представлений, на которых настаивал Г. Лейбниц.

Однако в работах Кулакова и его ученика Г.Г. Михайличенко было сделано еще одно важное открытие, – теория систем отношений была обобщена на случай двух множеств элементов. Она строилась по тем же правилам: теперь постулировались два множества элементов, между элементами противоположных множеств предполагались вещественные отношения, которые

опять должны были удовлетворять неким законам. Теперь ранг закона определялся двумя числами – количествами элементов, учитываемых законом, из двух разных множеств. Опять писались функционально-дифференциальные уравнения и находились все возможные решения (законы). Неожиданным для авторов оказалось то, что решения получившихся уравнений находятся проще, нежели в случае теории на одном множестве элементов. Полученные по прежним правилам теории систем отношений на двух множествах естественно было трактовать как открытие новых – **бинарных геометрий**.

Авторами открытия бинарных систем отношений (геометрий) было показано, что, «сшивая» неким специальным образом элементы из двух противоположных множеств в элементы одного нового множества, можно перейти от бинарных геометрий к общеизвестным унарным геометриям. Важность этого результата трудно переоценить: ведь оказалось, что общепринятые (унарные) геометрии совсем не обязательно рассматривать в качестве первичных, априорно заданных сущностей. Их можно трактовать в качестве вторичных образований из более элементарных бинарных геометрий. Более того, Михайличенко [12] была доказана теорема об отсутствии содержательных теорий на трех и более множествах элементов. Следовательно, есть все основания полагать, что первичными сущностями следует считать именно бинарные системы отношений (геометрии).

Бинарная геометрия и квантовая механика

На этом этапе рассуждений у читателя возникают естественные вопросы: как понимать бинарные геометрии? Каков физический смысл элементов двух различных множеств? Оказывается, бинарные геометрии имеют самое непосредственное отношение к проблеме интерпретации квантовой механики, – к мысли, высказанной Л. де Бройлем на заре ее становления. Чтобы это пояснить, напомним, что одной из наиболее плодотворных формулировок квантовой теории поля является S-матричная формулировка, согласно которой имеются начальные состояния системы (на «минус бесконечности») и некие конечные состояния системы (на «плюс бесконечности») и задача квантовой теории состоит в описании амплитуды вероятности переходов между двумя состояниями. Легко увидеть аналогию между этой постановкой задачи в квантовой теории поля и сутью бинарных геометрий. Надо положить, что одно множество элементов бинарной геометрии описывает начальные состояния системы, а второе множество элементов – конечные состояния, а парные отношения между этими элементами соответствуют амплитудам вероятностей квантового процесса.

Подчеркнем тот факт, что в квантовой теории мы имеем дело с переходами систем из одного состояния в другое. Именно так трактовал Н. Бор модель атома в своих пионерских работах 1913 г.: электромагнитное излучение (или поглощение) происходит при переходе атома из одного состояния в другое. В свою очередь В. Гейзенберг, один из авторов S-матричной форму-

лировки квантовой теории, усмотрел ее связь с аристотелевской трактовкой движения как динамического перехода из одного состояния в возможности в другое. Он писал: «Понятие возможности, которая играет решающую роль в философии Аристотеля, в современной физике снова заняло центральное положение. Математические законы квантовой теории можно рассматривать как количественную формулировку аристотелевских понятий «дьюнамис» или «потенция»» [13].

Однако на пути переформулировки квантовой теории на базе бинарной геометрии встает ряд проблем. Одной из них является тот факт, что квантовая теория и физика микромира вообще строятся на базе комплексных чисел, тогда как геометрия, в том числе и бинарная геометрия, сформулированная в группе Ю.И. Кулакова, построены на базе вещественных чисел. Для преодоления этой трудности необходимо обобщить теорию систем отношений на случай комплексных отношений, что было сделано в наших работах [14–17]. При этом вскрылся ряд чрезвычайно важных моментов.

Первый из них был связан с выбором ранга бинарной системы комплексных отношений (БСКО), необходимого для описания квантовомеханических закономерностей. Во-первых, имея в виду данную выше интерпретацию двух множеств и факт симметрии прошлого и будущего в общепринятой квантовой механике, следовало остановиться на симметричных рангах (r, r) бинарных систем отношений. Во-вторых, естественно было попробовать возможности минимальных рангов. Самый малый ранг $(2, 2)$ оказался вырожденным, – такая система отношений оказывается подсистемой БСКО более высоких рангов. Следующий ранг $(3, 3)$ привел к неожиданному результату: *элементы этой БСКО автоматически описываются 2-компонентными спинорами*. В этой БСКО определяющей оказалась группа $SL(2, C)$, а переход от данной бинарной геометрии к унарной (на одном множестве элементов) привел к 4-мерным векторам в пространстве Минковского.

Полученный результат заставил вспомнить вопрос, которого касался в своих работах еще И. Кант, а затем четко сформулировал Э. Мах [18]: Почему пространство трехмерно? А с открытием специальной теории относительности над проблемой: почему пространство-время является 4-мерным с сигнатурой $(+ - - -)$ размышляли А. Эйнштейн, Эренфест А. Эддингтон и ряд других классиков физики XX века. Оказалось, что *если в качестве исходной сущности избрать бинарную систему комплексных отношений минимального невырожденного ранга $(3,3)$, то мы автоматически приходим к обоснованию как размерности, так и сигнатуры классического пространства-времени*.

Далее пришлось вспомнить теорию твисторов Р. Пенроуза, который специально ее развивал, чтобы из нее получить как классические пространственно-временные представления, так и квантовомеханические закономерности. Однако понятие твистора у Пенроуза фактически соответствовало постулативному введению пары 2-компонентных спиноров с соответствующими

шей группой преобразований, тогда как в теории БСКО ранга (3, 3) спиноры и соответствующая группа возникали автоматически.

Пенроузу при развитии теории твисторов пришлось размышлять также над фундаментальным вопросом о причинах использования комплексных чисел в квантовой теории и вообще в физике микромира. В 2013 г., находясь с визитом в Москве, Пенроуз посвятил этому вопросу специальную лекцию, прочитанную в МГТУ имени Баумана. В этой лекции он заявил, что дело не в том, что комплексные числа упрощают вычисления, как это думают некоторые авторы, а в том, что они ничем не хуже вещественных чисел. Он их даже назвал «божественными числами» (см. также в [19]).

В нашем реляционном подходе на базе бинарных геометрий напрашивается более содержательное обоснование перехода к комплексным числам. Пришлось вспомнить, как происходило развитие математики: сначала на основе положительных целых чисел, затем вообще целых чисел, затем рациональных, вещественных и, наконец, комплексных и далее кватернионов. Каждое очередное обобщение понятия числа вызывало сложности осмысления их сути и роли в мироздании. Аналогичное наблюдается и с осознанием роли комплексных чисел. В частности, пытаются построить всю физическую картину мира, исходя из пространственно-временных отношений, формулируемых в рамках вещественных чисел. Однако, исходя из идеи вывода классической геометрии из БСКО, более естественным представляется обращение рассуждений вспять: попытаться обосновать появление вещественных и даже целых чисел, исходя из комплексных чисел и квантовых закономерностей.

Использование комплексных чисел в физике микромира обусловлено тем, что в микромире нет понятия упорядоченности, то есть нет понятия «больше-меньше». Именно этот факт отображается использованием комплексных чисел. Встав на эту точку зрения, необходимо было показать, какими физическими обстоятельствами обусловлено возникновение понятия упорядоченности. Есть достаточно оснований утверждать, что это осуществляется в квантовомеханической модели атомов. Именно там из решений уравнений для комплексных волновых функций возникают целочисленные собственные значения, характеризующие состояния атомов. В свое время привычный ход рассуждений в рамках классических представлений вызвал немало проблем.

Главная задача фундаментальной теоретической физики XXI в.

Сейчас уже нет нужды доказывать, что в микромире классические пространственно-временные представления теряют силу. Об этом написано уже множество статей и книг. В частности, можно назвать книгу Д.И. Блохинцева «Пространство-время в микромире» [20] и ряд других. Спор идет лишь о том, в каких масштабах это происходит. Называют разные масштабы: планковскую длину (10^{-32} см), характерные размеры элементарных частиц

(от 10^{-17} до 10^{-13} см). Однако нам представляется, что следует говорить об изменениях свойств классических пространственно-временных представлений уже в масштабах атомов (10^{-7} см). Именно там наличие квантовых орбит нарушает закономерности классической физики и геометрии.

Исходя из этих соображений, академик Л.И. Мандельштам еще в 1930-х гг. выдвинул задачу вывода классических представлений из квантовомеханических закономерностей, а не пытался сделать наоборот. В своих лекциях по теоретической физике он писал: «Всякая атомистическая теория, в том числе и квантовая, ставит себе в основном задачу объяснить наблюдаемые закономерности в макромире искомыми закономерностями в микромире. Почему такое сведение нас удовлетворяет, почему мы его называем объяснением процессов макромира, это другой вопрос. На нем я останавливаться здесь не могу. Скажу только, что, по моему мнению, для такой точки зрения веские основания привести можно. Но как бы там ни было, а из этой формулировки задачи мы должны исходить. <...> Мы ведь ставим себе в этих теориях задачу – объяснить свойства и поведение макротел поведением и свойствами конституирующих их микротел. Но тогда непоследовательно этим последним приписывать свойства, которые мы намереваемся объяснить» [21. С. 380].

Уже во второй половине XX в. к аналогичным идеям пришли Р. Пенроуз, Е. Циммерман и др. Так, в книге М.Б. Менского можно найти такие слова: «Теперь мы оказываемся перед лицом самого трудного и интригующего вопроса: как появляются классические черты у исходно квантового мира. В известном смысле, в наше время это очень простой вопрос. С другой точки зрения – он труден и все еще не решен и даже может оказаться вообще неразрешимым» [22. С. 197].

Однако существенно продвинуться в этом направлении в минувшем столетии так и не удалось. Сейчас уже можно четко сформулировать стоящую перед фундаментальной теоретической физикой главную задачу, которую с полным основанием можно считать ключевой: **вывести классические пространственно-временные представления из более глубоких физических закономерностей микромира** вместо того, чтобы продолжать подкладывать под все наши теоретические построения (уравнения и теории) априорно заданное классическое пространство-время.

Имеются достаточно веские основания утверждать, что эту задачу не удастся решить ни в рамках доминирующей ныне теоретико-полевой парадигмы, ни в рамках геометрической парадигмы. Дело в том, что в теоретико-полевой парадигме ключевым понятием является поле, которое уже по своему определению нуждается в наличии непрерывного пространственно-временного фона. В геометрической парадигме, которую составляет общая теория относительности и многочисленные ее обобщения, также основу составляет пространственно-временной континуум. В таких теориях речь идет лишь об изменениях их метрических, трансформационных или топологических свойств, но не более. *Сформулированную проблему возможно решить*

лишь в рамках реляционного подхода к природе пространственно-временных отношений и физических взаимодействий.

Статистический характер пространственно-временных отношений

Для решения поставленной фундаментальной проблемы необходимо привлечь еще соображения (идею) о статистическом характере пространственно-временных представлений. Эта идея также неоднократно высказывалась в XX в., причем в его конце она звучала все более настойчиво. Так, в середине прошедшего века нидерландский математик и физик Д. Ван Данициг писал: «...можно считать метрику описанием некоторого “нормального” состояния материи (включая излучение) и дать ей статистическую интерпретацию, как некоторое усреднение физических характеристик окружающих событий, вместо того чтобы класть ее в основание всей физики. Также является фактом, что, например, измерение длины требует наличия твердого тела, то есть большого числа частиц, точек для статистической интерпретации. Однако еще не ясно, как получать подобную интерпретацию метрики» [23].

Наш отечественный математик П.К. Рашевский в своей классической монографии «Риманова геометрия и тензорный анализ» писал: «Между тем трудно сомневаться в том, что макроскопические понятия, в том числе и наши пространственно-временные представления, на самом деле уходят своими корнями в микромир. Когда-нибудь они должны быть раскрыты как некоторый статистический итог, вытекающий из закономерностей этого мира – далеко еще не разгаданных – при суммарном наблюдении огромного числа микроявлений» [24. С. 258].

Приведем также высказывание по этой проблеме американского физика-теоретика Е.Дж. Циммермана: «...микроскопические системы взаимодействуют способами, которые также должны описываться абстрактно, то есть – без ссылок на пространство и время. Когда огромное число таких микроскопических систем взаимодействует, простейший и самый фундаментальный результат состоит в создании пространственно-временного каркаса, который придает законность классическим представлениям о пространстве и времени, но лишь на макроскопическом уровне» [25].

Можно существенно продолжить приведение высказываний такого рода, в разное время сделанных А. Эддингтоном, Ю. Вигнером, Ф. Хойлом, Р. Пенроузом и другими известными авторами. Однако, как правило, эти авторы отмечали трудности решения поставленной проблемы, а самое главное – отсутствовало указание конкретных факторов, которые подлежали суммированию для формирования классических понятий: метрики, интервалов, промежутков времени и т. д. В лучшем случае в них можно было обнаружить лишь некоторые намеки на необходимые для этого факторы.

В развиваемой нами реляционно-статистической теории пространства-времени предлагается конкретный вариант решения данной проблемы. Он

основан на реляционной трактовке понятия электромагнитного излучения. Согласно общепринятым представлениям (в рамках теории поля), в результате излучения возникает электромагнитная волна, которая распространяется по пространству от источника до возможных поглотителей. Однако в реляционном подходе такого фона нет, фотону не по чему распространяться. У нас не остается ничего иного, как предположить, в согласии с реляционной концепцией дальнего действия, что процесс излучения означает создание мировой матрицы парных отношений между излучателем и всеми возможными поглотителями. Назначением парных отношений является определение амплитуды вероятности поглощения излучения тем или иным возможным поглотителем. Но в мире имеется гигантское количество (море) испущенных и еще не поглощенных фотонов со своими матрицами парных отношений. *Предлагается строить классические пространственно-временные понятия из наложения фотонных парных отношений между возможными поглотителями.*

Для решения данной проблемы у нас имеется все необходимое. Как уже отмечалось, в нашем распоряжении имеется теория бинарных систем комплексных отношений, причем как минимального ранга (3,3), так и более высоких рангов, с помощью которых можно описывать мировые фотонные матрицы. Известны свойства комплексных парных отношений, законы и правила их наложений. При этом, как уже было отмечено, для фотонных отношений имеются соответствия с общепринятыми группами преобразований в пространстве-времени. Открыт путь для конкретного построения реляционно-статистической теории пространственно-временных отношений и физических взаимодействий, основы которой изложены в ряде наших публикаций [14–17; 26–27].

Путь к построению классических понятий из квантовых

Не вдаваясь в конкретные математические выкладки, на качественном (без формул) уровне изложим некоторые уже полученные достижения на пути решения поставленной фундаментальной задачи. Соответствующие формулы можно найти в наших публикациях.

Как известно, рождение квантовой теории начиналось с идеи квантованности электромагнитного излучения. Эта идея в полной мере воплощена в реляционно-статистической теории в виде перехода излучающей (или принимающей) системы из одного в другое состояние и создания мировой фотонной матрицы отношений.

Следующим важным этапом в становлении квантовой механики явилось создание сначала боровской модели, а затем на основе уравнения Шредингера (на фоне классического пространства-времени) теории атома. Исходя из этого, важным звеном в развитии реляционно-статистической теории следует считать построение на ее собственных принципах теории атома (связанных состояний из частиц двух противоположных зарядов). Это озна-

чает, что на основе лишь принципов бинарных систем комплексных отношений без использования классических пространственно-временных представлений необходимо, во-первых, сформулировать принципы формирования связанных состояний частиц и, во-вторых, получить известные дискретные уровни атомов (для начала водородоподобных).

В основных чертах эту задачу удалось решить. Для этого было необходимо перейти от простейшей БСКО ранга (3,3) к системе более высокого ранга (6,6), на базе которой можно описывать электромагнитные и другие виды взаимодействий элементарных частиц. Этот переход можно трактовать как использование бинарного многомерия, если считать, что ранг (3,3) соответствует классическому 4-мерию. В этом смысле имеется прямая аналогия с многомерными геометрическими моделями физических взаимодействий типа теории Калуцы в геометрической парадигме. В рамках этой БСКО необходимо было построить ключевое выражение, инвариантное относительно группы преобразований $SL(2, \mathbb{C})$, симметрично содержащее компоненты двух взаимодействующих частиц, а также их начальные и конечные состояния. Заметим, что аналогичные задачи решаются при построении лагранжианов или S-матрицы переходов в квантовой теории. Такое выражение найдено и названо нами базовым 6×6 -отношением. Его можно использовать для описания взаимодействий как несвязанных, так и связанных элементарных частиц.

Далее необходимо было сформулировать условия связи пары разномыменно заряженных частиц. Как уже отмечалось, элементы БСКО характеризуются спинорными параметрами, причем они не постулируются, а получаются автоматически. Условия связи оказались соответствующими тому, что связанное состояние характеризуется точками на 3-мерной гиперсфере в 4-мерном абстрактном пространстве. При этом полагается, что эта точка задается одной из фотонных матриц, устанавливающей комплексное парное отношение между двумя данными частицами. Однако в мире фотонных матриц очень много («море»), что означает плотное распределение их вкладов – точек на 3-мерной гиперсфере. Это позволяет ввести условие стационарности, в конце концов приводящее к дифференциальному уравнению Лягерра с дискретными собственными значениями. Их можно различным способом сопоставить либо с нерелятивистским решением для атома водорода уравнения Шредингера, либо с релятивистским решением уравнения Клейна–Фока. Таким образом можно утверждать, что каждый атом «чувствует» всю Вселенную.

Заметим, что данный ход рассуждений можно связать с результатом полученным в начале 1930-х гг. в работах Хиллерааса [28] или В.А. Фока [29], обнаруживших наличие $O(4)$ -симметрии в задаче атома водорода. Однако в названных работах данный результат носил феноменологический характер без обоснования найденной симметрии вне зависимости от ранее постулированного уравнения Шредингера. Этот пробел устраняется в реляционно-статистической теории.

Как уже указывалось, данная задача имеет для всей теории принципиально важное значение, поскольку она позволяет перейти от теории в комплексных числах (без свойства упорядоченности) к совокупности упорядоченных целых чисел, которыми характеризуются состояния атомов. Затем это свойство упорядоченности переносится на свойства фотонных матриц и далее на этой основе предлагается переход к заданию метрики в терминах вещественных чисел.

Математический аппарат теории БСКО ранга (6,6) позволяет выйти на решение задач не только вывода классических пространственно-временных понятий и новой трактовки закономерностей квантовой теории, но и на построение на новых принципах теорий электрослабых и сильных взаимодействий, их объединения, а также – на ряд важных приложений.

Заключение

В заключение перечислим ряд принципиальных задач, к решению которых позволяет приступить (или уже решить) реляционно-статистический подход к строению мироздания.

1. Прежде всего, следует назвать путь решения главной задачи фундаментальной теоретической физики – вывода классических пространственно-временных представлений из более элементарных физических закономерностей микромира, главными из которых являются квантовомеханические. Только решив ее можно будет ставить вопрос о возможности влияния на пространственно-временные отношения материальных объектов.

2. Элементы бинарных систем комплексных отношений минимального невырожденного ранга (3,3) описываются 2-компонентными спинорами, что обосновывает использование спиноров для описания элементарных частиц.

3. Теориями БСКО более высокого ранга, нежели (3,3), открывается новый канал обобщения 2-компонентных спиноров – на случай финслеровых спиноров, проявляющихся, например, в хромодинамике.

4. В рамках БСКО минимального невырожденного ранга (3,3) можно обосновать как размерность 4, так и сигнатуру геометрии физического пространства-времени.

5. Бинарная геометрия представляет собой адекватный математический аппарат для переформулировки квантовой теории. Известно, что основные понятия квантовой механики представляют собой корень квадратный из классических понятий. Таковыми являются амплитуды вероятности, спиноры, тетрады и т. д. К этому следует добавить тот факт, что бинарные геометрии можно рассматривать как корень квадратный из общепринятых унарных геометрий.

6. На основе принципов реляционно-статистического подхода можно построить теорию атомов (связанных состояний элементарных частиц) без использования понятий классического пространства и времени.

7. Поскольку вскрыты более элементарные геометрии – бинарные, от которых можно перейти к общепринятым (унарным) геометриям, то встает острая необходимость перестройки теорий известных видов физических взаимодействий на базе бинарной геометрии (бинарных систем комплексных отношений). БСКО ранга (6,6) позволяет приступить к решению этой задачи.

8. На базе БСКО ранга (6,6) предложена классификация элементарных частиц, включающая в себя представления о трех поколениях частиц в электрослабых взаимодействиях, деление частиц на лептоны и барионы и т. д. Заложены основы для объединенного описания известных видов физических взаимодействий.

9. Идеи реляционно-статистического подхода можно применить также для описания ряда закономерностей астрофизики и космологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бройль Луи де. Революция в физике // Избранные научные труды. Т. 2: Квантовая механика и теория света: работы 1934–1951 годов. – М.: МГУП, 2011. – С. 177.
2. Wheeler J.A., Feynman R.P. Interaction with the absorber as the mechanism of radiation // Rev. Mod. Phys. – 1945. – Vol. 17. – P. 157–181.
3. Фейнман Р. Пространственно-временной подход к нерелятивистской квантовой механике // Вопросы причинности в квантовой механике: сб. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1955. – С. 167–207.
4. Фейнман Р. Квантовая электродинамика. – М.: Мир, 1964.
5. Фейнман Р. Нобелевская лекция «Разработка квантовой электродинамики в пространственно-временном аспекте» // Характер физических законов: сб. – М.: Мир, 1968. – С. 193–231.
6. Френкель Я.И. Природа электрического тока (Беседы-диспут в Ленинградском политехническом институте). – М-Л: Изд-во Всесоюз. Электротехнического общества, 1930.
7. Хвольсон О.Д. Курс физики. – Т. 1. – Л.–М.: ГТТИ, 1933.
8. Лейбниц Г. Переписка с Кларком // Сочинения: в 4 т. – Т. 1. – М.: Мысль, 1982.
9. Грин Б. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. – М.: Едиториал УРСС, 2004.
10. Кулаков Ю.И. Теория физических структур. – М., 2004.
11. Кулаков Ю.И., Владимиров Ю.С., Карнаухов А.В. Введение в теорию физических структур и бинарную геометрофизику. – М.: Изд-во Архимед, 1991.
12. Михайличенко Г.Г. Математический аппарат теории физических структур. – Горно-Алтайск: Изд-во Горно-Алтайского ун-та, 1997.
13. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. – М.: Наука, 1989.
14. Владимиров Ю.С. Метафизика. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. (Первое издание 2002 г.).
15. Владимиров Ю.С. Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. I: Теория систем отношений. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1996.
16. Владимиров Ю.С. Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. II: Теория физических взаимодействий. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1998.
17. Владимиров Ю.С. Основания физики. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
18. Мах Э. Познание и заблуждение. – М.: Изд-во БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.

19. *Пенроуз Р.* Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной. – М.–Ижевск. Институт компьютерных исследований. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007.
20. *Блохинцев Д.И.* Пространство и время в микромире. – М.: Наука, 1970.
21. *Мандельштам Л.И.* Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. – М.: Наука, 1972.
22. *Менский М.Б.* Квантовые измерения и декогеренция. – М.: Физматгиз, 2001.
23. *Dantzig D. van.* On the relation between geometry and physics and concept of space-time // *Funfzig Jahre Relativitätstheorie. Konferenz Bern, Basel.* – 1955. – Bd. 1. – S. 569.
24. *Рашиевский П.К.* Риманова геометрия и тензорный анализ. – М.: Наука, 1967.
25. *Zimmerman E.J.* The macroscopic nature of space-time // *Amer. Journ. of phys.* – 1962. – Vol. 30. – P. 97–105.
26. *Владимиров Ю.С.* Физика дальнего действия. Ч. 1: Природа пространства-времени. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012.
27. *Владимиров Ю.С.* Природа пространства-времени: антология идей. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014.
28. *Хиллераас Е.А.* Волновые уравнения задачи Кеплера в импульсном пространстве // *Z. Phys.* – 1932. – Bd. 74. – № 3, 4. – S. 216.
29. *Фок В.А.* Атом водорода и неевклидова геометрия // *Известия АН СССР.* – 1935. – Т. 2. – С. 169–184.

A RELATIONAL STATISTICAL INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS

Yu.S. Vladimirov

Substantiation is given of a relational statistical interpretation of the quantum theory, and the main goal of fundamental theoretical physics closely related to it – that of deriving classical space-time notions from more elementary laws of the physics of the microworld – is formulated. It is shown that these problems can only be solved within the framework of a relational approach on the basis of the theory of binary systems of complex relations of symmetric ranks. The results already obtained along this path of research are provided.

Key words: relational nature of space-time, interpretation of the quantum theory, macroscopic nature of space and time, spinors, theory of the atom.

РЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПИСАНИЯ

В.В. Аристов

Вычислительный центр имени А.А. Дородницына РАН

В данной работе изучаются конкретные применения предлагаемой концепции реляционного статистического пространства-времени в развитии различных философских проблем, касающихся прежде всего физических вопросов. Рассматривается возможность на основе концепции описывать и квантовые, и гравитационные эффекты. Обсуждаются также вопросы восприятия феномена времени, связанные с ощущениями замедления и ускорения времени и их модельное объяснение в рамках концепции.

Ключевые слова: реляционное статистическое пространство-время, микроскопический (квантовый) предел, макроскопический (гравитационный) предел, ощущение ускорения и замедления времени.

Введение

В предыдущей работе [1] рассматривались общие, метафизические по сути, проблемы, связанные с вводимой реляционно-статистической концепцией. В настоящей работе освещаются конкретные применения, прежде всего, в физике и в изучаемых новых философских представлениях о пространстве-времени.

Реляционные и статистические взгляды на пространство и время в историческом аспекте описаны в [1; 2], также этим вопросам посвящены многочисленные работы Ю.С. Владимирова (см. [3]), развивающего реляционно-статистический подход. Не имея возможности останавливаться здесь на важном историческом источнике идей, во многом не разработанном (упомянем лишь реляционные воззрения Лейбница и Беркли), отметим книгу [4], где затрагиваются и вопросы пространства-времени (в частности, редко упоминаемое реляционное представление о пространстве, восходящее к Теофрасту Эресскому – творческому наследнику Аристотеля, полагавшему, что пространство не есть самостоятельная сущность, но определяется положением и порядком тел).

Понятия пространства и времени являются важнейшими категориями, которые непосредственно учитываются в построении ряда наук и прежде всего физики, – моделирование этих понятий может раскрыть новые связи, но, кроме того, оно способно расширить возможности конструктивного описания в различных областях знания. В физике новые представления о пространстве-времени (с учетом принципа соответствия соотносящие новые

уравнения с классическими) позволяют, на наш взгляд, подойти к разрешению одной из важных в теоретическом плане проблем: выработке общего языка описания для квантовых и гравитационных эффектов. Сейчас между описанием в квантовой механике и в общей теории относительности (ОТО) имеется известный разрыв. Интересно проследить некоторые исторические истоки, приведшие к данным различным теориям. Два подхода, определенным образом связанные с дискретным и континуальным описанием, можно обозначить как принципы соответственно Больцмана и Маха. Термин «принцип Больцмана» обозначает статистический подход на основе кинетически-молекулярного взгляда на природу вещей, разработанного Максвеллом и Больцманом. Здесь важнейшим фактором, позволившим связать первое и второе начала термодинамики в единой теоретической схеме, является статистическая трактовка энтропии и доказательство Н-теоремы Больцманом. Такой подход, как известно, позволил Планку ввести понятие кванта энергии (действия). Принцип Маха, идеологически предшествовавший эйнштейновской ОТО, связал локальные и глобальные свойства.

Надо заметить, что дискретность, присущая статистической теории и отразившаяся в самих основах квантовой теории, не удовлетворяла Эйнштейна (хотя он сам был, по сути, одним из создателей квантовых представлений, введя, в частности, понятия кванта света – фотона), идеалом для него было описание на основе непрерывных уравнений, что выразилось, например, в записи уравнений Эйнштейна в ОТО. Одно время он полагал, что можно описать всю систему атомов как проявление некоторых сингулярностей в уравнении единого поля. Такой подход, по-видимому, в большей степени соответствовал взглядам Маха, который так и не признал существование атомов – в основе его картины мира было другое описание.

Представляется, что совмещение двух принципов (Больцмана и Маха) в непротиворечивой теоретической схеме указывало бы на возможный путь выхода из разделенного описания квантовой механики и ОТО как двух различных картин мира, которые не соотносены в своих базисных основах. Таким путем к построению единой теории видится создание модели реляционно-статистической конструкции пространства и времени. В ней совмещаются микроскопическая дискретность и глобальность.

1. Реляционно-статистический формализм и предельный случай, приводящий к квантовым эффектам

В принципе Маха присутствует идея единства мира, микро- и макрокосмоса. Причем в набросках своих формулировок Мах, по сути, использует некоторые статистические представления, поскольку в попытках описания инерции выделенного тела у него фигурирует сумма ускорений всех тел Вселенной, что оказывается определенным образом соотносимым и с отмеченным подходом Больцмана для описания термодинамических величин. В этом видится возможность (пока опознаваемого интуитивно) соответствия

между двумя различными подходами. В реляционно-статистических построениях модели пространства и времени отражены, как нам представляется, указанные принципы. При этом положения теории относительности, в частности связь пространства и времени, оказываются следствиями рассматриваемой конструкции, где изначально время описывается на языке пространства.

Хорошо известны попытки связать методы квантовой механики и ОТО. Теория струн одной из целей ставит именно определение связи разделенных частей нынешней физической концепции. По нашим представлениям, для установления единства описания (не отрицая важности создания теории на планковских масштабах) начинать надо с тех уровней описания, которые приводят в одном пределе («в малом», на атомарном уровне) к квантовой теории, в другом пределе («в большом», на макроскопическом уровне) к ОТО. Реляционная статистическая теория пространства и времени представляется такой схемой, где на масштабах малых масс (и расстояний) способны проявляться отклонения от статистических закономерностей, присущих классической теории с ее эталонами. На больших масштабах масс (и расстояний) возможны другого рода нарушения осреднения, что можно связать с эффектами ОТО.

Две данные предельные ситуации проявляются в конструкциях макроскопического пространства-времени: для малых масс и расстояний (масштабов) сказывается статистическое отклонение от средних значений, которое и соотносится с показаниями приборов (линеек) для измерения расстояний в классической физике. В рассматриваемой схеме реляционного пространства, в ее основе – система идеальных элементов, сопоставляемых с частицами физического мира. В простейшей изучаемой модели, позволяющей строить дискретную геометрию с возможным отклонением от евклидова классического варианта, предполагается, что все физические тела состоят из таких же элементов. Фундаментальные приборы – линейки тоже состоят из элементов.

Процедура измерения расстояния (между двумя элементами) определяется через своеобразное сопоставление этим элементам наборов элементов измерительной среды. Данная среда, коррелирующая с представлениями о предельно возможной однородности дискретной среды измерительных приборов, соответствует аксиоматическим свойствам. Строится дискретная геометрия, которая в пределе больших расстояний, должна переходить в евклидову, на малых расстояниях получают отклонения. Для связи с физикой делается важное утверждение, которое определяет первую содержательную связь рассматриваемой реляционной концепции. А именно с точки зрения измерительных процедур, то есть на операциональном уровне расстояние и масса отождествляются. Такая «эквивалентность», оправданная с точки зрения указанного выше процесса измерения, приводит к далеко идущим выводам, имеющим отношение и к квантовой теории, и к теории гравитации. С точки зрения указанной операции измерения не может быть

определено расстояние «меньше одного атома (элемента)» данной дискретной среды.

Такое аксиоматическое положение (оправданное тем, что все описание сводится к простому оперированию наборами элементов) приводит к естественному соотношению между минимальным расстоянием в традиционных физических единицах длины и минимальной массе одного элемента. Тем самым в таком подходе сразу получается ограничение на возможную точность измерения расстояния, а так как временной интервал оказывается выражаемым через среднее от пространственных смещений элементов, то, по сути, это задает и ограничение на временной интервал. Данные ограничения приводят к ограничению точности измерения скорости, откуда следует аналог соотношения неопределенности (в его релятивистском варианте, где допустимая скорость ограничена скоростью света). Распространение понятия расстояния, меньшего, чем указанное в данном простейшем варианте, требует расширения модели.

Во всяком случае, простые и «физические», с нашей точки зрения, предположения приводят к основным положениям квантовой механики. Также может быть получен индетерминизм движения. В самом деле, оказывается, что на малых расстояниях (определяемых через дискретные наборы элементов) нарушаются аксиомы евклидовой геометрии. Но это нарушение иное, чем то, которое следует из положений римановой геометрии и физически связано с искривлением пространства-времени в гравитационном поле – об этом случае, также описываемом в модели, речь будет идти дальше (все же, забегая вперед, скажем, что такая «неевклидовость», известная в ОТО, является некоторым следствием рассматриваемой дискретной модели системы идеальных элементов и проявляется при отклонении распределения элементов-частиц от равномерного среднего). На микромасштабах дискретность распределения элементов начинает сказываться, – непрерывные образы, присущие евклидовой геометрии, получают как некие предельные распределения элементов. При дискретности возникает проблема определения прямой и других геометрических объектов, поэтому вводится формализм графов для определения основных понятий. Система гильбертовых аксиом при построении геометрической схемы представляется естественной, чтобы к ней апеллировать при конструировании физической дискретной геометрии. Подразумевается, что, конечно, математическая схема проверяется на соответствие физическим понятиям.

Точка сопоставляется с идеальным элементом (частицей). В отличие от традиционной схемы геометрии прямые и плоскости будут конструктивными понятиями. Прямая вводится как кратчайший маршрут между двумя вершинами графа (которые очевидно сопоставляются с частицами и точками дискретной геометрии). На простейших моделях графов легко показать, что такие маршруты могут быть неединственными, – это приводит нас к неединственности прямой на малых масштабах. Малые масштабы расстояний могут быть введены после того, как определено расстояние между двумя вер-

шинами (частицами, точками). Расстояние определяется по прямой и соответствует метрическим понятиям на графе: оно вычисляется через количество вершин на маршруте минимальной длины (прямой). Традиционно метрика вводится перечислением ребер на маршруте минимальной длины, что позволяет удовлетворить всем аксиомам метрики, в частности первому утверждению о том, что расстояние равно нулю, если два элемента, между которыми определяется расстояние, совпадают (поскольку в этом случае отсутствует ребро графа). В нашем случае минимальное расстояние равно 1 (одной частице). Поэтому, строго говоря, аксиоматика метрики не выполняется. Но на больших расстояниях, когда очень много элементов на маршруте, можно будет считать относительный вес каждой вершины, вносящий вклад в расстояние, тогда вес одной вершины будет стремиться к нулю при стремлении расстояния к бесконечности и вводимая аксиоматика оправдана.

Таким образом, оказывается, что понятие единственной прямой на малых масштабах теряет смысл, аналогично теряет смысл и понятие траектории частицы. Также временной интервал, как указывалось, в силу статистичности подхода определяется с ограниченной точностью, и производная не может быть определена обычным способом. Согласованное отклонение от классического описания пространства и времени на малых масштабах означает индетерминизм движения. То есть постулируемое обычно как отклонение от классичности квантовое поведение оказывается здесь следствием вводимой модели пространства и времени.

Данная модель пространства-времени в классическом случае задает уравнения ньютоновой механики (в нерелятивистском случае), поскольку интервал реляционно-статистического времени определяется через среднее от пространственных перемещений всех элементов рассматриваемого мира (см. [2]). В квантовой ситуации будут проявляться отклонения от классического описания, объяснимые указанными отклонениями от классической схемы пространства-времени [5]. Оказывается, что весь аппарат для адекватного описания в таком случае уже подготовлен работами Нельсона [6; 7]. Но в его подходе делается существенное допущение *ad hoc* о флуктуациях, приводящих к необходимости использования уравнений типа диффузии. В предлагаемом подходе аналогичный аппарат возникает естественным образом как следствие фундаментальных предположений о природе пространства-времени и самого операционального способа освоения физического мира. Собственно, в нашем понимании невозможно говорить абстрактно о тех или иных свойствах физического мира вне предъявления приборов для «опознания» его. Такими приборами выступают часы и линейки, точнее, их вполне определенные модели.

Формализм Нельсона приводит нас к системе двух уравнений, которые оказываются гидродинамическим аналогом уравнения Шрёдингера. Более точно: вводится две возможные скорости для описания случайного процесса блуждания, а именно полусумма и полуразность скорости «вперед» и «назад» – производная в строгом смысле (и соответственно скорость), как ука-

зано, не существует. Выбор именно двух специальных скоростей (а не большего числа возможных) характеристик движения обусловлен тем, что мы хотим по принципу соответствия получить аналог уравнения Шрёдингера. Волновая функция записывается для действительной и мнимой части (более точно – для модуля и для фазы), что определяет пару уравнений, эквивалентную уравнению Шрёдингера для комплексной волновой функции. Такая система уравнений и выводится с помощью отмеченного формализма Нельсона. То есть предложенная модель пространства-времени позволяет получить динамическое описание квантовой механики.

Следовательно, важные свойства квантовой механики в реляционно-статистическом подходе предстают как проявление свойств модели пространства-времени на определенных масштабах. Для придания точности формализму предстоит работа по четкому определению перехода к единственности образов евклидовой геометрии.

2. Предельный случай на больших масштабах и гравитационные эффекты

На больших масштабах расстояний при условии равномерного распределения (в определенном смысле) идеальных элементов, составляющих измерительную среду, можно перейти к понятию единственной прямой между двумя точками – данный образ получается соответствующим осреднением из множества аналогов прямых на графе. При этом множество прямых, проходящих через две точки (то есть узлы графа, или частицы, элементы), обладает тем свойством, что «диаметр трубки прямых», определенный некоторым способом, по сравнению с длиной данного отрезка уменьшается с ростом величины отрезка. Другими словами, при стремлении длины отрезка к бесконечности отношение этого «диаметра» (поперечника) к длине стремится к нулю. Тем самым выстраивается единственный геометрический объект (прямая, плоскость и т.д.) евклидоваго формализма, используемого и в классической механике. Так получается евклидова или псевдоевклидова в случае специальной теории относительности (СТО) геометрия обычной механики.

Однако предлагаемая модель приводит к римановой (или псевдоримановой в четырехмерном случае) геометрии, что соотносит ее с описанием в ОТО. Причем вывод соответствующих уравнений проводится без обращения к понятию поля, поскольку реляционная модель опирается на исходные отношения между частицами, задающими пространство и время. Важно подчеркнуть, что в основе лежат кинематические соотношения, выводимые из основного уравнения для интервала времени, зависящего от пространственных перемещений распределения элементов (пространство, как указывалось выше, получается при рассмотрении соответствующих конфигураций элементов). Динамические соотношения получаются как следствия вводимых кинематических соотношений, причем понятие силы (потенциала) так-

же не постулируется, а выводится с опорой на аналог принципа Маха (и на идеи Маха о кинематичности описания в механике). Соответственно понятие инерционной массы также оказывается следствием кинематики.

Гравитационная масса также, по сути, не постулируется, а получается естественным образом в структуре базисных уравнений концепции. Для этого выстраивается аналог суммы гравитационного ньютоновского потенциала, который является безразмерной величиной с соответствующим размерным множителем из фундаментальных констант. Подход реляционно-статистической концепции заключается в том, что физические соотношения получаются на основе фактически математических соотношений, обеспечиваемых соответствующим математическим аксиоматическим аппаратом. Физический смысл придается благодаря соответствию известным уравнениям классической теории. Безразмерность обеспечивается тем, что время выражается в терминах пространственных величин, а пространство – в терминах единицы массы. Так строятся безразмерные скорости и безразмерные аналоги потенциала. Гравитационный классический потенциал, как известно, представляет собой отношение массы гравитирующего объекта к расстоянию, на котором рассматривается воздействие гравитации. Причем принципиально, что здесь подразумевается именно гравитационная масса, которая была связана в ОТО с инерциальной массой принципом эквивалентности. В нашем подходе инерционная масса получается как соответствующая сумма дискретных единиц при одинаковом движении различных элементов (частиц). Соответственно здесь принцип эквивалентности выступает следствием кинематического в своей основе описания. Гравитационная масса в аналоге потенциала появляется как следствие реляционного принципа связи расстояния и конфигурации частиц (масс).

Поскольку расстояние может быть измерено в единицах массы («пространство говорит на языке конфигурации – взаиморасположения масс»), то из их отношений может быть составлена безразмерная величина. С размерным множителем – гравитационной постоянной – она соотносится с ньютоновым потенциалом. Но чтобы получить, вывести эту величину, надо чтобы она появилась в соответствующих уравнениях движения. Здесь проявляет себя принцип Маха, но в форме, присущей именно реляционно-статистическому подходу. Одна сумма безразмерных величин (квадратов скоростей – суммы кинетической энергии всех элементов мира) приравнивается по статистическому вероятностному закону к другой безразмерной сумме (аналогу безразмерных гравитационных потенциалов для всех элементов мира). Проще и естественнее всего такую связь реализовать в статистическом выражении для интервала времени – при появлении гравитационного потенциала проявляется замедление времени, что и учитывается в соответствующем выражении для аналога гравитационного потенциала. Таким образом, известные уравнения физики выводятся из базисных уравнений связи времени и пространства, а также пространства и конфигурации масс в развиваемом реляционном статистическом подходе.

Для построения полноценной теории гравитации и связи с ОТО необходимо построить последовательную геометрическую схему, которая соответствовала бы проявлению гравитации как искривления пространства-времени. Подчеркнем еще раз, что в развиваемой концепции это не будет связываться с проявлением какого-то поля. Метрика искривленного пространства-времени получается как обобщение описания связи пространства и конфигурации масс на больших масштабах (когда квантовые эффекты статистических флуктуаций уже не проявляют себя), но дают о себе знать отклонения от средних, связанные с появлением тел большой массы, что подразумевает, что система рассматриваемых тел в своем распределении отличается от измерительной среды элементов идеальной однородности и взаимной симметрии (такая однородная среда и приводит к псевдоевклидовой метрике, соответствующей СТО). Заметим, что в классической теории представление об идеальной псевдоевклидовой геометрии Минковского соответствует некоему пустому пространству. В нашем подходе случай такой простой геометрии есть частный случай реализации принципа Маха, когда все определяется космологическим распределением элементов мира. Отклонение от идеальной однородности и приводит к гравитации, что сказывается в отклонении метрики пространства-времени от псевдоевклидовости и переходе к псевдоримановости. Метрика получается непосредственно из статистических закономерностей, поскольку интервал времени связан со средним от интервалов пространства элементов, а интервалы пространства – с изменением конфигурации масс. Заметим, что в таком подходе воспроизводятся эффекты линзирования света.

Тем самым изменение взаиморасположения системы тел сразу сказывается на изменении пространственной, и следовательно, и временной метрики – никакого посредника, промежуточного «агента» в виде поля здесь не требуется. Наиболее просто это описывается, например, в синхронной системе отсчета. Пространственная метрика прямо определяется распределением масс. Причем появление неоднородностей (по сравнению с идеальным дискретным однородным измерительным фоном), другими словами, – появление гравитирующих масс – приводит к изменению масштабов по сравнению со случаем отсутствия неоднородности. Данная неоднородность также сказывается в проявлении изменения хода часов через соответствующую статистическую зависимость. Таким способом может быть получен аналог метрики Шварцшильда в случае центрально-симметричного распределения масс [8]. Но существенно, что присутствуют и отличия, при том, что в первом приближении по отношению гравитационного радиуса к расстоянию метрики совпадают. То есть все известные подтвержденные эффекты ОТО будут воспроизводиться и в новой метрике, однако есть отличия, которые предполагается обнаружить в более точных опытах.

Принципиальная статистичность позволяет надеяться объяснить изменения описания гравитации на больших космологических расстояниях (см. [9]), в частности, – проявления так называемой темной материи, но не изме-

нением ad hoc основных соотношений, а как одно из следствий принятой реляционной модели. Статистическая реляционная концепция позволит объяснить и, например, «пятнистость» темной материи. Предложенная модель пространства-времени, таким образом, может дать возможность подойти к единому описанию квантовых и гравитационных эффектов. Это делает ее перспективной для построения квантовой теории гравитации, но продвижение данного формализма на малые планковские масштабы – дело будущих построений.

3. Реляционность, относительность восприятия времени

Развиваемая реляционная статистическая концепция выходит, по нашему убеждению, за рамки собственно физического описания (оставаясь, безусловно, важнейшей частью теории) и позволяет строить модели в различных областях знания: определять психологическое, биологическое, историческое время и т.д. Мы приведем пример, возможно, наиболее простого применения реляционной модели времени для объяснения известных фактов восприятия времени. Данные психологические феномены хорошо описаны и объясняются различными способами, но представляется, что реляционная статистическая модель достаточно конструктивна.

Типичная ситуация может быть описана в реляционных статистических терминах. По нашим представлениям всегда происходит (явно или неявно) сопоставление отрезка времени в некоторой новой ситуации с определенным «базисным», эталонным отрезком времени, что аналогично процессу точной оценки в физике, когда изучаемый интервал времени находится сравнением с интервалом эталонного времени, определяемого по фундаментальному прибору – часам. Также проводится оценка и пространственных величин. В реляционной статистической модели проводится всегда сопоставление двух распределений. При определении реляционного времени системы сравнивается движение данного распределения перемещений с эталонным, предельно усредненным перемещением, которое соотносится с выбранным эталоном таких статистических реляционных часов. Совершенно аналогично изучаемая конкретная конфигурация масс сопоставляется с эталонной, предельно симметричной конфигурацией, которая определяется для масштабной среды при нахождении расстояний. Таким же способом, но чаще всего неявно, происходит психологическое сопоставление времени ощущений в новой ситуации с временем привычной ситуации жизни – при этом говорят о замедлении или ускорении времени.

Рассмотрим простую модельную ситуацию, которая дает представление о реляционном сопоставлении и оценке времени. Для определения эталона представим постоянно воспроизводимую «жизненную» ситуацию, где для фиксированного интервала времени по обычным часам происходит примерно одно и то же количество событий. Существенно, что здесь обычные физические часы выступают в качестве «объективного» эталона, но при этом

важно именно сопоставление событий с таким интервалом. Понятие «событие» требует расшифровки в реляционно-статистических терминах. Событие можно определить через изменение положения некоторых элементов, например, визуально фиксируемых, что в принципе исчислимо с помощью формул модели.

Хорошо известны психологические эффекты ощущения ускорения или замедления времени. Например, при попадании в новую ситуацию (путешествия и т.п.) возникает ощущение, что время ускоряется, причем это ощущение связано с оценкой происходящего на малых интервалах времени, скажем, одного часа. В реляционных терминах такое ощущение вполне объяснимо: невольно происходит сравнение с известной ситуацией «скорости времени». То есть сравнивается количество событий, происходящих в один и тот же интервал «объективного времени», например часа. Можно такую безразмерную «скорость» оценивать сравнением количества событий в новой ситуации и ситуации привычной. Важно, что «новое событие» оценивается как более значимое и вносящее больший вклад по сравнению с привычным в данную сумму событий в фиксированный интервал. Следовательно, в оценке прошедшего психологического времени на небольших промежутках времени роль играет «скорость времени».

Психологический парадокс возникает при оценке прошедшего времени в новой ситуации на достаточно больших промежутках: день, неделя, месяц. Удивление вызывает то, что появляется ощущение «удлинения времени» на таких интервалах по сравнению с обычным. Противоположна известная ситуация: при выполнении «скучной», монотонной работы есть ощущение растянутости времени, – «время тянется» – это оценка на небольших интервалах (час и т.д.), для больших интервалов (день и т.д.) возникает ощущение «пустотности» прошедшего времени или «сжатости времени». На самом деле парадокса нет, – он связан со способом психологической трактовки. В терминах реляционной оценки все оказывается рационально объяснимым.

В самом деле, оценку прошедшего времени на больших отрезках часто можно назвать «подведением итога», то есть неявным подсчетом прошедшего за день, неделю, месяц и т.д. Поэтому такую оценку можно сопоставить с «путем», пройденным за этот интервал, и чем выше «скорость времени», тем больше и пройденный «путь времени». Соответственно «скучное время», которое характеризуется «замедлением времени», то есть уменьшением «скорости времени», приводит и к уменьшению «пути времени» на интервале в день и т.д. Но при объяснении этого свойственно использовать некоторые аналогии, которые и приводят к «парадоксам» восприятия времени. Говорят о замедлении времени, о том, что «время тянется» (в наших терминах «скорость времени» уменьшается), поэтому вызывает удивление, что, казалось бы, «растянутое время» оказывается наоборот укороченным на больших интервалах. Совершенно аналогично «сжатое время» необычных новых ситуаций внешне противоречит ощущению «растянувшегося времени» на больших интервалах. Понятно, что здесь используется некоторая фи-

зическая метафора «упругости», которая неприменима в разных ситуациях. Понятия «скорости» и «пути» психологического времени, на наш взгляд, позволяют непротиворечивым образом описать данные феномены восприятия.

Ситуации могут осложняться тем, что в качестве эталонного интервала могут неявно выбираться не интервалы времени с привычным ходом событий, но интервалы времени с ожидаемым ходом. Такая ситуация, возникает, например, при попадании в замкнутое помещение при проведении психологических экспериментов, при имитации состояния на космических станциях. Здесь требуется иное реляционное сравнение.

Некоторая сложность возникает также в разночтении при описании одних и тех же феноменов, при которых одно и то же ощущение называют и «замедлением», и «ускорением» времени. Например, указанное «замедление скучного времени» на больших интервалах иногда определяют как «ускорение», подразумевая, по-видимому, оценку с помощью «уменьшения расстояния времени» и имея в виду, что привычный интервал времени проходит за меньший промежуток собственного времени, то есть оперируя с уменьшенным «расстоянием времени». Часто разногласия возникают в результате разногласия терминов. Поэтому важно достичь изначальной точности определений.

Заключение

В настоящей работе продолжено на новом уровне обсуждение философских проблем, связанных с построением новых моделей пространства-времени. По сравнению с первой работой, посвященной самым общим положениям реляционной статистической концепции, здесь мы остановились на более конкретных возможностях ее применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аристов В.В.* Философские проблемы пространства-времени, связанные с реляционной статистической концепцией // *Метафизика*. – 2012. – № 3 (5). – С. 48–63.
2. *Аристов В.В.* Конструкция реляционного статистического пространства-времени и физическое взаимодействие // *На пути понимания феномена времени в естественных науках* / ред. А.П. Левич. – М.: Прогресс-Традиция, 2009. – Ч. 3. – С. 176–206.
3. *Владимиров Ю.С.* *Метафизика*. – М.: Бином, 2008.
4. *Шишков А.М.* *Метафизика света. Очерк истории*. – СПб.: Алетея, 2012.
5. *Аристов В.В.* Релятивистское статистическое пространство-время, связь с квантовой механикой и перспективы развития теории // *Основания физики и геометрии* / ред. Ю.С. Владимиров. – М.: РУДН, 2008. – С. 119–132.
6. *Nelson E.* Derivation of the Schrodinger equation from Newtonian mechanics // *Phys. Review*. – 1966. – V. 150. – P. 1079–1085.
7. *Nelson E.* *Quantum Fluctuations*. – Princeton: NJ: Princeton University Press. – 1995.

8. *Aristov V.V.* The gravitational interaction and Riemannian geometry based on the relational statistical space-time concept // *Gravitation and Cosmology*. – 2011. – Vol. 17. – No. 2. – P. 166–169.
9. *Aristov V.V.* Relational statistical space-time for cosmological scales and explanation of physical effects // *Theoretical physics and its applications*. – Moscow: Moscow State Open University, 2013. – P. 9–14.

RELATIONAL STATISTICAL CONCEPT OF SPACE-TIME AND NEW POSSIBILITIES OF DESCRIPTION

V.V. Aristov

In the present paper the concrete applications of the relational statistical space-time concept are studied. In developing philosophical and physical relational models this approach can allow us to solve some problems. In particular quantum and gravitational effects can be explained. The different psychological perception of time are also considered in the framework of the concept. The phenomena of the perception of accelerating and decelerating time are discussed. They are explained on the basis of the model of the relative statistical time.

Key words: relational statistical space-time, microscopic (quantum) limit, macroscopic (gravitational) limit, perception of accelerating and decelerating time.

МОДЕЛЬ ФОТОНА: ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИЛИ КОНЦЕПЦИЯ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ?

А.В. Белинский, В.Б. Лапшин

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Рассмотрены мысленные и реальные эксперименты с одиночными фотонами, ставящими под сомнение полевую природу бозонов и свидетельствующие в пользу принятия концепции дальнего действия.

Ключевые слова: полевая природа бозонов, трехлучевая интерференция, самоинтерференция, одиночный фотон, «стоячая волна», концепция дальнего действия, мысленные и реальные эксперименты.

Введение

Гипотеза Макса Планка об излучении электромагнитных волн дискретными порциями – квантами – решила проблему «ультрафиолетовой катастрофы» как кардинальной проблемы классической электродинамики. Но что происходит в промежутке между излучением и поглощением? Кажется бы, ответ на этот вопрос дал эксперимент Комптона: пучок электронов рассеивался на рентгеновском излучении так, как будто на отдельных частицах, обладающих импульсами, соответствующими фотонам квантовой теории ($p = \hbar k$). Так что же такое фотон? Как к математическому символу $|1\rangle$ никаких претензий нет: он работает безотказно как на Земле, так и во всей Вселенной. Но как к локализованной материальной частице – возникает масса вопросов. И первый – проявление так называемой *квантовой нелокальности*. Правда, эта «беда» касается не только бозонов: одиночные фермионы также интерферируют на двухщелевом экране Юнга. Однако фермионы можно пересчитать, что свидетельствует об их индивидуальном существовании. Более того, принцип запрета Паули позволяет их даже как-то упорядочить. Другое дело, с бозонами и, в частности, с фотонами. Только фоковские состояния $|n\rangle$ обладают определенным числом фотонов. Но таких состояний в природе почти не существует. С огромным трудом экспериментаторы научились приготавливать однофотонные и бифотонные и, наконец, трехфотонные состояния. Большинство же реально существующих световых полей не имеет определенного числа фотонов. Скажем, в когерентном состоянии со средним числом фотонов в моде $\bar{n} = 1$ в случае прямого детектирования излучения идеального лазера от реализации к реализации будет получаться различное число фотоотчетов. Значит ли это, что в 37 % случаев в поле имеется один фотон или ни одного? А в 18 % – два? Еще реже – три (в 6 % случаев) и совсем редко – четыре (1 %)? Другими словами, существу-

ет ли определенное число фотонов в поле до момента измерения? Ортодоксальная интерпретация квантовой теории Нильса Бора утверждает, что в общем случае – нет, за исключением тех редких ситуаций, когда квантовая система находится в собственном состоянии оператора измеряемой величины, например, при измерении числа фотонов света в фоковском состоянии. Удивительный факт априорного несуществования значения наблюдаемой до момента ее регистрации можно доказать экспериментально [1; 2]. Привычные нам макроскопические пространственно-временные интуиции при этом подвергаются серьезным испытаниям.

Трехлучевая интерференция

В обычных двухлучевых интерферометрах, например, Маха-Цендера, гармоническая зависимость интенсивности света I на выходе от разности фаз в каналах $\Phi_2 - \Phi_1$ появляется в результате сложения комплексных амплитуд двух интерферирующих пучков.

Бывают и интерферометры, в которых складывается множество пучков с различными амплитудами. Это, например, интерферометры или резонаторы Фабри–Перо: с плоскими параллельными зеркалами, или многолучевые интерферометры с зеркалами другой формы. Их преимущество по отношению к двухлучевым состоит в том, что они более чувствительны к фазовым задержкам. Здесь же мы рассмотрим интерферометр третьего порядка [1; 2], представляющий не столько практический, сколько эвристический интерес, поскольку он позволяет проанализировать специфические и в то же время фундаментальные особенности квантовой теории вообще и теории квантовых измерений, в частности. Его схема представлена на рис. 1.

Пучок света с частотой ω_p в прозрачном нелинейном кристалле в ходе параметрического рассеяния порождает два пучка излучения – сигнальный (s) и холостой (i). Взаимодействие невырожденное: пучки неколлинеарны. Поскольку эффективность параметрического преобразования мала, порядка $10^{-8} \div 10^{-7}$, основная доля излучения проходит через прозрачный кристалл, на выходе которого три пучка, в простейшем случае, три моды: p , s и i . Далее во все три компоненты поля вносятся регулируемые фазовые сдвиги Φ_p, Φ_s и Φ_i , после чего они вновь взаимодействуют во втором, точно таком же нелинейном кристалле. Он осуществляет обратное преобразование сигнального и холостого пучков в излучение на частоте накачки ω_p и прямое преобразование прошедшей первый кристалл накачки. Детекторы на выходе оптической схемы регистрируют интенсивности всех трех пучков.

Строгое квантовое рассмотрение [1; 2] показывает, что вероятности обнаружения фотонов в каналах описываются гармоническими зависимостями от фазы, включающей фазовые задержки во всех трех каналах. Поэтому их можно назвать интерференционными зависимостями, а само явление – *интерференцией третьего порядка* или *трехлучевой интерференцией*.

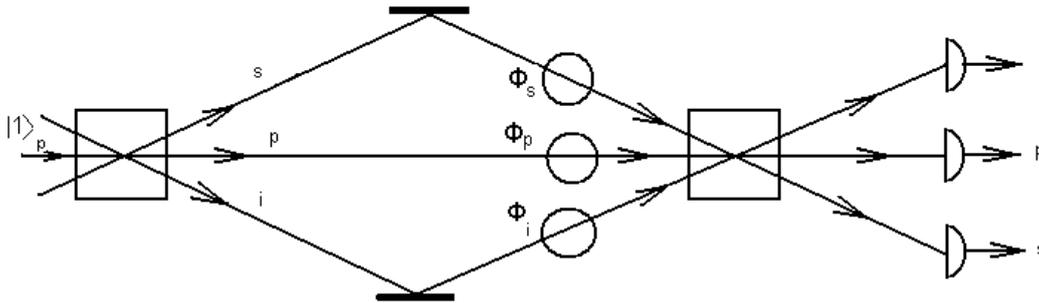


Рис. 1. Схема интерференционного эксперимента, доказывающего априорное несуществование определенного числа фотонов в поле между двумя нелинейными кристаллами, изображенными в виде квадратиков. На вход подаются единичные фотоны $|1\rangle_p$ на частоте ω_p . Вероятность фотоотсчетов на детекторе i пропорциональна $1 + \cos(\Phi_s + \Phi_i - \Phi_p)$, что свидетельствует об одновременном присутствии поля во всех трех каналах, то есть как минимум трех фотонов. Но энергии одного входного фотона достаточно лишь на половину энергии трех фотонов

Максимальный контраст интерференционной картины, то есть максимальный перепад между интерференционным минимумом и максимумом, будет при единичной видимости v . В каналах “ s ” и “ i ” это очень легко достижимо: достаточно взять одинаковые нелинейные кристаллы.

Для наблюдения интерференционного эффекта достаточно и одного детектора, например, в канале “ s ”. При этом единичная видимость будет и в случае малой эффективности параметрического преобразования. Следовательно, рассматриваемый эксперимент вполне реально осуществим. Правда, нужно уметь приготавливать однофотонное состояние накачки. Идеальный лазер тут не поможет, поскольку даже при средней интенсивности в 1 фотон за время наблюдения T число зарегистрированных фотонов от реализации к реализации флуктуирует по пуассоновскому закону от нуля до четырех и выше.

Прекрасный способ приготовления однофотонного состояния предложил Д.Н. Клышко с использованием все того же параметрического рассеяния. Его схема представлена на рис. 2. Мощность лазера накачки подбирается небольшой, чтобы рождение фотонных пар в ходе параметрического рассеяния происходило достаточно редко, иначе они будут накладываться друг на друга, то есть будут рождаться слишком часто и будут перекрываться.

Поскольку квантовая эффективность η детектора на рис. 2 может быть меньше 100%, некоторые фотонные пары $|1\rangle_s |1\rangle_i$ он будет пропускать. Чтобы отсеять «пропущенные» детектором пары и всевозможные посторонние засветки, во втором канале схемы на рис. 2 ставится затвор, пропускающий лишь фотон зарегистрированной детектором пары. После затвора гарантированно имеем одиночный фотон в известный момент (точнее промежуток) времени появления импульса фотоотсчета и в определенной области про-

странства. Его и направляем на вход интерференционной схемы на рис. 1. Затем ждем появления следующего фотона.

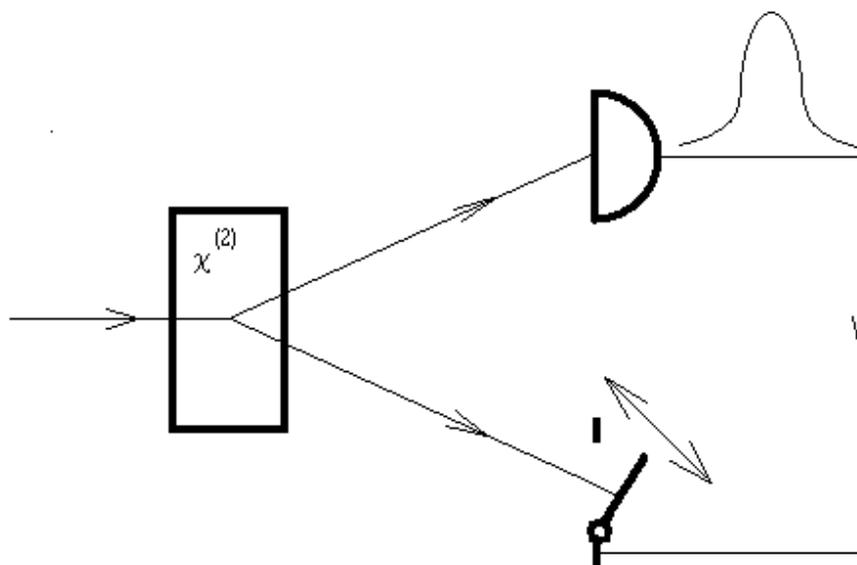


Рис. 2. Схема приготовления однофотонного состояния:

один из фотонов коррелированной пары (верхний) регистрируется детектором, по электронному сигналу которого открывается затвор, пропускающий второй фотон коррелированной фотонной пары, который, разумеется, должен поступить на затвор с задержкой. Затем затвор снова быстро закрывается

Поскольку рождение фотонных пар происходит достаточно редко, а рождение вторичных пар в нелинейных кристаллах трехлучевого интерферометра на рис. 1 – еще реже, для регистрации гармонической интерференционной зависимости придется запастись достаточным терпением. Но все же это принципиально возможно. Ведь первые эксперименты по наблюдению интерференции одиночных фотонов на двух щелях подчас длились по несколько лет, поскольку схемы, подобной изображенной на рис. 2, еще не знали, и одиночные фотоны брали от очень слабого теплового источника, настолько слабого, чтобы вероятность появления вместо одного – двух фотонов – была ничтожной.

Указанные причины побудили экспериментаторов [3] к наблюдению трехлучевой интерференции не с одиночными фотонами на входе, а с обычным лазерным светом. Гармоническая интерференционная зависимость была ими получена, правда с видностью $\nu_s = \nu_i$, несколько меньшей единицы. Дело в том, что очень трудно избежать всевозможных шумов в «нулях» интерференции, где $P_s = P_i = 0$. А именно эти «нули» интересны с точки зрения интерпретации эксперимента.

Попытаемся интерпретировать этот результат в рамках наглядной модели с *априори* определенным числом фотонов в трехмодовом поле между нелинейными кристаллами (см. рис. 1). Априори в данном случае означает – до момента срабатывания какого-либо из детекторов. Для простоты их квантовую эффективность η положим равной единице.

В первой серии испытаний убираем второй нелинейный кристалл. При этом фазовые задержки в каналах не влияют на результаты детектирования и наблюдаются фотоотсчеты или одновременно в обоих каналах “s” и “i”, или одиночные отсчеты в канале “p”. Последние, разумеется, гораздо чаще. Но никогда не будет одновременно трех фотоотсчетов во всех трех каналах, поскольку на это вдвое не хватает энергии фотона на входе. Эта картина согласуется с тривиальным предположением, что на выходе первого нелинейного кристалла имеется попеременно то один фотон накачки $|1\rangle_p$, то пара сигнально и холостого фотонов $|1\rangle_s|1\rangle_i$. Квантовое состояние после нелинейного кристалла интересно тем, что трехмодовое поле имеет определенную энергию $\hbar\omega_p$, хотя общее число фотонов не имеет точно определенного значения, то есть дисперсия флуктуаций общего числа фотонов ненулевая. Это пока вполне согласуется с простым предположением, что в поле появляется то по одному, то одновременно по два фотона. Перейдем к описанию второй серии испытаний.

Устанавливаем в схеме на рис. 1 второй нелинейный кристалл. При этом все три фазы Φ_p, Φ_s и Φ_i влияют на вероятности фотоотсчетов.

Интерференция с единичной видностью $v_s = v_i = 1$, описываемая законом $P_s = P_i \propto 1 + \cos \Phi$, свидетельствует о том, что, изменяя фазовую задержку любой компоненты поля – Φ_p, Φ_s или Φ_i , можно полностью подавить фотоотсчеты при $\cos(\Phi_p + \Phi_s - \Phi_i) = -1$. Это и есть «нуль» интерференции или интерференционный минимум. В этом случае фотоотсчетов, например, в канале “s” не будет.

Перекрыем свет в промежутке между нелинейными кристаллами в канале “p”. Появляются фотоотсчеты в канале “s”, так как их вероятность перестает быть нулевой. Следовательно, если бы хоть в одной реализации схемы со всеми тремя открытыми каналами отсутствовало поле в канале “p”, вероятность фотоотсчетов в детекторе “s” была бы ненулевой. А она нулевая! Итак, поле в канале накачки “p” присутствует в *каждой* реализации. Аналогично, перекрывая свет в других каналах, доказывается одновременное присутствие светового поля в *каждой* реализации в каналах парных фотонов “s” и “i”. Другими словами, если бы при всех открытых каналах в каких-либо реализациях, то есть запусках одиночного фотона накачки на вход, поле отсутствовало бы, по крайней мере, в одном из каналов, то вероятность фотоотсчетов на детекторе “s” была бы ненулевой. Значит, поле присутствует в *каждой* реализации во всех трех каналах “p”, “s” и “i” между нелинейными кристаллами. Но это возможно лишь в случае одновременного присутствия *всех трех фотонов*, что противоречит закону сохранения энергии: ведь на вход интерферометра подавался один фотон накачки, энергия которого вдвое меньше суммарной энергии всех трех фотонов.

В изложенной аргументации есть, однако, слабое звено: в реальности, как и в упомянутом выше эксперименте [3], вряд ли возможно достичь единичной видности и отсутствия шумового фона. Значит, интерференционных

«нулей» нет. Тем не менее об одновременном присутствии поля во всех трех каналах свидетельствует сама косинусная зависимость вероятности $P_s = P_i$ от суперпозиции фаз, подтвержденная экспериментально [3]. Действительно, если бы поле между нелинейными кристаллами (рис. 1) содержало то один, то два фотона – от реализации к реализации – то $P_s = P_i$ можно было бы представить в виде суммы двух функций, одна из которых зависела бы только от Φ_p , а вторая – от Φ_s и Φ_i . Но $\cos(\Phi_p + \Phi_s - \Phi_i)$ не допускает такого представления.

Эмпирическая «модель» фотона

Приведенные соображения не оставляют места для тривиальной модели светового поля с априори определенным числом фотонов в состоянии с определенной энергией и неопределенным числом фотонов. Итак, число фотонов, а в более общем случае – измеряемая величина вообще – до момента измерения не существует, за исключением ситуации, когда объект измерения находится в собственном состоянии измеряемой величины.

Как писал Д.Н. Клышко: «Фотон является фотоном, если это зарегистрированный фотон» [4]. Источник и приемник нужно рассматривать в комплексе, не отрывая один от другого [5. С. 414]. В квантовой теории это требование, как правило, выполняется автоматически: квантовая теория предсказывает лишь результаты измерений, а измерения предполагают наличие детекторов. Поэтому детекторы всегда присутствуют в задачах. Но это и означает, что мы не можем сказать ничего определенного о физической реальности происходящего между рождением и уничтожением фотона, кроме чисто количественных оценок. Ведь что это за световой поток фотонов, который по своему произволу в момент детектирования «складывается» то в 1, то в 2 фотона? Не означает ли это, что между измерителем и приемником или, по крайней мере, между двумя нелинейными кристаллами на рис. 1 их просто нет? А что тогда есть? По большому счету, физик не может работать без сколь-нибудь представляемых наглядных моделей, на основании которых можно построить математическое описание. Какая же модель фотона адекватно отражает его поведение? Нам представляется, что как критерию наглядности, так и адекватности удовлетворяет следующая несложная конструкция. Итак, фотон представляет собой квазимонохроматический пучок электромагнитных волн или однофотонный волновой пакет с энергией $\hbar\bar{\omega}$, где $\bar{\omega}$ – некая средняя его частота, на всем протяжении которого может при детектировании или взаимодействии с веществом появиться этот квант энергии. Вероятность его появления пропорциональна текущей интенсивности волны в пучке. Как он мгновенно стягивается из всей пространственной конфигурации волны в точку? Сказать трудно. Но он умеет это делать, даже если волновой пучок разделен на несколько изолированных друг от друга непрозрачными стенками каналов (как это могло бы иметь место в описанном выше эксперименте (см. рис. 1), когда отсутствует второй кристалл). Как

происходит эта невидимая мгновенная связь между каналами и удаленными точками пространства в момент коллапса волновой функции – детектирования, скажем, реликтового фотона? Можно только предположить, например, – в дополнительном измерении, не укладываемом в наше трехмерное пространство, то есть в более многомерном мире, в котором пространственно удаленные изолированные точки нашего трехмерного пространства оказываются близкими. Проблема редукции волновой функции, правда, снимается в многомировой интерпретации Эверетта (см., напр., [6]), но уж слишком она «расточительна». Есть, конечно, другие, не менее экзотические интерпретации, которые пока являются лишь гипотетическими. Например, в нашем анализе мы пользовались традиционно понимаемым пространством и временем, в которых реально существует световое поле. Эти послышки, однако, принимаются не всеми физиками. Например, в монографиях профессора Московского университета Ю.С. Владимирова [7; 8] развивается теория, согласно которой всеобщие пространство-время присущи только макрообъектам, а в микромире их не существует. А если нет времени, то нет и понятия априорности, которое являлось ключевым в наших построениях. Отсутствие традиционно понимаемого пространства разрешает недоумения, связанные с квантовой нелокальностью, которая проявляется уже в анализе интерференции одиночных квантовых частиц на двух щелях. Профессор Ю.С. Владимиров использует концепцию дальнего действия, которая предполагает вообще отсутствие полей. Его подход, таким образом, снимает и вполне объясняет рассмотренные квантовые парадоксы, однако тщательная его проработка, как и изучение самого феномена пространства-времени, еще впереди.

К рассмотренным результатам можно подойти и с иных позиций. В работе [9], например, написано о необходимости «осознания относительности представления о мире как о множестве каких-то «тел» (или других «элементов» в любых пространствах реального физического опыта)», и сделан вывод о том, что «природа в конечном счете неразложима на множество каких-либо элементов и существует как нечто единое целое» [9. С. 50]. Но, так или иначе, все это разнообразие интерпретаций, как представляется, не противоречит описанной выше несложной эмпирической модели фотона. Посмотрим, теперь, как она может пригодиться на практике.

Интерференция одиночного фотона во времени

Хорошо известен эффект интерференции одиночного фотона (или другой квантовой частицы) в пространстве: это двухщелевой эксперимент в схеме Юнга (см. напр., [2] и цитируемую там литературу). Это удивительно замечательный эффект, когда неделимая квантовая частица преодолевает двухщелевой экран так, как будто она побывала одновременно в двух щелях, демонстрируя характерную интерференционную зависимость локализации ее в пространстве. Наряду с теоремой Белла и другими подобного рода экс-

периментами, убедительно доказывається непривычное с точки зрения нашего житейского опыта явление квантовой нелокальности (см., напр., [2; 10])

Описанию этих удивительных проявлений квантовой природы посвящено немало литературы. Однако исследованию, казалось бы, не менее интересной интерференции одиночного фотона не в пространстве, а во времени, почему-то не уделяется должного внимания, хотя оно не менее парадоксально (впрочем, см. также [11]). Действительно, одиночный монохроматический фотон, строго говоря, имеет бесконечную длину. Что мешает ему интерферировать самому с собой, например, после нормального падения и отражения от идеального отражающего зеркала, как на рис. 3? В случае плоских фронтов положительно-частотный оператор электрического поля при этом окажется равным

$$\hat{E}^{(+)}(z, t) \propto \hat{a} \left[e^{-i(kz - \omega t)} - e^{-i(-kz - \omega t')} \right], \quad (1)$$

где \hat{a} – оператор уничтожения фотона, $t' - t$ – время запаздывания отраженной моды, k – волновое число. Для простоты мы опустили постоянный нормирующий размерный множитель. Зеркало расположено в плоскости $z = 0$.

Вероятность обнаружить фотон в этой или иной продольной пространственной координате $P(z)$ пропорциональна

$$P(z) = \langle 1 | \hat{E}^{(-)} \hat{E}^{(+)} | 1 \rangle \propto 1 - \cos 4kz. \quad (2)$$

Итак, мы получили характерную для стоячей волны интерференционную зависимость. Здесь мы усреднили по однофотонному состоянию $|1\rangle$, что впрочем, не является исключительно его атрибутом: любая монохроматическая мода даст тот же результат. Почему же мы из всех выделяем именно одиночный фотон?

Ну, во-первых, потому, что он, будучи неделимой частицей, опять же интерферирует сам с собой. Во-вторых, согласно (2), в некоторых плоскостях, где $P(z)=0$, фотона не будет! А куда он исчезает? В вакуум, а потом обратно возвращается? Для фоковского состояния с определенным числом фотонов ($n = 1$) и фиксированной энергией это несколько необычно. Интересно, что «фотона не будет», в том числе и на поверхности зеркала $z = 0$. Конечно, можно возразить, что согласно принципу неопределенности Гейзенберга квантовая частица не может иметь определенной траектории: в лучшем случае, можно говорить лишь о некоей трубке, в пределах которой может находиться частица с определенной долей уверенности. Правда, понятие траектории несколько реабилитировал Р. Фейнман [12]. Согласно его интерпретации, квантовая частица ведет себя так, как если бы она распространялась по всему множеству всех возможных траекторий, причем все они интерферируют между собой. Но если ось распространения плоской моды только одна, то остается только одна эта единственная траектория, следуя по которой, согласно (2), фотон осциллирует, то исчезая, то вновь появляясь.

Конечно, монохроматических мод во Вселенной не бывает, хотя бы в силу ее конечных размеров. Но всегда можно сформировать достаточно узкополосный «однофотонный волновой пакет», который будет иметь некоторую длину когерентности, требуемую для наблюдения интерференции. Такие состояния приготавливаются при помощи параметрического рассеяния света в нелинейном кристалле (см. рис. 2). В нашем случае схема экспериментального наблюдения интерференции одного фотона во времени может выглядеть так (см. рис. 4). Хотя вряд ли удастся зарегистрировать ее на практике, поскольку характерная периодичность интерференционных минимумов и максимумов меньше длины световой волны. Но для того, чтобы убедиться в наличии описанного эффекта «осцилляции фотона» в пространстве, как представляется, достаточно и этого умозрительного мысленного эксперимента.

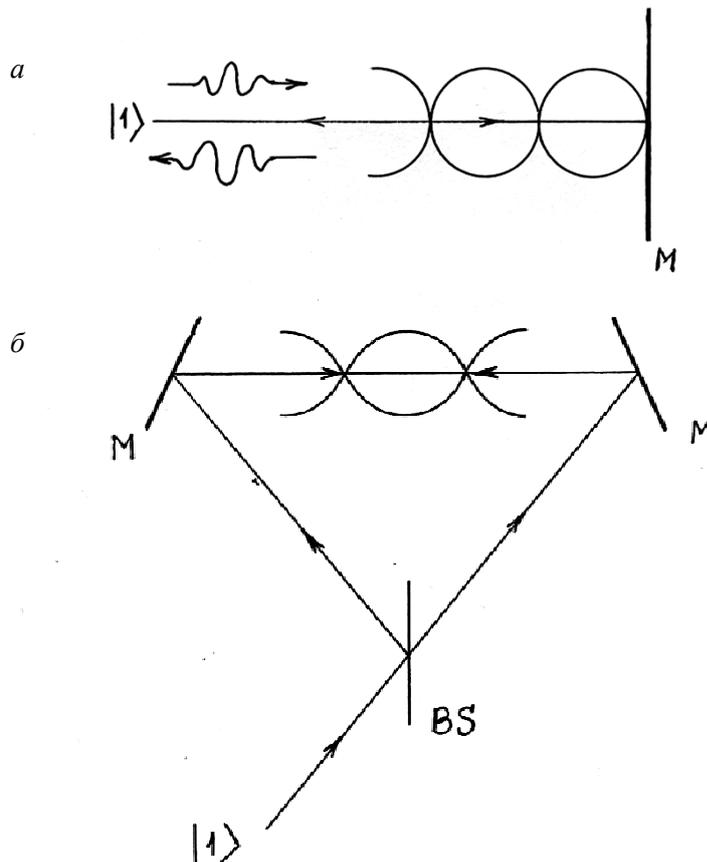


Рис. 3. Стоячая волна «однофотонного волнового пакета», демонстрирующая прерывистость траектории и исчезновение фотона в узлах:
 а) при нормальном отражении от одиночного зеркала М;
 б) фотон образует стоячую волну, симметричную относительно отражающих зеркал М при помощи 50%-ного светоделиителя BS

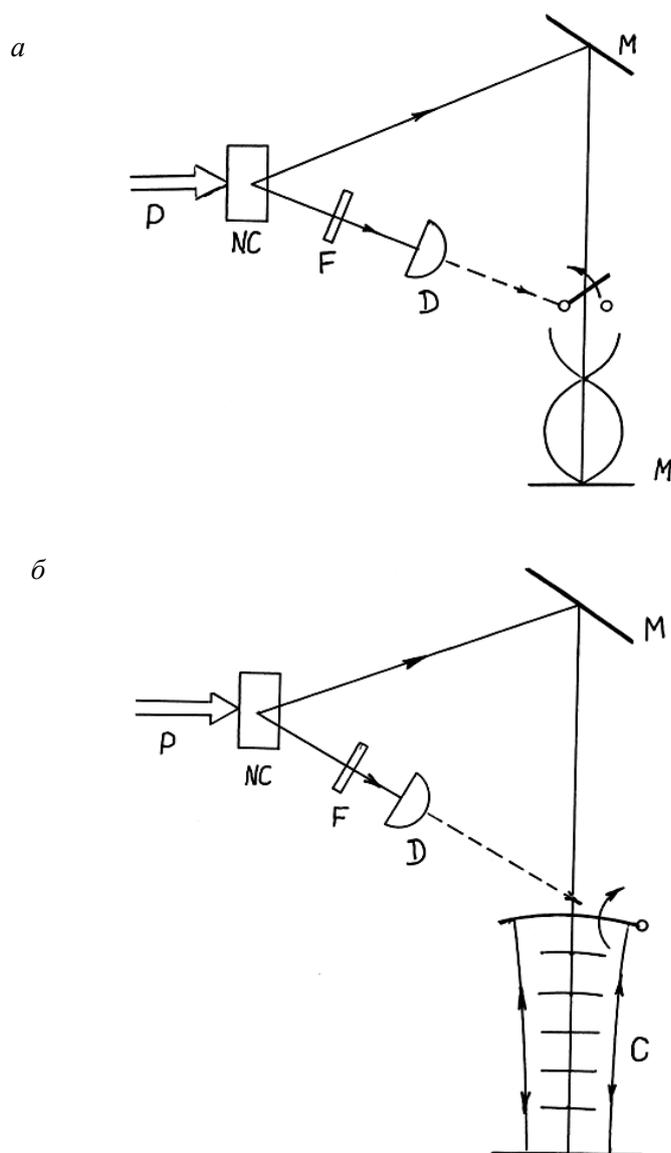


Рис. 4. Схемы формирования интерференции одиночного фотона во времени и стоячей волны:

а) под действием монохроматической лазерной накачки P в нелинейном кристалле NC рождаются фотонные пары. Один из парных фотонов регистрируется детектором D , и второй фотон проходит к зеркалу M , образуя стоячую волну. Светофильтр F установлен для того, чтобы генерируемые коррелированные фотонные пары были узкополосными и имели достаточную для интерференции длину когерентности. В варианте

б) однофотонные состояния закачиваются в резонатор C с идеально отражающими зеркалами, и там тоже формируется стоячая волна, т.е. фотон может быть обнаружен лишь в периодически локализованных отделенных друг от друга областях, между которыми – в узлах – фотона нет, несмотря на, казалось бы, его движение от зеркала к зеркалу.

Верхнее зеркало резонатора выполняет также функцию затвора

Натурный же эксперимент, как представляется, возможен лишь с многофотонными состояниями. Например, в [13] формировалась горизонтальная стоячая световая волна в резонаторе, на которую сверху падали одиночные атомы рубидия. Последние вели себя так, как будто они преодолевали синусоидальную дифракционную решетку, что доказывает, во-первых, ее наличие, во-вторых, косвенно доказывает отсутствие фотонов в узлах, т.е. тоже своего рода прерывистость траектории.

Можно также попробовать «рассмотреть» рентгеновскую стоячую волну электронным микроскопом. Узлы и пучности там вряд ли заметить, но уменьшение отклонения электронов в узлах должно быть заметно, что тоже свидетельствует об осциллирующем характере траектории рентгеновских фотонов. Хотя не бесспорно: ведь отсутствие изменения траекторий электронов, пересекающих узлы, можно трактовать как результат одновременного действия двух встречных фотонов.

Перейдем теперь к другим интересным, на наш взгляд, проявлениям интерференции одиночных фотонов во времени.

Вернемся к параметрическому рассеянию света. За счет эффекта фазового синхронизма и использования длинного нелинейного кристалла (см., например, [14]) можно добиться генерации узкополосных парных фотонов. Заключим теперь один из каналов генерации, скажем сигнальный, в резонатор с идеально отражающими зеркалами (сверхпроводящими либо использующими эффект полного внутреннего отражения). Настроим резонатор так, чтобы частота генерации сигнального фотона приходилась точно на интерференционный минимум резонатора. Будет ли происходить рождение фотонных пар? Очевидно, нет, поскольку такого типа колебаний в идеальном резонаторе быть не может. Кроме того, затравкой параметрического рассеяния являются нулевые флуктуации вакуума. А в идеальном резонаторе на частоте генерации за счет селекции их просто нет (аналогично эффекту Казимира)!

Итак, рождение фотонных пар прекращается. Но этот эффект можно трактовать и как интерференцию еще не рожденного в процессе параметрического рассеяния фотона самого с собой, поскольку такая интерференция препятствует его рождению!

Эту схему можно еще более упростить. Поместим возбужденный одиночный двухуровневый атом в резонатор, например, в центре идеально отражающей сферы, радиус которой таков, что если бы атом излучил фотон, то для частоты двухуровневого спонтанного перехода отраженное излучение вернулось бы в противофазе (рис. 5). Ясно, что такого излучения в резонаторе быть не может, следовательно, атом так и останется возбужденным. А что это, как не интерференция еще не рожденного фотона самого с собой в различные моменты времени? Чем это хуже двуцелевой интерференции Юнга одиночного фотона?

Подчеркнем также сравнительную простоту рассмотренных нами интерференционных схем в том смысле, что нам не требуется запутанных (entangled) фотонных пар, как это имеет место, например, в [15; 16].

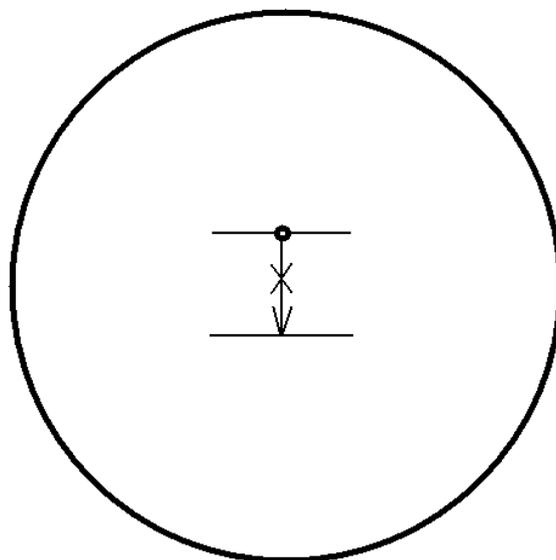


Рис. 5. Возбужденный двухуровневый атом, помещенный в центр закрытого сферического резонатора с идеально отражающей внутренней поверхностью
Это можно рассматривать как самоинтерференцию еще не рожденного одиночного фотона. Такой атом никогда не испустит фотона, если частота перехода попадает на интерференционный минимум резонатора (антирезонанс)

Заключение

Вопрос, вынесенный нами в заголовок, возник потому, что объективное существование фотона, как представляется, должно быть связано с его индивидуальным существованием, которое очень трудно представить как возникновение фотоотчетов из какой-то таинственной сущности. Но именно такая «сущность» видится при анализе рассмотренного нами эксперимента по наблюдению трехлучевой интерференции, когда она – эта сущность – при детектировании «складывается» то в два, то в один фотоотсчет. Еще более этот вопрос обостряется «стоячей волной» одиночного фотона. Как можно говорить о том, что он «куда-то летит», если его «траектория» прерывиста и он периодически исчезает, «ныряя» в вакуум? А как может интерферировать сам с собой еще не рожденный фотон? Ответа мы не знаем, но, как принято в квантовой теории, для предсказания поведения бозонов можно использовать мысленную эмпирическую модель, которая не укладывается в существующее представление о 4-мерном пространстве-времени как некой сцене, на которой разыгрывается действие. Все это скорее свидетельствует в пользу концепции дальнодействия.

Авторы благодарны А.А. Подшивалову, В.В. Тарасенко и М.Х. Шульману за полезные обсуждения.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-07-00938 А и 14-02-00458 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Belinsky A.V., Klyshko D.N.* Laser Physics. – 6 (1996) 1082.
2. *Белинский А.В.* Квантовые измерения. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
3. *Burlakov A.V., Chekhova M.V., Klyshko D.N. et. al.* Phys. Rev. A56. – 1997. – 3214.
4. *Клышко Д.Н.* Квантовая оптика: квантовые классические и метафизические аспекты // УФН. – 164. – 1994. – С. 1187–1214.
5. *Матвеев А.Н.* Атомная физика. – М.: Высшая школа, 1989.
6. *Менский М.Б.* Феномен сознания с точки зрения квантовой механики // Метафизика. – 2012. – № 3. – С. 103–114.
7. *Владимиров Ю.С.* Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. 1: Теория систем отношений. – М.: МГУ, 1996.
8. *Владимиров Ю.С.* Реляционная теория пространства-времени и взаимодействий. – Ч. 2: Теория физических взаимодействий. – М.: МГУ, 1998.
9. *Цехмистро И.З.* О парадоксе Эйнштейна – Подольского – Розена // Философия науки. – 1984. – № 1. – С. 46–50.
10. *Белинский А.В.* // УФН. – 173. – 2003. – № 8. – С. 905–909.
11. *Фриш О.* Возьмем фотон и... // УФН. – 90. – 1966. – С. 379–386.
12. *Фейнман Р., Хиббс А.* Квантовая механика и интегралы по траекториям. – М.: Мир, 1968.
13. *Durr S., Nonn T., Rempe G.* Origin of Quantum Mechanical Complementary Probed by a ‘Which-Way’ Experiment // Atom Interferometer. – 1998. – 395. – P. 33.
14. *Белинский А.В.* // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 1999. – № 3. – С. 34.
15. *Megidish E., Halevy A., Shacham T., Dvir T., Dovrat L., Eisenberg H.S.* arXiv:1209.4191v1 [quant-ph] 19 Sep 2012.
16. *Wiegner R., Thiel C., Zanthier J. von, Agarwal G. S.* arXiv:1102.1490v1 [quant-ph] 8 Feb 2011.

A MODEL OF THE PHOTON: AN ELECTROMAGNETIC FIELD OR THE CONCEPT OF LONG-RANGE ACTION?

A.V. Belinsky, V.B. Lapshin

Imaginary and real experiments with single photons putting in doubt the field nature of bosons and giving evidence in support of adopting the concept of long-range action are examined.

Key words: the field nature of bosons, three-beam interference, self-interference, single photons, “standing wave”, the concept of long-range action, Imaginary and real experiments.

ГЕОМЕТРИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ И КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

КОНЦЕПЦИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ*

А.Ю. Севальников

Институт философии РАН

Работа посвящена проблеме существования квантовых объектов. Как теоретический уровень (ЭПР-парадокс, анализ неравенств Белла), так и эксперименты показывают, что квантовые объекты определенным образом не существуют до наблюдения. В работе предпринимается попытка интерпретации этого явления в русле метафизики Аристотеля (В. Гейзенберг), понимание которого оказывается очень близким к философским идеям Хайдеггера.

Ключевые слова: квантовая механика, существование, онтология, бытие в возможности, бытие в действительности, потенциальное, актуальное, декартовская парадигма.

В 2004 г. в России был издан перевод книги Луиджи Аккарди «Диалоги о квантовой механике» [1]. В центре ее внимания находится проблема существования квантовых объектов. Уже в самом начале первой главы автор приводит более двух десятков цитат физиков и философов, указывающих на совершенно иное понимание существования квантовых объектов в квантовой механике, кардинально отличающееся от классического понимания, принятого в современной науке и восходящего своими корнями к классической парадигме. Укажем из множества цитат лишь некоторые из них, отображающие суть дела.

«Дайсон: “Микроскопическая физика... это поле, в котором догма Моно¹ – где краеугольным камнем научного метода является постулат о том, что природа объективно существует, – не верна”. Д’Эспанья: “Утверждение

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ. «Проблема новой онтологии в современном физическом познании», проект № 14-03-00452а.

¹ Речь идет о т.н. «догме Моно», известного биолога, лауреата Нобелевской премии Жака Моно.

о том, что две несовместимые величины не могут иметь точные значения в одно и то же время, проявляется в любой формулировке квантовой механики”. Паризи: “Не верно предположение о том, что система остается в определенном состоянии, когда ее не наблюдают”. Мермин: “Мы знаем, сегодня можно доказать, что даже луна не находится на своем месте, если на нее никто не смотрит”. Греко: “Цена, которую платит реалист, – восстановление двусмысленности. Квантовая луна находится там только потенциально, если на нее никто не смотрит”. Файн: “Реализм мертв. Его смерть была ускорена дискуссиями по интерпретации квантовой теории, где нереалистическая философия Бора превалировала над страстным реализмом Эйнштейна”. Бор: “Действительно, открытие квантования не только делает видимым естественное ограничение классической физики, но проливает новый свет на старую философскую проблему объективного существования явлений независимо от наших наблюдений, ставит науку в совершенно новые условия... Ограничение возможности говорить о явлениях как объективно существующих, наложенное на нас самой природой, находит свое выражение... именно в формулировке квантовой механики”. Бор: “Мы должны совершенно отказаться от приписывания традиционных физических атрибутов микрообъектам”. Патнэм: “Вместо фразы: наблюдаемое не существует до тех пор, пока не будет измерено, мы должны говорить, что в соответствии с копенгагенской интерпретацией наблюдаемые микроскопические явления не существуют”. Гейзенберг: “Физики постепенно привыкли рассматривать электронные орбиты не как реальность, а скорее как возможность”. Пьятелли-Палмарини: “Одновременность нахождения в различных местах в мире частиц должна восприниматься буквально. Отдельная частица не только может находиться в один и тот же момент в разных местах, но она может даже одновременно следовать различными путями”. Галлино: “Все же имеет место тот факт, что копенгагенская интерпретация была и остается предметом многих других интерпретаций, некоторые из которых действительно выражают идею о том, что материя, ткань, реальности, будь она лунной или земной, сама по себе не существует”. Шимони: “Согласно квантовой механике не все качества системы имеют (определенные) значения, заданные одновременно. Возможно, лучшим примером этого утверждения является эксперимент с двумя отверстиями”. Герберт: “В квантовом состоянии неизмеримый *куон*² (*quon*) существует не так, как измеренный *куон*... Неизмеренный *куон* в меньшей степени присущ реальности, чем *куон*, который появляется на наших флуоресцирующих экранах”» [1. С. 45–63].

Ссылки на авторитеты в науке ничего не решают. Автор книги критикует высказывания такого рода, на что имеет полное право, и пытается выстроить свою концепцию, исходящую из иного понятия вероятности. Однако современная наука носит эмпирический характер. Эксперименты же вещь

² Понятие *куон* (*quon*) Ник Герберт ввел для обозначения квантового объекта в своей книге *Quantum Reality* (1985).

упрямая, и они говорят о физике квантовых явлений нечто иное, радикально отличающееся от позиции Аккарди, рассыпающее все его построения, как карточный домик. Правда, сама книга вышла задолго до того, как были проведены соответствующие эксперименты, что ее и оправдывает.

Прежде чем указать на эти эксперименты, сделаем необходимый теоретический экскурс. Альберт Эйнштейн после 1935 г. задавался одним вопросом: «Существует ли Луна, покуда на нее не смотрит мышь?» Этот вопрос Эйнштейна имеет длинную предысторию. Подозрения в том, что в «квантовом королевстве» *что-то не так* стали закрадываться в сознание физиков очень и очень давно. Уже первая модель атома водорода Бора 1913 г., еще не совершенная, но уже «фантастическая», по свидетельству современников, ставила вопрос о «странном» поведении электрона, когда он, например, должен целиком занимать определенную орбиту. Десять лет спустя эти идеи разовьет Луи де Бройль, утверждая, что при движении любой атомной частицы с ней необходимо связывать волну, причем волну *нематериальную*, что прямо подчеркивается де Бройлем в самой первой его работе по корпускулярно-волновому дуализму атомных объектов [2. С. 196].

Рождение «нормальной» квантовой теории, ее современного формализма по праву связывается со статьей Вернера Гейзенберга 1925 г. «О квантотеоретической интерпретации кинематических и механических соотношений» [3]. Уже в самом ее начале Гейзенберг высказывает сомнение, что такие величины, как координаты и периоды обращения электрона, могут быть наблюдаемыми. Обсуждая эмпирический материал, связанный с квантовой теорией атома, буквально абзацем ниже, он опять утверждает, что, «повидимому, лучше совсем отказаться от надежд на то, что ненаблюдаемые сегодня величины (например, координаты, и периоды обращения электрона) станут наблюдаемыми» [4. С. 86]. Именно этот вопрос становится годом спустя основным предметом острого спора Гейзенберга с Эйнштейном на коллоквиуме в Берлине весной 1926 г. Эйнштейн задает вопрос молодому Гейзенбергу о причинах «столь странного подхода», в котором он хочет «упразднить орбиты электронов в атоме» [5. С. 191]. Гейзенберг дает ему ответ, и между ними разгорается спор о «наблюдаемых» и «ненаблюдаемых» в области микроявлений.

Я здесь не буду описывать всю историю знаменитого страстного спора Эйнштейна с так называемой «Копенгагенской школой». Отмечу лишь, что в центре его внимания находится как раз проблема реализма: как и каким образом существуют квантовые объекты. Эйнштейн утверждает классический реализм, а Бор с Гейзенбергом настаивают на необходимости «радикального пересмотра на проблему физической реальности».

«Вершиной» этих споров стал 1935 г., когда Эйнштейн вместе со своими сотрудниками Подольским и Розеном попытался показать, что квантовое описание не является полным. В статье «Можно ли считать, что квантовомеханическое описание физической реальности является полным?» был сформулирован знаменитый ЭПР-парадокс, который, по сути, и находится в

центре внимания всех современных экспериментов. В самом начале статьи Эйнштейном формулируется определение полноты теории. «Каждый элемент физической реальности должен иметь отражение в физической теории», а после этого дается понимание физической реальности: «Если мы можем без какого бы то ни было возмущения системы предсказать с достоверностью (то есть с вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, соответствующий этой физической величине» [6. Р. 777]. Эйнштейн конструирует мысленный эксперимент, экспериментальная проверка которого, по его мнению, должна была бы показать, либо 1) неполноту квантовой механики (на что он и надеялся), либо альтернативный вывод, что 2) свойства квантовой частицы определенным образом не существуют до измерения³, что и было неприемлемым для Эйнштейна.

Эксперименты, связанные с ЭПР-парадоксом, в настоящее время уже проведены и связаны с проверкой так называемых «неравенств Белла». Джон Белл в 1964 г. вывел неравенства, проверка которых и должна была показать правоту или ошибочность квантовой механики. Первые эксперименты были проведены Аленом Аспе еще в 1982 г. Неравенства, как показывает опыт, нарушаются и неизменно подтверждают выводы КМ. Есть нечто общее как в ЭПР-парадоксе, так и в теории, связанной с неравенствами Белла. Только в ЭПР-парадоксе это связано с конечным выводом работы, а в теории Белла с изначальной предпосылкой вывода неравенств. Неравенства Белла выводились при двух предпосылках: 1) что верно предположение о локальном реализме и 2) что наблюдаемые величины существуют в пространстве до измерения. Если верна первая предпосылка, то никак не может осуществляться «действие призраков на расстоянии» [6]. Но именно это мы и видим во всех экспериментах по проверке неравенств Белла, именно это явление лежит в известном явлении «квантовой телепортации», нашедшем уже применение в ряде технических приложений.

Особые опыты были поставлены и по проверке «априорного существования до измерения», а именно группой Антона Цайлингера, которые не оставили практически никаких шансов сторонникам неореализма. «Результаты этого эксперимента были опубликованы в «Nature» в 2000 г. В этом эксперименте исследовались трехчастичные запутанные состояния фотонов... Цайлингер с сотрудниками показали, что квантовомеханический подход и результат такого подхода несовместимы с предположением, что наблюдаемые свойства объекта (в общем случае) существуют до наблюдения как объективная самостоятельная внутренняя характеристика локальных объектов» [7]. Надо сказать, что еще ранее аналогичные эксперименты были поставлены и в России, на физфаке МГУ. Они были проведены на лазерных фотонах, в т.н. экспериментах по «интерференции 3-го порядка». Как теоретические

³ «Когда операторы, соответствующие двум физическим величинам, не коммутируют, эти две величины не могут быть одновременно реальными».

выкладки, так и сам эксперимент и следующие из него выводы изложены в книге Александра Белинского «Квантовые измерения» [8]. Приведу только вывод как из теоретического анализа, так из самих опытов. Как утверждает Белинский, результаты опытов «не оставляют места для тривиальной модели светового поля с априори определенным числом фотонов... с определенной энергией... Число фотонов, а в более общем случае – измеряемая величина вообще – до момента измерения не существует» [8. С. 89]. Комментируя этот вывод, Белинский приводит тезис Д.Н. Клышко: «Фотон является фотоном, если это зарегистрированный фотон». В таких выводах нет ничего нового с тем, что утверждал еще Эйнштейн в 1935 г. или что констатировал позднее А. Цайлингер в 2007 г.

Уже совсем недавно, в 2014 г., были поставлены и вовсе уж необычные эксперименты, получившие название – «Наблюдение квантового Чеширского кота». В этих опытах наблюдается некое свойство (улыбка кота) объекта, там, где его (кота) нет! Если говорить конкретно, наблюдается спин нейтрона в интерферометре, в том его месте, где сам нейтрон принципиально не наблюдаем [9].

Несмотря на неоспоримость результатов экспериментов по проверке неравенств Белла и тесно связанного с ним ЭПР-парадокса, их основные выводы многие физики пытаются поставить под сомнение. При этом обсуждается, однако, все что угодно – квантовые корреляции, запутанность состояний, возможность сверхсветовых сигналов, сепарабельность или несепарабельность состояний и т.д., но только не центральное положение критики Эйнштейна с сотрудниками, не само понимание реальности и не вывод о характере существования квантовых объектов. Вовсе не случайным является замечание известного австрийского физика Антона Цайлингера, что «несовместимость между квантовой механикой и идеалом классического реализма куда сильнее, чем считало и считает большинство физиков» [10]. Это «большинство» просто игнорирует эти выводы, как бы их не замечая. А основные выводы как из опытов по проверке неравенств Белла, так и из ЭПР-парадокса – *это особый характер существования квантовых объектов*. Упор Эйнштейна вместе с соавторами в ЭПР-парадоксе делается именно на этот факт. Парадоксально, но как критик квантовой теории Эйнштейн в то время ясно видел и осознавал, к каким изменениям ведет переосмысление понимания реальности. Другое дело, что он не принимал такого рода изменений и отсутствие аргументов против теории квантов беспокоило его до конца жизни.

Все проведенные эксперименты однозначно указывают на то, что до измерения «две физические величины с некоммутирующими операторами не могут быть реальными одновременно» (Эйнштейн, 1935 г.), то есть, действительно, определенным образом не существуют до измерения. В свое время этот же вывод подчеркивал Дж. Уиллер, когда формулировал «основной урок» квантовой механики: «Никакой квантовый феномен не может считаться таковым, пока он не является регистрируемым (наблюдаемым)

феноменом». В этом выводе физическая теория впервые явно соприкасается с философией, о чем еще 20 лет назад говорил тот же А. Цайлингер: «В настоящее время те вопросы, что Платон с Аристотелем решали в тенистых аллеях вблизи Афин, теперь решаются в экспериментах с лазерным светом». Физика, вместе с Эйнштейном и его оппонентами, стала решать вопрос существования, что традиционно относилось к компетенции метафизики. И здесь однозначно можно утверждать, что происходит существенный разрыв с декартовской парадигмой, предопределившей развитие науки почти на четыре столетия.

Прежде чем приступить к изложению своей точки зрения, хотелось бы выказать предварительно несколько положений: 1) проблема понимания квантовой механики не является проблемой физической, а напрямую связана с философией; 2) эта проблема на самом деле более сложна, нежели кажется.

С точки зрения многих физиков, а если еще точнее, формального математического аппарата, никакой проблемы вообще не существует. Есть уравнения Шредингера, Дирака, матричный формализм Гейзенберга, формализм S-матрицы или же метод «интегралов по путям» Фейнмана. Для практических целей, для решения конкретных задач больше ничего и не нужно. Все что нам остается, просто умело решать уравнения, что ёмко выражается афоризмом Дэвида Мермина: «Заткнись и считай!» (англ. «Shut up and calculate!»), который часто приписывается то Ричарду Фейнману, то Полю Дираку [11. Р. 10].

Однако проблема существует и связана она с попытками осмысления того, что же стоит за всеми этими уравнениями, того, с чем они оперируют или с тем или иным формализмом. И проблема эта оказывается не только физической, но и философской. Что бы вы ни взяли в квантовой механике при ближайшем рассмотрении, оно начинает выбиваться из рамок обыденных представлений. Впрочем, дело состоит вовсе не в «обыденных представлениях». Дело гораздо глубже! Мы утверждаем и настаиваем, что в современной физике происходит отход, даже, скорее, разрыв с декартовской парадигмой.

Вообще само по себе такое утверждение не ново. Наверное, всю половину прошлого столетия об этом говорили как физики, так и философы. Аргументы были связаны опять с той же квантовой механикой. Однако, что утверждалось? С разными вариациями говорилось о том, что в квантовой механике происходит отказ от декартовского разделения на «вещь протяженную» и «вещь мыслящую», на этой основе утверждалось, что так или иначе надо вводить субъект в физику, что наука становится «человекомерной», что физика теряет свой статус «объективности», и даже вплоть до того, что стирается грань между истиной и ложью. Все это достаточно хорошо известно, на этом в данной работе у нас просто нет возможности на этом останавливаться. Кратко сформулируем лишь два тезиса, обоснование которых будет дано в последующих работах.

1. *В квантовой механике* не происходит разрыва между «*res cogito*» и «*res extensa*». Квантовая механика не теряет характер объективности, и не требует введения субъективности что даже признавал Гейзенберг, многие утверждения которого и давали основания для такого рода утверждений.

2. Вообще говоря, современная наука все-таки вводит субъект в свое поле внимания, однако совершенно в иной области. Связано это с антропным принципом и с космологией. К сожалению, все самое существенное, связанное с этим принципом, хотя о нем много пишется и говорится, остается опять же «за кадром» для современной философии. И ситуация сходна во многом с квантовой механикой. Вся «непроясненность», связанная как с квантовой механикой, так и антропным принципом, вытекает из определенных аспектов декартовской парадигмы. В этой работе мы рассматриваем лишь то, что связано только с квантовой механикой.

Основное утверждение состоит в следующем. В современной физике в результате ряда теоретических и экспериментальных работ, связанных с квантовой механикой, под вопросом оказалось одно из основополагающих положений декартовской парадигмы – характер существования материальных объектов. Как понятие «протяженности», так и характер движения, которые вошли «в плоть и кровь» новоевропейской культуры, должны радикально переосмысливаться. Физическое тело, по Декарту, «*res extensa*», имеет свой преимущественный атрибут – протяженность. В своих «Началах философии» он пишет: «...У каждой субстанции есть преимущественное, составляющее её сущность и природу свойство, от которого зависят все остальные. Именно протяжение в длину, ширину и глубину составляет природу субстанции, ибо все то, что может быть приписано телу, предполагает протяжение и есть только некоторый модус протяженной вещи... Так, например, фигура может мыслиться только в протяженной вещи, движение только в протяженном пространстве...» [12. § 53]. Вместе с критикой «скрытых качеств», ставшей общим местом большинства мыслителей Нового времени, это означает, что вещи, объекты физического мира, могут *существовать и двигаться только* в пространстве. Все эти положения в квантовой механике оказываются под вопросом. Такие эффекты, как «квантовая телепортация» и «ЭПР-парадокс», и не только они, дают радикально иной ответ и на характер движения, и на само понимание существования.

Выводы квантовой теории неизменно подтверждаются в экспериментах, что идет вразрез с представлениями Эйнштейна о реальности. Он придерживался декартовского, «субстанциалистского» определения реальности. По Декарту, «под субстанцией мы можем разуметь лишь ту вещь, коя существует, совершенно *не нуждаясь для своего бытия в другой вещи*» («Начала философии», I. 51). Такая «вещь» существует «сама по себе», ее бытие не нуждается в другом сущем. Хайдеггер, комментируя это место из «Первоначал» Картезия, в «Бытии и времени» правильно говорит, что «бытие “субстанции” характеризуется через ненуждаемость. То, что в своем бытии совершенно не нуждается в другом сущем, то в собственном смысле и удовле-

творяет идеи субстанции» [13. С. 92]. Прямо с противоположной ситуацией мы сталкиваемся в квантовой механике.

Есть индивидуальные квантовые объекты, например, электроны, протоны, нейтроны и т.д. Друг от друга они отличаются массой, зарядом, спином, рядом других квантовых чисел, что с точки зрения философии и характеризует их сущность. Проявление этой сущности зависит от «экспериментального окружения» и не существует «само по себе», как говорил В. А. Фок – оно «относительно к средствам наблюдения». Само слово «наблюдение» не должно вести к неправильному пониманию и введению так называемого «наблюдателя» в аппарат квантовой механики, что постоянно отмечалось В.А. Фоком и другими физиками, например Ричардом Фейнманом. В своих знаменитых «Лекциях по физике» он утверждал: «Природа не знает, на что вы смотрите, на что нет, она ведет себя так, как ей положено, и ей безразлично, интересуют ли вас ее данные или нет» [14. С. 19]. Это же был вынужден признавать и сам Гейзенберг. Например, в своей «Физике и философии» он четко и недвусмысленно заявлял: «Конечно, *не следует понимать введение наблюдателя неправильно*, в смысле внесения в описание природы каких-то субъективных черт. Наблюдатель выполняет скорее функции регистрирующего “устройства”, то есть регистрирует процессы в пространстве и времени; причем дело не в том, является ли наблюдатель аппаратом или живым существом; но *регистрация, то есть переход от возможного к действительному*, в данном случае, безусловно, необходима и не может быть исключена из интерпретации КМ» [5. С. 83].

В данном случае мы согласны с Вернером Гейзенбергом. В центре математического формализма квантовой механики лежит так называемая *волновая функция*, задающая *возможность* нахождения в том или ином состоянии, а если точнее, *возможность актуализации* этого состояния. Переход от возможного к действительному, в согласии с Гейзенбергом, не может быть исключен из формализма КМ. А вот введение Гейзенбергом понятия «регистрация» вносит ненужную двусмысленность. «Регистрация» вносит «наблюдателя», но тут мы согласны с Фейнманом, что природе безразлично, «интересуют ли вас ее данные или нет». Все что мы видим, что квантовая возможность может реализоваться двумя взаимно исключающими альтернативами. Двумя и только двумя. И эти альтернативы каждое мгновение реализуются в природе независимо от нас. «Игре» этих альтернатив и обязана наша наблюдаемая Вселенная, возникшая за много миллиардов лет до появления этого самого «наблюдателя».

Итак, повторим еще раз, в центре внимания КМ лежит переход от возможного к действительному. И здесь опять можно вспомнить утверждение Гейзенберга, что математический аппарат КМ возвращает нас к метафизике Аристотеля. В своей работе «Язык и реальность в современной физике» он писал: «Понятие возможности, игравшее столь существенную роль в философии Аристотеля, в современной физике вновь выдвинулось на центральное место. Математические законы квантовой теории вполне можно считать

количественной формулировкой аристотелевского понятия “дюнамис” или “потенция”» [15. С. 223].

И физики, и философы, занимающиеся этой проблематикой, давно говорят и пишут, что понятие возможности, связанное с понятием волновой функции, занимает центральное положение в КМ. В физике впервые это понятие возникло еще в 1924 г., когда Бор, Крамерс и Слэтер «попытались устранить кажущееся противоречие между волновой и корпускулярной картинками с помощью волны вероятности. Электромагнитные световые волны толковались не как реальные волны, а как волны вероятности, интенсивность которых в каждой точке определяет, с какой вероятностью в данном месте может излучаться и поглощаться атомом квант света ...С введением волны вероятности в теоретическую физику было введено совершенно новое понятие... Волна вероятности... означала нечто подобное стремлению к определенному протеканию событий. Она означала количественное выражение старого понятия “потенция” аристотелевской философии» [5. С. 15–16].

В рамках философского осмысления квантовой теории это было замечено еще до известных работ Гейзенберга. Впервые о том, что КМ связана с аристотелевской метафизикой, стали говорить неотомисты еще в 30-е гг. XX века. И вот здесь происходит самое интересное! Несмотря на более чем 80-летнюю историю такого подхода, в его рамках практически ничего нового не сделано, и более того, КМ стала рассматриваться как самый серьезный вызов для томистской философии. Как отмечает Д.В. Кирьянов, ссылаясь на Яки, Кэлдина и Эррея, в целом «томисты испытывали небольшой интерес к современной науке. В первой половине XX в. томистская философия школьных профессоров практически не имела никакой связи с прогрессом научного знания и была неспособной ответить на ее требования. Философия природы оставалась редко затрагиваемой областью в мире томистской философии, ее диалект становился все более и более архаичным и менее понятным для внешнего мира» [16. С. 136].

В настоящее время, с одной стороны, ситуация изменилась, за последние 20 лет появилось около десятка авторов, которые пытаются трактовать КМ с позиций неотомизма. С другой же стороны, ситуация мало изменилась, по сравнению с тем временем, как появились первые работы в рамках этого подхода. Да, ключевым является рассмотрение акта и потенции. Потенциальное связывается с материей, которая рассматривается как чистая возможность. Наблюдаемое есть не что иное, как актуализация субстанциальной формы, то есть это хорошо известный подход в рамках гилеморфизма.

Обозначенные рамки, решая некоторые вопросы, оставляют без ответа другие, касающиеся как физики, так и философии. Например, каким образом следует рассматривать с точки зрения метафизики принципиальный корпускулярно-волновой дуализм квантовых объектов? В рамках томизма, если объект не обладает неизменной сущностью, он не может быть предметом метафизического рассмотрения. Возникает вопрос о сущности этого дуа-

лизма в рамках томистской метафизики. Еще более серьезный вопрос связан с причинностью. «Квантовая механика показала неприменимость в области микромира классического представления о причинности, разделявшегося томистской эпистемологией, поскольку на квантовом уровне возможна только статистическая форма знания. Более того, согласно принципу неопределенности Гейзенберга, невозможно говорить об одновременном наличии у квантово-механических объектов характеристик, определяемых некоммутирующими операторами. Томистская философия природы, утверждающая объективность знания, должна была каким-то образом дать ответ на этот вызов» [16. С. 136]. За два десятка лет работы с этой тематикой в рамках неотомизма я не нашел четкого, внятного и артикулированного ответа на все эти вопросы.

Однако ответы на вопросы, поставленные выше, легко даются, причем ответ действительно в рамках аристотелевской метафизики, но при совершенно ином прочтении Аристотеля, философия которого и лежит в основе и томизма и неотомизма. В данном случае я согласен с утверждением Хайдеггера, что «аристотелевская “Физика” есть сокровенная и потому ещё ни разу не продуманная в достаточной степени основная книга западной цивилизации» [17. С. 31]. Сопряжение КМ и метафизики Аристотеля часто вызывает отторжение и «аллергию» людей, привыкших мыслить «прогрессивно» и «по-новоевропейски». Опять же соглашусь с Хайдеггером, когда он утверждал в своих знаменитых «Цолликоновских семинарах», что «вы должны научиться не приходить в ужас, когда вам говорят об Аристотеле. Аристотель и древние греки не “выдохлись”, не “устарели”. Напротив, мы даже не начинали их понимать» [18. С. 48].

Приведу пример Этьена Жильсона. В работе «Бытие и сущность» им утверждается, что у Аристотеля не было средств для определения того, что есть действительность. «Все, что он смог сделать, – направить наш взгляд на действительность как на такую вещь, которую нельзя не узнать, коль скоро мы ее видим. Например, он мог показать нам противоположность действительности, то есть чистую возможность. Но это дает нам не очень много, так как понять потенцию в отрыве от акта еще менее возможно, чем понять акт в отрыве от потенции» [19. С. 355]. Однако Аристотель решает несколько иную задачу, о чем Жильсон и говорит уже на следующей странице. Суть проблемы состоит в том, как описать природное, *δυνάμις*, если мы исходим из пары противоположностей: эйдосы и материя (по Платону), или материя и форма (по Аристотелю). «Однако в наибольшее затруднение поставил бы вопрос, какое же значение имеют эйдосы для чувственно-воспринимаемых вещей – для вечных либо для возникающих и преходящих. Дело в том, что они для этих вещей не причина движения или какого-то изменения» [20]. В последнем утверждении – центр расхождения Аристотеля с Платоном. Аристотель критикует, что все существующее происходит из взаимодействия противоположных начал. В своей «Метафизике» он прямо утверждает, что противоположности не могут выступать в качестве начала всех вещей.

«Противоположности не могут воздействовать друг на друга, говорит Аристотель. Между ними должно находиться нечто третье, которое Аристотель обозначает термином *ὑποκείμενον*, дословно переводимым как подлежащее (лежащее внизу, в основе)» [21. С. 260]. В своей «Физике» Аристотель это «третье» мыслит **«как особое природное начало»**, которое «опосредует» противоположности. Оно является «средним членом», как определяет Аристотель – «начало какой-то особой промежуточной природы» [22]. Таким посредником у Аристотеля выступает «бытие в возможности» – *δύναμις*. Это понятие вводилось им как уточнение платоновского понятия материи. В «Тимее» она выступает как «небытие», и как «восприемница и кормилица всего сущего». Как справедливо замечает Гайденок, «это второе значение материи у Платона, во-первых, недостаточно выявлено и отделено от первого, а во-вторых, при уточнении этого понятия Платон сближает с пространством» [21. С. 281]. Отрицая сближение материи с пространством, полемизируя с Платоном, Аристотель «расщепляет» материю, проводит различие между «лишенностью» и материей как возможностью (*δύναμις*).

Введение Аристотелем понятия «бытия в возможности» позволило ему описать мир феноменальный, становящийся, природу, что было невозможным в рамках школы элеатов и Платона. Философия природы Стагирита – это философия процесса, а еще точнее, становления, *осуществления*. Она базируется на особой онтологии, которой не было ни у элеатов, ни у Платона. Для того чтобы описать подвижное, нужна триада понятий: необходимое – возможное – актуальное. Возможное в этой схеме является «средним членом», оно опосредует, соединяет две противоположности и несет их «отпечатки» в самой себе. Вслушаемся еще раз в известное определение «бытия возможности» из пятой книги Аристотеля «Метафизика»: «Названием способности (возможности) прежде всего обозначается начало движения или изменения, которое находится в другом или поскольку оно – другое» (Метафизика, V, 12). При всех толкованиях этого понятия, хотя и везде излагается аристотелевская схема рассуждений об опосредовании противоположностей, почему-то затушевывается самый существенный аспект у Стагирита, что это **особый вид природного** начала – *δύναμις* опосредует, лежит «посередине» между двумя этими средними, как в зеркале отражает их и позволяет выйти к осуществленности эйдетическому, вечному. Это и есть та «сила», выводящая из «сокрытости» сущность, «чтойность» вещи – *οὐσία*. Никакая иная схема не позволяет схватить *ἀρχὴ κινήσεως*, начало движения или «распорядительный исход подвижности» (М. Хайдеггер) [17. С. 38]. Все последующие трактовки и переводы, по Хайдеггеру, являются лишь «погребением» того, что было сказано изначально. «Метафизика нового времени покоится на сочетании формы и вещества, выработанном в средние века, а само это сочетание только словами напоминает о погребенной под развалинами прошлого сущности *εἶδος* ‘а и *οὐλε*. Так и стало привычным, разумеющимся само собою толковать вещь как вещество и форму, будь то в духе

средневековья, будь то в духе кантианского трансцендентализма» [23. С. 63].

В дуальной схеме принципиально не схватывается движение, причем понимаемое в самом широком философском смысле. Но именно со Средневековья *δυναμις*, или *potentia* стали мыслиться отнюдь не так, как у Стагирита. Схватывается и трактуется, что это «начало движения, которое коренится в ином». Движение банально начинается пониматься как просто перемещение в пространстве, причем обязательно с участием «иного», того, что приводит тело в движение. Но это абсолютно частный аспект движения, движения, как *κίνησεως*, перемещения в пространстве. Почему-то мгновенно забывается и игнорируется, как и для чего Аристотель вводит это понятие. «Начало движения и или изменения, которое коренится в ином и само есть иное». Это определение «бытия в возможности» нельзя разрывать. Если только учитывать, что это «начало движения, которое коренится в ином», то мы придем только к физике Средневековья. Но что при этом означает, что оно в тот же самый момент «есть иное»? При игнорировании, что *δυναμις* есть «особое природное начало», мы сваливаемся, уходим в дуальную схему. Природное при таком подходе приобретает застывший, «статуарный», характер. Мы не зря приводили слова Жильсона, что «понять потенцию в отрыве от акта еще менее возможно, чем понять акт в отрыве от потенции». Да, они связаны, связаны и у Аристотеля, тем не менее, он их однозначно разводит. Выше мы остановились на метафизике неотомизма и ее попытках в XX в. интерпретировать явления квантовой теории. При всем моем уважении к этой Традиции она оказалась принципиально неспособной в рамках своей схемы интерпретировать явления современной физики, так как в ее основе лежит гилеморфизм – принципиально дуальная схема. Схватить в ней движение невозможно, так же как и у элеатов и у Платона, поэтому становится понятным то, что констатировал Д.В. Кирьянов при рассмотрении томизма в XX в. Неотомизм фактически капитулировал при рассмотрении явлений квантовой теории. Это подтверждает и Николаус Лобковиц в книге «Вечная философия и современные размышления о ней» [24. С. 128], где он прямо указывает на то, что основной причиной исчезновения неотомизма как влиятельного течения на Западе в XX в. явилось его столкновение с современным ему естествознанием.

Вообще Гейзенберг, когда утверждал, что КМ возвращает нас к метафизике Аристотеля, даже и не подозревал, насколько он был прав. Я просто не вижу иной «философской оптики», в рамках которой могли быть «схвачены» и проинтерпретированы все квантовые явления. Ключевым для нас является, еще раз повторим, понятие «бытие в возможности» (*δυναμις*).

1. КМ механика описывает существование микрообъектов при помощи волновой функции, которая задает вероятность (возможность) нахождения ее в некотором состоянии. Это некоторое *возможное* состояние. Мы утверждаем и настаиваем, что бытие квантовых объектов отнесено к этому моду-су бытия.

2. Этот модус бытия *не связан с пространством*. Как теоретический уровень описания квантовой реальности, так и эмпирический указывают на то, что атомные объекты «не существуют» определенным образом до «наблюдения», что мы и пытались показать в первой части работы. Это «несуществование» означает простой факт, что «до наблюдения» их бытие связано с иным, до-пространственным «слоем» реальности, что уже очень хорошо понимал А. Эйнштейн и чего он не мог никак признать. Именно с этим связаны и его знаменитый вопрос: «Существует ли Луна, покуда на нее не смотрит мышшь?», и выводы из ЭПР-парадокса о «несуществовании» параметров, связанных с некоммутирующими операторами. Уже и Аристотель в споре с Платоном, как мы помним, не связывал «возможность» с пространством.

3. Измерение, или то, что называют наблюдением, переводит потенциальное в актуальное. Квантовый объект не существует определенным образом до измерения. С точки зрения традиционной философии это «не существование», и есть потенциальное, меональное, то самое «недобытие», «*Noch-nicht-Sein*», которое «ждет» своего воплощения, явления. Это и иллюстрирует тезис Уилера утверждавшего, что «никакой квантовый феномен не является таковым, пока он не является наблюдаемым (регистрируемым) фотоном».

Введение «бытия в возможности» позволяет интерпретировать все «странности» квантовомеханических явлений. Например, эта категория обладает одной интересной особенностью: «Всякая способность есть в одно и то же время способность к отрицающим друг друга состояниям... Поэтому то, что способно к бытию, может и быть и не быть, а, следовательно, *одно и то же* способно и быть и не быть» (Метафизика, IX, 8). Эту же мысль Аристотель конкретизирует в другом месте: «В возможности одно и то же может быть вместе противоположными вещами, но в реальном осуществлении – нет» [25].

Эти положения мы уже приводили и ранее, иллюстрируя особенности КМ на примерах и принципах, сформулированных Ричардом Фейнманом (см. [26]). Есть смысл еще раз к ним вернуться, так как один момент, и очень важный, остался в той работе не до конца проясненным. Напомним, что Фейнман любил утверждать и настаивал на том, что существует тайна КМ и ее никто не сможет разгадать.

Квантовую механику действительно нельзя понять, если следовать определенной философской оптике. Фейнман утверждал, что существует только один мир, и этот мир квантовый. Это положение и является главным препятствием на пути постижения «тайны» квантового мира. Если «мир один», то тайна квантовой механики навсегда останется тайной. В этом смысле только позиция Гейзенберга, а впоследствии и Фока, дает возможность понять, с чем мы имеем дело при интерпретации атомных явлений. КМ однозначно отсылает нас к двухмодусной картине бытия. Ее математический аппарат действительно является «количественным выражением» для концеп-

ции «бытия в возможности» Аристотеля (Гейзенберг). В такой «оптике» то, что не понятно Фейнману, становится совершенно прозрачно через призму текстов, написанных два с половиной тысячелетия назад. С этой точки зрения и интересны принципы КМ, сформулированные Фейнманом.

Им вводится понятие *события*, и для него формулируются два правила: «1) Если событие может произойти несколькими взаимноисключающими способами, то амплитуда вероятности события – это сумма амплитуд вероятностей каждого отдельного способа. Возникает интерференция. $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, $P = |\varphi_1 + \varphi_2|^2$.

2) Если ставится опыт, позволяющий узнать, какой из этих взаимно исключающих способов на самом деле осуществляется, то вероятность события – это сумма вероятностей каждого отдельного способа. Интерференция отсутствует. $P = P_1 + P_2$ » [14. С. 217].

Первое правило связано с ключевым положением КМ, принципом суперпозиции. Квантовый объект, если не происходит регистрации, находится в двух взаимноисключающих состояниях, его состояние отнесено к модусу «возможного», до-пространственного. Если «ставится опыт», то мы наблюдаем, что к осуществлению выходит, актуализируется только одна из этих альтернатив. Происходит переход от потенциального к актуальному, «наблюдаемому». Это и есть квантовомеханическая иллюстрация положений для бытия возможного и бытия действительного.

1. «Всякая способность есть в одно и то же время способность к отрицающим друг друга состояниям» (*Аристотель*). – «Если событие может произойти несколькими взаимно исключающими способами, то амплитуда вероятности события – это сумма амплитуд вероятностей каждого отдельного способа. Возникает интерференция» (*Фейнман*).

2. «В возможности одно и то же может быть вместе противоположными вещами, но в реальном осуществлении – нет» (*Аристотель*). – «Если ставится опыт, позволяющий узнать, какой из этих взаимно исключающих способов на самом деле осуществляется, то вероятность события – это сумма вероятностей каждого отдельного способа. Интерференция отсутствует» (*Фейнман*).

Первый случай связан с существованием объектов на модусе бытия возможного, мы наблюдаем «квантовую шизофрению», альтернативы существуют одновременно. Второй, когда поставлен опыт, то есть событие совершилось, альтернативы исчезли, и мы наблюдаем только одну из них.

Вот в этом последнем утверждении и есть некоторая неточность, а точнее, недоговоренность, которая должна быть устранена. И так, в первом случае мы имеем «квантовую шизофрению», во втором случае эти альтернативы отсутствуют. Но и в том и в другом случае событие *свершается!* Свершается двумя взаимно исключающими способами. И в том и в другом случае есть завершение процесса, его актуализация, но *тем или иным способом*. Вспомним еще раз аристотелевское определение «бытия в возможности», которое есть «начало движения, которое коренится в ином и само есть

иное». Итак, нечто «коренится», «находится» в ином и само есть иное. Трактовки Аристотеля, связывая это место у него с обычным пространственным движением, указывают на то, что для движения необходимо наличие иного, двигателя, того, что приводит тело в движение. Это верно, но схватывает лишь часть тех смыслов, что вложены Аристотелем в это понятие *αρχή κινήσεως*. Движение понимается в данном месте в самом широком философском смысле. Саму сущность природы, φύσις, составляет *движение*, причем это не только *процессуальность*, а нечто большее. Природное – это феноменальное, понимаемое в первичном смысле. Слово *феномен* происходит от др.-греч. глагола *φαίνο*, означающего *являться, показываться, обнаруживаться, делаться видимым, оказываться на самом деле*. Хайдеггер в своей трактовке античной философии, в том числе и Аристотеля, указывает именно на этот аспект *природного*, а именно того, что *вышло к осуществлению*, что Хайдеггером характеризуется как *прибытие*. Это самое осуществление может происходить по-разному, так как в основе *природного* лежит, если говорить современным языком, относительная материя. Материя, меон, есть некоторый вид небытия. Она выступает как нечто относительное, так как это не просто небытие вообще, в самом широком смысле, а небытие чего-то, той вещи, которая возникает (благодаря материи) при содействии определенных причин – формальной, целевой и действующей. Нечто индивидуальное выходит к осуществлению, получает конкретное существование благодаря материи. Это известный *принцип индивидуации*, введенный впервые Аристотелем и игравший впоследствии одну из существенных ролей в томистской философии. Принцип индивидуации решает сложную философскую проблему – соотношения «единого-многого», как и каким образом единая сущность воплощается во множестве конкретных, индивидуальных вещах.

История философии дает несколько возможных ответов на этот вопрос, но все они, так или иначе, связаны с аристотелевским принципом индивидуации. Согласно Аристотелю форма (*εἶδος*, сущность вещи) не может сама по себе служить индивидуализирующим началом конкретной единичной вещи. Аристотель указывает на то, что *индивидуальное*, вещи одной формы обязаны материи. Благодаря материи вещи во-ипостазируются, если использовать более поздний язык, различным, конкретным образом. Но именно с этим мы и сталкиваемся в квантовой механике! Единая сущность, скажем электрон, благодаря различному материальному окружению проявляет себя по-разному, либо корпускулярным, либо волновым характером. Это и есть та самая «относительность к средствам наблюдения», о которой говорил В.А. Фок, та самая зависимость выхода квантового явления от способа постановки «экспериментального вопроса», демонстрируемого Уилером в знаменитой «игре в 20 вопросов». И дело вовсе не в пресловутом «наблюдателе», а в том, что вещи, или, если говорить о квантовой физике, локальные свойства и закономерности частиц обусловлены «закономерностями и распределением всей материи мира, то есть глобальными свойствами мира»

[27. С. 359]. Это составляет суть так называемого «принципа Маха» в реляционно-статистическом подходе к трактовке квантовых явлений. То, как и каким образом реализуется вещь, зависит от распределения материи. «Принцип Маха» это глобальный, всеобщий принцип. В квантовой механике он находит отражение в двух положениях, сформулированных Фейнманом, о которых и говорилось выше. Существует два и только два способа реализации квантовой сущности, и связано это с определенной двойственностью материи, что находит свое отражение в том, что она описывается двумя не-коммутирующими операторами. Выход к осуществленности квантового явления – это два возможных сценария актуализации взаимно исключающих альтернатив. И эти два сценария зависят в соответствии с «принципом Маха» от макроскопической обстановки, которую уже и может осуществить «наблюдатель» тем или иным способом в своей лаборатории. Это же самое явление может происходить, да и происходит в любом уголке Вселенной, причем независимо от того, есть «наблюдатель» или нет.

Подводя итоги, мы настаиваем, что введение двухмодусной картины бытия является единственной интерпретационной схемой, в рамках которой возможно непротиворечивое объяснение квантовых феноменов. Главное наше утверждение состоит в том, что квантовая механика описывает радикальное иное. Как наука, так и философия (новоевропейская!) на эмпирическом материале квантовой теории столкнулась с тем, что никак ранее не описывала. И пока этого не будет осознано, не будет и понимания квантовой механики. Можно сколько угодно долго говорить о наблюдателе, его сознании, о параллельных мирах, влиянии на прошлое или информационном «понимании» квантовых объектов, множестве иных «трактовок» квантовой механики, но «воз» ее истинного понимания останется на том самом месте, где он и застыл для большинства на момент ее создания. А суть ее совершенно прозрачна и проста, только требует радикального иного метафизического мышления, принципиально отличающегося от декартовского. Все известные декларации о смене парадигмы, несмотря на громкие декларации, на самом деле ни на йоту не отходят от декартовской парадигмы, так как базируются на мышлении, связанном с обыденными представлениями, не выходящими за рамки повседневного опыта. Однако для новой науки они равным счетом не дали и *не дают ничего!* А из одного только простого факта признания того, что по ту сторону пространства-времени есть что-то, а именно «предгеометрия», как говорил Уиллер, и она описывается математическими структурами, сразу же следуют богатые физические выводы и следствия, о чем мы уже многократно писали.

Развертывание этого понятия – «бытие в возможности», его экспликация, применительно как к физике, так и метафизике, требует качественного переосмысления таких ключевых понятий современной науки, как время, пространство и причинность. Однако этот вопрос требует отдельного исследования, которое будет проделано в дальнейших работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аккарди Луиджи*. Диалоги о квантовой механике. Гейзенберг, Фейнман, Академус, Кандидо и хамелеон на ветке / пер. с итал. яз. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований; НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004.
2. *Бройль Луи де*. Избранные научные труды. – Т. 1: Становление квантовой физики: работы 1921-1934 годов. – М.: Логос, 2010.
3. Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziengen. – Z. für Phys. – 1925, 33, 879–893.
4. *Гейзенберг В.* Избранные труды. – Изд. 3-е. – М.: Эдиториал УРСС, 2010.
5. *Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое. – М.: Наука, 1989.
6. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete // Physical Review, 47 (1935).
7. *Доронин С.И.* Нелокальность в окружающем мире. Экспериментальная проверка. URL: <http://www.patent.net.ua/intellectus/temporality/25/ua.html>
8. *Белинский А.В.* Квантовые измерения. – М.: БИНОМ, 2010.
9. *Denkmayr T. et al.* Observation of a quantum Cheshire Cat in a matter-wave interferometer experiment // Nature Communications 5, 4492 (2014).
10. *Левин А.* В квантовом мире нет места реализму? URL: <http://elementy.ru/news/430505>
11. *David N. Mermin.* Could Feynman Have Said This? // Physics Today. – 2004. – P. 5.
12. *Декарт Р.* Сочинения: в 2 т. – Т. 1. – М.: Мысль, 1989.
13. *Хайдеггер Мартин.* Бытие и время. – М.: Ad Marginem, 1997.
14. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. – Т. 8, 9. – М.: Мир, 1978.
15. *Гейзенберг В.* Шаги за горизонт. – М.: Прогресс, 1987.
16. *Кирьянов Д.В.* Томистская философия XX века. – СПб.: Алетейя, 2009.
17. *Хайдеггер М.* О существе и понятии $\phi\upsilon\sigma\iota\varsigma$. Аристотель «Физика» β -1. – М.: Медиум, 1995.
18. *Хайдеггер М.* Цолликоновские семинары. – Вильнюс: УГУ, 2012.
19. *Жильсон Э.* Избранное: Христианская философия. – М.: Российская политическая энциклопедия (РОССПЭН), 2004.
20. Аристотель. Метафизика, А, 9, 991 а 8-11.
21. *Гайденко П.П.* Эволюция понятия науки. – М.: Наука, 1980.
22. Аристотель. Физика, А, 6, 189 в 20-22.
23. *Хайдеггер М.* Работы и размышления разных лет. – М.: Гнозис, 1993.
24. *Лобковиц Н.* Вечная философия и современные размышления о ней. – М.: Signum Veritas, 2007.
25. Метафизика, IV 5, 1009, а 34-36.
26. *Севальников А.Ю.* Онтология квантовой механики, или От физики к философии // Метафизика. – М.: РУДН, 2014. – № 2 (12).
27. *Владимиров Ю.С.* Метафизика. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2002.

THE CONCEPT OF EXISTENCE IN MODERN QUANTUM MECHANICS

A.Yu. Sevalnikov

The work deals with the problem of the existence of quantum objects. Both theoretical level (EPR paradox, Bell's inequalities analysis) and experiments have shown that quantum objects don't exist before observation in a certain way. In this paper it is attempted to interpret this phenomenon in line with Aristotle's metaphysics (Heisenberg), the understanding of which is very close to Heidegger's philosophical ideas.

Key words: quantum mechanics, the existence, ontology, potential being, actual being, the potential, the actual, the Cartesian paradigm.

ГЕНЕРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ ИЗ АБСТРАКТНЫХ СТРУКТУР КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

С.А. Векшенов

Российская академия образования

В предыдущих работах автора была обоснована возможность построения порядковых образов комплексных чисел, без использования традиционной схемы алгебраического расширения поля действительных чисел. Это открывает принципиальную возможность для извлечения порядковых образов действительных чисел из порядковых образов комплексных чисел без возникновения порочного круга. В свою очередь, это позволяет принципиально решить задачу генерации пространства – времени (континуума) из физических процессов, описание которых дается квантовой механикой. В данной статье предлагается конкретная схема такой генерации. Математической базой этой схемы являются «сюрреальные числа» Д. Конвея и введенное автором понятие фундаментального вращения.

Ключевые слова: комплексные числа, поле действительных чисел, сюрреальные числа Конвея, генерация пространства-времени, континуум, квантовая механика, спин.

Введение

Открытие феномена дискретности аргументов непрерывных процессов было сродни короткому замыканию, которое требовало срочного устранения. Найденное вскоре решение было основано на хорошо известном феномене дискретизации параметров волны, помещенной в ограниченное пространство. Это решение сделало волну главным действующим лицом новой теории. Вместе с ней в эту теорию вошли континуальное пространство и принцип суперпозиции, которые задали «начальные условия» её дальнейшего развития. Примечательным оказалось лишь то, что в конечном итоге волна оказалась не «настоящей» материальной волной, а «волной вероятности», то есть неким практически полезным фантомом. Появившаяся позднее формально эквивалентная формулировка Фейнмана только добавила аргументов в пользу существования неких абстракций, ответственных за появление феномена дискретизации.

Безусловно, волновая конструкция отражала (или конструировала?) реальность, что подтверждалось известными экспериментами. Однако, наличие множества интерпретаций косвенно указывает на существенную неполноту первоначального «пожарного» решения.

В этой ситуации имеет смысл заново, в неспешном порядке, осмыслить соотношение дискретного и непрерывного, не связывая себя, по возможности, никакой объемлющей математической концепцией.

Как нам представляется, степень понимания этого соотношения будет измеряться не только адекватным описанием реальности, но и возможностью построения некой имитационной модели квантовой теории, в которой ее основные положения будут следовать из неких глубинных абстракций (об этом в свое время говорил еще В. Гейзенберг).

Попытки найти такие абстракции предпринимались неоднократно: Ю.С. Владимировым, А.П. Ефремовым, Р. Пенроузом, Б. Коуке и др. Последний из авторов дал своей модели весьма примечательное название: «*Kindergarten Quantum Mechanics*».

В данной статье, отталкиваясь от традиционной модели континуума, мы попытаемся еще раз проанализировать феномен дискретизации и выделить абстрактные структуры, которые можно положить в основу еще одной «детской» игры в квантовую теорию.

Сформулируем основной тезис как прелюдию к этой игре.

Как известно, общая теория относительности трактует гравитацию как искривление пространства-времени, то есть искривление некоторого непрерывного многообразия, континуума. Попытаемся показать, что абстрактные структуры, связанные с квантовой теорией, позволяют сгенерировать такое многообразие. Это дает основание утверждать, что именно квантовая теория «ответственна» за появление названного многообразия, которое в определенном смысле можно отождествить с пространством-временем.

1

Высказанное выше предположение основано на следующем наблюдении.

Совокупность действительных чисел, где каждое число отождествляется с точкой на прямой, представляет собой простейшую (и самую важную) модель континуума.

В свою очередь, действительное число может быть определено через класс фундаментальных последовательностей. При этом каждая последовательность из этого класса трактуется как потенциальная возможность неограниченного приближения к точке, а не как реальный, протекающий во времени процесс. Заметим, что именно некий статический элемент, «точка», мыслится первичным элементом континуума.

Реализация идеи точечного континуума (что является бессмертной заслугой Г.Кантора) принесла математике неисчислимы блага и одновременно породила фундаментальные проблемы. Отождествление точки и последовательности является постулатом, характерным именно для теоретико-множественного подхода, хотя более корректно мыслить континуум совокупностью парой двух независимых компонентов: (последовательность, точка). Отметим, что характеристические свойства континуума, например аксиома вложенных отрезков, определяются в терминах точек и их совокупностей.

Если же посмотреть на континуум «со стороны» последовательностей, понимаемых как реальные процессы, то необходимым условием его существования являются следующие условия:

– должны рассматриваться *все* мыслимые фундаментальные последовательности чисел;

– все эти последовательности осуществляются *одновременно*.

В этом случае будут *одновременно* предъявлены все мыслимые точки прямой. Если, напротив, какая-либо последовательность «опоздает», то образуется «прокол» и непрерывность нарушится.

Сформулированные условия позволяют увидеть в конструкции континуума мотивы квантовой теории, а именно суперпозицию процессов, что делает предположение о его квантовом характере, по крайней мере, правдоподобным.

2

Попытаемся развить высказанную выше идею и выделить абстрактные структуры, которые можно отождествить со структурами квантовой механики.

Для этого, в первую очередь, необходимо перейти к модели действительных чисел, в которой присутствовала бы только порядковая составляющая действительного числа. Такой моделью является модель Д. Конвея, где каждое действительное число (и даже нестандартное действительное число) представляется последовательностью стрелок: « \rightarrow », « \leftarrow », означающих направление шагов последовательности (для удобства эти стрелки изображаются вертикально: « \uparrow » « \downarrow »). Каждое действительное число – это конечный или неограниченный набор таких стрелок. Например, $\uparrow\downarrow$ можно считать порядковой составляющей числа $\frac{1}{2}$.

Числа Конвея (или, как их иногда называют, «сюрреальные числа») относятся пока к миру математической экзотики. Однако, как нам представляется, они имеют хорошие перспективы войти в арсенал математического естествознания в силу следующих причин.

а) Сюрреальные числа представляют собой чистый порядковый образ действительного числа.

б) Сложение двух или нескольких сюрреальных чисел – последовательностей осуществляется в соответствии с правилом, в котором можно увидеть абстрактную форму принципа Гюйгенса: суммой этих чисел будет минимальная последовательность, продолжающая все эти числа-последовательности, то есть своеобразная «огигающая».

в) Простейшая запись в сочетании с богатством семантики позволяет строить вычислительные модели, ориентированные на компьютерную реализацию.

В силу названных причин сюрреальные числа представляют особый интерес в решении сформулированной выше задачи.

Как известно, в теории действительных чисел фундаментальную роль играет диагональный метод, суть которого состоит в указании нового действительного числа после гипотетического пересчета всех действительных чисел. В оригинальной трактовке Г. Кантора это означает несчетность множества действительных чисел. Если отойти от этой (хотя и общепринятой, но весьма спорной) трактовки, то суть диагонального метода можно прояснить через взаимодействие двух неограниченных последовательностей: «локальной» – генерирующей свои члены в соответствии с определенной закономерностью – и «глобальной», которая в определенный момент времени случайным образом добавляет свой член в локальную последовательность и нарушает имеющуюся закономерность. В следующий момент времени к полученной таким образом последовательности снова случайным образом добавляется член глобальной последовательности и т.д. Получающиеся таким образом последовательности естественно назвать диагональными последовательностями. Континуум действительных чисел (далее «континуум») получается тогда, когда осуществляется реализация в *едином времени* локального и *всех* возможных диагональных последовательностей. На теоретико-множественном языке это означает вполне упорядоченность континуума (которое, как известно, равносильно аксиоме выбора).

Очевидно, что в модели Конвея роль локальной последовательности играет последовательность \uparrow_n , а глобальной – последовательность \downarrow_n . В этом случае диагональные последовательности (которые, строго говоря, образуются путем обращения стрелок в локальной последовательности) и, следовательно, сам континуум можно считать результатом своеобразной абстрактной «интерференции» последовательностей \uparrow_n и \downarrow_n .

Совершим далее следующее действие: из двух названных выше базовых последовательностей \uparrow_n и \downarrow_n образуем одну последовательность – $(\uparrow\downarrow)_n$. Добавление противоположного направления движения означает, что каждые члены этой последовательности различимы не только по порядковому, но и по количественному признаку (для подсчета числа элементов необходимо не только «идти вперед», но и «возвращаться»). В этом случае такая последовательность изоморфна последовательности натуральных чисел ([2], теорема 3).

С другой стороны, из последовательности:

$$(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)(\uparrow\downarrow)\dots \quad (*)$$

можно извлечь все диагональные последовательности в приведенном выше смысле, например, последовательности: $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\dots$, $\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\dots$ и т.д.

Все извлеченные таким образом последовательности реализуются *одновременно*, что, как уже подчеркивалось выше, приводит к структуре континуума. Таким образом, континуум может быть потенциально извлечен из последовательности, изоморфной последовательности натуральных чисел.

Представленная конструкция представляет собой порядковый аналог классической, «количественной» структуры континуума как множества всех

подмножеств натурального ряда. При этом в порядковом варианте возникает очень важная идея одновременной реализации всех таких возможностей, что позволяет «упаковать» континуум в структуру, изоморфную натуральному ряду.

Эта идея содержит намек на квантовую механику, но в рамках действительных чисел и их порядковых аналогов, доставляемых конструкцией Конвея, никаких содержательных выводов сделать в этом направлении невозможно. Необходимо найти подход, позволяющий в рамках принятой «порядковой идеологии» получить порядковые аналоги комплексных чисел и кватернионов.

3

Как известно, комплексные числа получаются путем расширения поля действительных чисел для узаконивания операции извлечения квадратного корня из отрицательно числа.

С другой стороны, комплексные числа можно определить как подкольцо кольца матриц действительных чисел 2×2 вида:

$$\begin{pmatrix} x & y \\ -y & x \end{pmatrix}$$

Иными словами, комплексные числа можно определить через вращения двумерного пространства.

Попробуем понять, как можно прийти к комплексным числам в рамках модели Конвея.

Первое замечание состоит в том, что в модели Конвея последовательности стрелок не в полной мере отражают идею порядка как такового. В каждой такой последовательности присутствует факт пересчета: 1-й, 2-й, 3-й и т.д. шаг от начала отсчета. Однако выбор такого начала является произволом, который должен быть устранен. Традиционный способ такого устранения – предъявление всех возможных таких начал пересчета. Если занумеровать последовательность n первых шагов, то необходимо рассмотреть и все возможные перестановки n чисел.

Существенным моментом данной конструкции является тот факт, что все возможное последовательности шагов необходимо рассматривать *одновременно*, поскольку время едино для всех последовательностей. Это свойство мы будем называть *порядковой инвариантностью*

Следствием порядковой инвариантности является появление *фундаментальных вращений*, то есть объектов, выражающих саму идею вращения безотносительно среды, в которой это вращение осуществляется. Как показано в [3] фундаментальное вращение – это образ порядковой бесконечности, который возникает путем замыкания неограниченной последовательности шагов.

Рассмотрим первые n шагов этой последовательности (натуральное число, понимаемое в смысле порядка) и применим к ней сформулированную выше идею порядковой инвариантности (рис. 1).

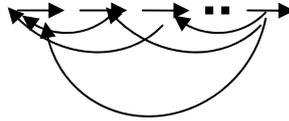


Рис. 1

Очевидно, что в этом случае возникает последовательность из $\lambda(n)$ фундаментальных вращений, где:

$$\begin{aligned} 0, & \text{ при } n = 0, \\ \lambda(n) = 0, & \text{ при } n = 1, \\ \lambda(n+1) = \lambda(n)(n+1) + 1, & n \geq 2. \end{aligned}$$

Порядковая инвариантность включает в себя также перемещение начала отсчета в противоположную сторону и появление последовательности, представленной на рис. 2.

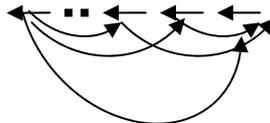


Рис. 2

Это приводит к появлению такого же количества фундаментальных вращений, направленных в *противоположную сторону*.

Итоговая последовательность выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \odot \odot \odot \odot \odot \odot^{\lambda(5)} \\ \leftrightsquigarrow, \leftrightsquigarrow, \leftrightsquigarrow, \leftrightsquigarrow, \dots (**), \\ \ominus \ominus \ominus \ominus \ominus \ominus^{\lambda(5)} \end{aligned}$$

Последующее изложение посвящено осмыслению этой последовательности.

4

Полученная последовательность, несмотря на ее абстрактный характер, чрезвычайно интересна и информативна с точки зрения физической интерпретации. Рассмотрим её наиболее очевидные аспекты.

4.1. Прежде всего, очевидно, что два противоположных вращения \odot и \ominus представляют собой единое вращение в двух различных направлениях ($\odot\ominus$), завершающее в смысле порядковой бесконечности последовательность

$$\leftrightsquigarrow, \leftrightsquigarrow, \leftrightsquigarrow, \dots$$

Для такого вращения справедливо следующее соотношение [4]:

$$\begin{aligned} (\mathcal{C}\mathcal{C}) + \uparrow\downarrow &= (\mathcal{C}\mathcal{C}), \\ (\mathcal{C}\mathcal{C}) + \uparrow &= (\mathcal{C}\mathcal{C}). \end{aligned}$$

Иными словами, $\uparrow\downarrow$ можно рассматривать как период фундаментального вращения $\mathcal{C}\mathcal{C}$, а $\uparrow(\downarrow)$ можно считать полупериодом, меняющим вращение $\mathcal{C}\mathcal{C}$ на противоположное. В этом свойстве уже явно просматриваются черты квантовой теории.

4.2. Порядковая инвариантность, примененная к последовательности порядковых натуральных чисел: $\rightarrow \rightarrow \rightarrow \dots \rightarrow \dots$, приводит к последовательности (**), которая, в свою очередь разворачивается в совокупность одновременно осуществляющихся последовательностей, где к каждому шагу «прикреплено» соответствующее количество фундаментальных вращений. Направление этих вращений детерминируется направлением шага, например:

$$\begin{aligned} &\mathcal{C}^{(4)} \mathcal{C}^{(21)} \\ &\rightarrow \leftarrow \rightarrow \rightarrow \dots \\ &\mathcal{C} \end{aligned}$$

Отделив линейные шаги и фундаментальные вращения, эту последовательность можно записать как $(\rightarrow \leftarrow \rightarrow \rightarrow \dots) (\mathcal{C} \mathcal{C}^{(4)} \mathcal{C}^{(21)} \dots)$. Эти две последовательности можно рассматривать как порядковый образ комплексного числа $re^{i\varphi}$.

Таким образом, совокупность порядково-инвариантных натуральных чисел вложена в совокупность порядковых образов комплексных чисел: $\mathcal{N}^i \subset \mathcal{C}^i$. Более того, каждое натуральное число порождает вполне определенное количество парных фундаментальных вращений, которые можно рассматривать как порядковый образ спинора.

Из вышесказанного следует, что в «порядковом мире» соотношение натуральных, действительных и комплексных чисел прямо противоположно их традиционному (количественному) соотношению.

Наиболее фундаментальными оказываются комплексные числа.

Действительные числа определяются компонентами комплексных чисел, состоящими из линейных шагов.

Возникает вопрос, каким образом выделить среди последовательностей, определяющих действительные числа, ту последовательность, которую можно соотнести с последовательностью натуральных чисел.

Примечательный подход к решению этой проблемы заключается в следующем.

Определим для каждого комплексного числа из нашего порядкового мира понятие сигнатуры: разницы между количествами фундаментальных вращений « \mathcal{C} » и « \mathcal{C} ». Для последовательности натуральных чисел

$$\rightleftharpoons, \rightleftharpoons, \rightleftharpoons, \dots$$

сигнатура равна нулю, в то время как для любой последовательности, извлеченной из последовательности (**), сигнатура всегда будет по модулю больше нуля. Это значит, что основанием выделения натурального ряда из совокупности действительных чисел (последовательностей от 0 до ω) является некий принцип минимума параметра, связанного с этими последовательностями – числами. По форме этот принцип чрезвычайно напоминает фейнмановские «интегралы по траекториям», что еще раз подчеркивает наличие абстрактных структур, «ответственных» за появление квантовой механики и, соответственно, формализма, связанного с «принципом максимума».

В этом контексте действительное число понимается как некое «отклонение» от «идеального» натурального ряда, что, строго говоря, вполне соответствует интуиции.

4.3. Для углубления наших представлений о структуре (**) целесообразно рассмотреть *количественный* образ парного фундаментального вращения ($\odot\odot$). Этот образ должен отражать:

- сам факт вращения;
- его структуру;
- абстрактный характер этого вращения.

Фундаментальное вращение не имеет никаких характеристик, которые имеет видимое вращение. В этом плане его простейшим количественным образом, который только фиксирует ($\odot\odot$), является некоторая константа – действительное число k . С другой стороны, это число, должно нести определенную информацию о самом факте вращения. Это можно сделать, придав числу некоторую размерность, которая должна отражать факт кругового движения, без указания его конкретных характеристик. В этом случае естественно предположить, что размерность k равна размерности отношения «действия», как характеристики факта движения к «фазе», как свидетельства вращательного характера этого движения. Иными словами, константа k имеет размерность постоянной Планка \hbar . Что касается структуры вращения ($\odot\odot$), то в арифметике Конвея этой структуре соответствует число $\frac{1}{2}$, которое и можно считать ее количественным образом. Таким образом, количественный образ фундаментального вращения ($\odot\odot$) можно соотнести с числом $\hbar/2$.

4.4. Попытаемся осмыслить полученные результаты.

4.4.1. Последовательность (**) можно понимать как процесс становления континуума, к которому «жестко» прикреплены парные фундаментальные вращения. Шаг n такого становления порождает $\lambda(n)$ пар фундаментальных вращений. При этом n пар таких вращений заведомо являются независимыми в том смысле, что они попарно не порождают друг друга. В этом случае к континууму прикреплено заведомо бесконечное число фундаментальных вращений. Если соотнести каждое такое вращение со степенью свободы, то предел последовательности (**) является континуумом с бесконечным числом степеней свободы. Такую финальную структуру можно

отождествить с *полем*. Примечательным является, что квантовая механика возникает «по ходу» такого становления практически «из ничего».

4.4.2. Последовательность (***) дает инструмент реализации фундаментальной идеи Ю.С. Владимирова о реляционном характере пространства и времени.

Определив последовательность фундаментальных вращений, мы тем самым определяем последовательность линейных шагов, которая отождествляется с действительным числом. Сами же неограниченные последовательности фундаментальных вращений можно получить из некоторой начальной конфигурации путем приписывания к ней по определенным правилам новых фундаментальных вращений. Например, из начальной конфигурации $\odot\odot$ можно последовательно получить следующие цепочки фундаментальных вращений:

$$\odot\odot \rightarrow \odot\odot\odot \rightarrow \odot\odot\odot\odot \rightarrow \odot\odot\odot\odot\odot \rightarrow \dots$$

Легко угадать и правило получения этих цепочек: в конфигурации $\odot\odot$ отбросить правое вращение и заменить его исходной конфигурацией. В общем случае таких правил может быть очень много, что дает целое дерево цепочек фундаментальных вращений и, в свою очередь, набор действительных чисел.

В математическом плане эта конструкция описывается алгоритмом Маркова (по имени выдающегося логика А.А. Маркова), что открывает возможность для машинной генерации таких, потенциально неограниченных цепочек фундаментальных вращений.

С точки зрения семантики фундаментальные вращения (которые с точки зрения алгоритма Маркова не более чем буквы некоторого алфавита) можно трактовать как абстрактные модели спина (причем как целого, так и полуцелого). Это дает возможность конструировать правила в алгоритме Маркова как *фундаментальные процессы*. Осуществив работу по созданию таких правил, мы получаем возможность компьютерного моделирования процесса возникновения пространства и времени как результата осуществления физических процессов.

4.4.3. Анализируя последовательность (***), которая генерирует континуум, можно сделать несколько общих выводов о его геометрических свойствах и скорости порождения.

а) Наличие различных фундаментальных вращений позволяет оценить размерность генерируемого континуума и его возможную топологию. Например, на втором шаге процесса реализуется только одно парное фундаментальное вращение, то есть минимальная размерность континуума не меньше 2. На третьем шаге одновременно реализуются четыре парных фундаментальных вращения. Это возможно осуществить на четырехмерном торе T^3 и т.д. Иными словами, с ростом числа шагов размерность генерируемого континуума повышается, причем эти размерности проявляются в компактифицированном виде.

б) Если соотнести фундаментальные вращения с «материей», то ее количество по мере увеличения числа шагов n возрастает как $\lambda(n)$, то есть экспоненциально (инфляция). С другой стороны, если фундаментальные вращения числом k находятся в пределах $\lambda(n-1) < k < \lambda(n)$, они никак не проявляются в пространстве-времени, но связаны с другими фундаментальными вращениями (темная материя?).

Разумеется, все эти тонкие моменты должны быть осмыслены и адекватно интерпретированы.

Заключение

Если отвлечься от технических деталей, то основная мысль данной статьи такова: переход от концепции субстанционального континуума (пространства-времени) к идее его последовательного приближения приводит к отказу от отождествления геометрического понятия точки и связанной с ней числовой последовательности. Это влечет переход от его теоретико-множественного описания континуума к порядковому. Логически неизбежное на этом пути требование порядковой инвариантности приводит к появлению нетеоретико-множественных структур, которые на абстрактном уровне отражают существенные черты структуры квантовой теории.

Дополнив эти абстрактные структуры физически мотивированными правилами, мы получаем конкретный, реализуемый на компьютере механизм генерации континуума, что вполне можно интерпретировать как генерацию пространства-времени из физических процессов. Мы рассматриваем это как возможный путь реализации фундаментальной идеи Ю.С. Владимирова о реляционной природе пространства-времени, его возникновения в результате физических взаимодействий.

Процесс генерации пространства-времени из абстрактных структур квантовой механики строится с использованием простейшего алфавита: $\uparrow, \downarrow, \odot, \ominus$ и внешне напоминает детскую игру (в особенности в сравнении с традиционным, «серьёзным» аппаратом квантовой теории). Однако аргумент «детскости» может оказаться весьма значимым. Если отталкиваться от знаменитого понятия Й. Хейзинга «*homo ludens*» (человек играющий), можно предположить, что именно в игре открывается неожиданная суть вещей. Данная игра в квантовое порождение континуума не исключение. Это относится, прежде всего, к самой структуре (**). Еще известный филолог В.Н. Топоров, анализируя различные мифы возникновения мира, выделил их общую структуру, включающую последовательность шагов, на каждом из которых возникают всё усложняющиеся противоположные пары сущностей. Структура последовательности (**), генерирующей пространство-время, именно такова. Иными словами, в последовательности (**) реализуется некий общий миростроительный архетип, что само по себе является примечательным фактом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Владимиров Ю.С.* Метафизика. – М.: БИНОМ, 2009.
2. *Векшенов С.А., Бешенков А.С.* Порядковые образы комплексных чисел и кватернионов в основаниях физики // Метафизика. – 2013. – № 9. – С. 70–85.
3. *Векшенов С.А.* Метафизика и математика двойственности // Метафизика век XXI. – М.: БИНОМ, 2011. – С. 91–114.
4. *Векшенов С.А.* Метафизика инвариантности // Метафизика. – 2011. – № 2. – С. 50–58; 2012. – № 3. – С. 115–120.
5. *Топоров В.Н.* О мифопоэтическом пространстве: избр. ст. – Pisa: ECIG, 1994.
6. *Соеске. В.* Kindergarten quantum mechanics. arXiv: quant – ph/0510032v1, 4 okt.2005.

GENERATION OF SPACE-TIME FROM ABSTRACT STRUCTURES OF QUANTUM MECHANICS

S.A. Vekshenov

The author's previous works substantiated the possibility of constructing ordinal images of complex figures without using the traditional pattern of algebraic expansion of the field of real numbers. This opens up the possibility in principle to extract ordinal images of real numbers from ordinal images of complex figures without the appearance of a vicious circle. This, in turn, makes it possible to solve in principle the problem of generation of space-time (continuum) from physical processes a description of which is provided by quantum mechanics. This article proposes a specific scheme of such generation. The mathematical basis for the scheme is formed by John H. Conway's surreal numbers and the concept of fundamental spin introduced by the author.

Key words: complex numbers, field of real numbers, Conway's surreal numbers, generation of space-time, continuum, quantum mechanics, spin.

О ПРОСТРАНСТВЕ В КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

В.Д. Эрекаев

Философский факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Обсуждается проблема пространства в квантовой механике. Показано, что существуют определенные аргументы, свидетельствующие о возможности включить квантовую механику в рамки известной эволюции принципа относительности и связанных с ним фундаментальных физических теорий. Также показано, что эта эволюция выражает последовательное усложнение пространств соответствующих теорий. Высказывается предположение о том, что евклидово пространство квантовой механики недостаточно для описания квантово-механических процессов и должно быть заменено на более сложное в соответствии с тенденциями, существующими в рамках указанной эволюции.

Ключевые слова: квантовая механика, принцип относительности, пространство физической теории.

В фундаментальной физике происходит перманентный пересмотр основных понятий. Иногда это происходит явным образом, иногда – неявно. Особый интерес вызывает пересмотр понятий, которые имеют всеобщий характер – то есть категорий. Их в современной физике «работает» достаточно много. Это пространство, время, движение, причинность, случайность и др. Этот пересмотр категорий нередко происходит настолько радикально, что формируются тенденции, ведущие к их полному элиминированию. Так, в квантовой механике (КМ) из динамики исключена причинность, а в современных вариантах квантовой теории гравитации отсутствует время. Вопрос ставится о макроскопичности и пространства, то есть о том, что обычное непрерывное пространство – понятие, имеющее силу только на макроскопическом уровне, а на микроуровне, прежде всего на планковском масштабе, его не существует. Тем самым узаконивается эмерджентная и феноменологическая природа пространства. Концептуальный анализ категорий является актуальной задачей как физического познания, так и философии физики.

В одной из самых успешных и эффективных физических теорий – квантовой механике – вопрос о природе пространства на концептуальном уровне стоит очень остро. В этой теории сосуществуют различные типы пространств: гильбертово, евклидово, конфигурационное, фазовое и др. Основной объект стандартной копенгагенской интерпретации КМ – волновая функция – является объектом (вектором) гильбертова пространства, в то время как квантовые объекты движутся в евклидовом пространстве и времени, или, как вариант, о движении в привычном смысле вообще говорить нельзя: квантовые частицы не имеют траекторий, а только вероятности появления в той или иной точке евклидова пространства. Это заставляет по-

ставить вопрос о сути квантовой механики. Например, вопрос о том, описывает ли стандартная КМ движение реальных частиц в пространстве и времени? Адекватна ли копенгагенская онтология чисто потенциальному существованию квантовых объектов до измерения и бестраекторности движения в обычном евклидовом пространстве? Какова онтология квантованного (в данном случае нерелятивистского) мира? Еще сложнее ситуация в релятивистской КМ – квантовой теории поля.

«Современная квантовая механика строится как бы в готовом классическом пространстве-времени. А некоторые творцы квантовой механики ещё на заре её создания говорили, что для описания квантовомеханических закономерностей необходимо, скорее всего, изменить в микромире классические пространственно-временные отношения. Но как это сделать? Ответ так и не был дан» [5].

Исследования пространства квантовой механики ведутся уже достаточно давно. Прежде всего, исследования связаны с анализом возможного дискретного характера пространства в микромире. Для этого есть естественный повод – квантовый характер квантовомеханических величин, в том числе, например, пространственных траекторий и положений частицы в пространстве. Так, еще в 1930 г. В.А. Амбарцумян и Д.Д. Иваненко предложили рассмотрение пространства и времени как кубической решетки точек с целочисленными значениями координат. Х. Снайдер предложил модель дискретного пространства, в которой квантовая частица не обладает одновременно всеми тремя пространственными координатами, и в каждый момент времени можно измерить только одну из трех координат объекта, а две другие остаются неопределенными. Известны также подходы: описывающие дискретное пространство-время на световом конусе (Я.И. Френкель); рассматривающие пространство квантовой механики, состоящее из конечного числа точек (Х. Койш, И.С. Шапиро)⁴ и др. Однако до сих пор идея дискретного пространства не обрела формы фундаментальной теории. Фундаментальный вопрос состоит в том, на каком уровне становится необходимой идея дискретности пространства? Принципиально ли важно привлекать дискретность пространства на уровне КМ или эту теорию нужно строить в непрерывном пространстве, но усложнить геометрию? В онтологическом плане этот вопрос звучит так: «чувствуют» ли, несомненно, квантовые объекты, такие как атомы, молекулы и т.д., дискретность пространства? Согласно достаточно широко распространенным современным представлениям на планковском масштабе пространство с необходимостью становится дискретным, квантованным. Тогда вопрос переформулируется следующим образом: «чувствуют» ли атомы и молекулы планковский масштаб? Необходимо ли в обычной *нерелятивистской* квантовой механике вводить планковский масштаб?

Современная тотальная методологическая тенденция в физике на эффективное описание и вместе с тем нередко пренебрежение анализом кон-

⁴ Приведенный исторический материал взят из книги [10. С. 226–227]

цептуальных вопросов ведет, в частности, к пренебрежению поиска более глубокого понимания. В нашем случае – к отказу от поиска более глубокого понимания природы пространства на микроуровне. В противовес этому мы хотели бы обратить внимание на следующую важную тенденцию в фундаментальной физике, которая, возможно, придаст новый импульс для исследования оснований КМ.

В истории фундаментальной физики можно выделить последовательность фундаментальных физических теорий, которые (по факту!) связаны с эволюцией принципа относительности (ПО). Эта последовательность представляет собой связку следующих теорий: классическая механика Галилея-Ньютона, фундаментом которой является принцип относительности Галилея и преобразования Галилея; специальная теория относительности, одним из постулатов которой является специальный принцип относительности (СПО) и преобразования Лоренца; общая теория относительности (ОТО) с постулатом в виде общего принципа относительности (наряду с принципом эквивалентности) и с общековариантными преобразованиями. Эту связь можно продемонстрировать в виде следующей блок-схемы (рис. 1):

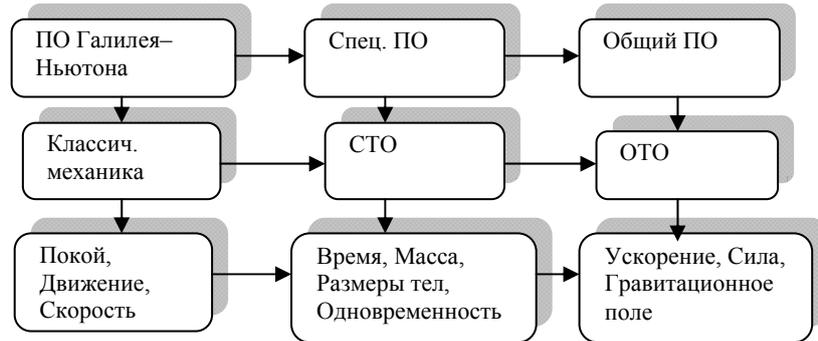


Рис. 1

Эта последовательность фундаментальных теорий интересна сама по себе и требует глубокого осмысления.

Однако возникает вопрос: можно ли эту схему продолжить дальше вправо? Другими словами, можно ли получить дальнейшее обобщение принципа относительности, а именно общего принципа относительности, а на его базе построить новую фундаментальную теорию и релятивизировать новые физические величины? Схематично это можно было бы представить следующим образом (рис. 2):

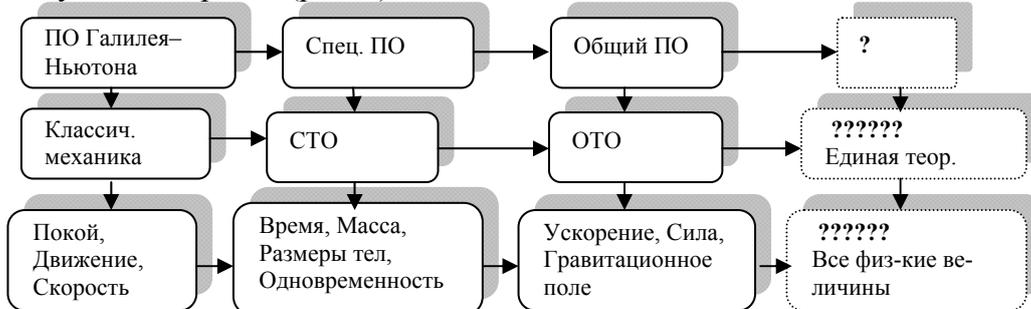


Рис. 2

Квантовая механика и релятивизм. Зададимся вопросом: можно ли в эту схему включить квантовую механику? Например, сразу после ОТО? Для этого, чтобы соответствовать предложенной схеме, необходимо связать с ней какой-то принцип относительности и обнаружить новые относительные (релятивизированные) физические величины. Схематично это могло бы выглядеть так (рис. 3):

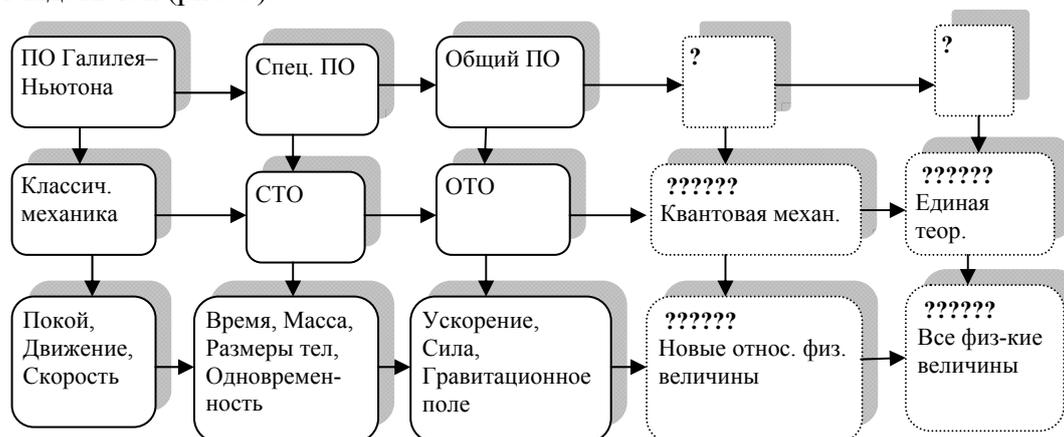


Рис. 3

Существуют ли сегодня для подобного шага какие-то аргументы? Приведем некоторые из них.

1. Как известно, Эйнштейн, признавая успехи квантовой механики, не принимал ее концептуально-физическую трактовку. «Нет сомнения, что в квантовой механике имеется значительный элемент истины и что она станет пробным камнем для любой будущей теоретической основы, из которой она должна будет быть выведена как частный случай... Однако я не думаю, что квантовая механика является *исходной точкой* поисков этой основы. ... Учитывая такое положение, кажется вполне оправданным серьезное рассмотрение вопроса о том, нельзя ли *каким-нибудь* образом привести в соответствие основу физики поля с данными квантовой теории?» [14. С. 57]. Можно ли явным образом в прорисованную выше схему эволюции принципа относительности включить, в частности, квантовую механику (КМ)? Возможно ли и в КМ сформулировать специфический для нее принцип относительности? До сих пор этот вопрос не получил окончательного и однозначного решения. Тем не менее можно отметить несколько существенных моментов в этой связи, которые просматриваются в настоящее время.

Сам Эйнштейн выражал надежду, что «разумная общая релятивистская теория поля, возможно, могла бы дать ключ к более совершенной квантовой теории» [13. С. 626]. При этом Эйнштейн связывал поиск такого ключа с необходимостью найти частицеподобные полевые решения, свободные от сингулярностей. В методологическом плане, если продолжить методику построения фундаментальных физических теорий, основываясь на обобщении принципа относительности, которого фактически придерживался и сам Эйнштейн, то здесь можно рассмотреть следующие возможности: либо соз-

давать КМ на основе уже имеющегося общего принципа относительности, либо попытаться еще раз обобщить этот принцип и расширить его на квантовые процессы. Однако можно предположить еще и такую возможность: поскольку гравитация явным образом в КМ не входит, следует исходить из специального принципа относительности, каким-то образом его расширить с учетом квантово-механических явлений, а затем обобщить до ОПО, то есть фактически до фундаментального принципа теории квантовой гравитации. В этой связи становится актуальным вопрос о соотношении этого подхода с дираковской релятивистской квантовой механикой.

2. В 1928 г. Дираку удалось осуществить синтез КМ и СТО. В результате появилась новая фундаментальная теория – *релятивистская квантовая механика* или *квантовая теория поля*. В этом плане создание этой теории явилось, на наш взгляд, принципиально важным шагом в реализации эйнштейновской программы релятивизации квантовой теории. Однако в этой теории не появилось нового принципа относительности, а содержание уже имеющихся существенно не изменилось. О чем может свидетельствовать этот факт? Например, о том, что в новой синтетической фундаментальной теории, построенной на стыке релятивистской и квантовой, принцип относительности потерял свою эвристическую силу, или о том, что квантовая теория поля физически не полна, поскольку не включает в себя принцип относительности. Стоит напомнить, что, так же как и квантовая механика, квантовая теория поля является достаточно эффективной теорией в определенной области исследований, хотя в отношении ее концептуальных оснований мнения далеко не однозначны и даже скептически [11].

3. В 50-х гг. прошлого века В.А. Фок сформулировал своеобразный принцип относительности к средствам наблюдения [12]. Согласно этому подходу «под классическим описанием можно разуметь описание, безотносительное к средствам наблюдения (если не считать учета их движения)» [12. С. 161]. «...В квантовой физике необходимо учитывать не только механическое движение средств наблюдения, но в какой-то схематизированной форме, и их внутреннее устройство» [11. С. 161].

Проведя сравнение движения и измерения классических и квантовых объектов и процессов, В.А. Фок приходит к выводу о том, что «не только точность в количественном смысле, но и качественная формулировка новых свойств микрообъектов требует новых методов описания и, прежде, всего, необходимо внести в их описание новый элемент относительности – относительность к средствам наблюдения» [12. С. 161].

К сожалению, далее это направление Фоком не было развито. В связи с этим остаются неясными, в частности, следующие вопросы:

– Каким образом связаны три классические формулировки ПО и фоковский принцип приборной относительности?

– Должны ли сохраняться все законы физики (что было характерной чертой трех галилеевско-эйнштейновских формулировок ПО) по отношению к любым возможным средствам наблюдения?

– Каким образом связаны в квантовом случае инерциальное и неинерциальное движение (особенности которых были определяющими для трех предыдущих формулировок ПО) и средства наблюдения?

– Если указанные связи отсутствуют, то какое принципиально новое содержание вносит фоковский ПО в семейство физических принципов относительности?

– Можно ли построить квантовую механику, основываясь на фоковском принципе относительности к средствам наблюдения? Можно ли это сделать хотя бы в принципе?

4. Определенные указания на обоснованность такой постановки вопроса дают, например, имеющиеся в квантовой физике данные о возможной релятивизации квантовых характеристик. В квантовой теории о протекающем процессе релятивизации квантованных величин может свидетельствовать, в частности, несохранение некоторых квантовых чисел. Например, барионного числа в окрестности черной дыры (Уилер). Квантовая хромодинамика дает предсказание о нестабильности элементарной частицы, считавшейся ранее стабильной и абсолютно элементарной. Речь идет о распаде протона через 10^{32} лет.

5. Наконец, следует также упомянуть эвереттовскую интерпретацию квантовой механики, которая основана на понятии относительного состояния [3]. В этом подходе считается, что любое квантовое состояние не является абсолютным и может рассматриваться только по отношению к другим состояниям. Например, в известном парадоксе шредингеровского кота состояние самого кота рассматривается по отношению к состоянию радиоактивного ядра и наблюдателя. Согласно Эверетту практически все состояния относительны, и только, возможно, состояние всей Вселенной – абсолютно.

Приведенные примеры и некоторые тенденции релятивизации квантовой теории показывают, что эта проблема еще далека от своего разрешения. Тем не менее попытки продолжаются, и исследователи ищут новые варианты. Так, например, были предложены новые подходы к квантовой механике, основанные на геометрическом [1] и реляционном [2; 6; 7] подходах. Однако и в рамках этих подходов предстоит еще многое сделать для выяснения природы их фундаментальных физических оснований.

Принцип относительности и фундаментальная механика. Прежде всего, отметим важную закономерность, присущую этой схеме. Фундаментальность и общность указанного эволюционного движения принципа относительности состоит также в том, что эта эволюция происходит в рамках двух различных, но взаимосвязанных классов физических теорий. С одной стороны, последовательное обобщение ПО сопровождается расширением определенного специфического класса фундаментальных теорий – класса теорий относительности, объединенных общей основой, в качестве которой и выступает принцип относительности.

С другой стороны, как отмечалось выше, с развитием последнего идет одновременный параллельный процесс релятивизации прежде абсолютных

физических величин. В то же время имеет место еще один фундаментальный процесс – процесс расширения и углубления содержания одного из древнейших и основополагающих разделов физики – механики. Это означает, что достижение нового содержательного уровня понимания принципа относительности каждый раз сопровождалось появлением *новой фундаментальной механики*⁵. В этот механико-релятивистский класс физических теорий, основанием которых является принцип относительности, и входят рассмотренные выше фундаментальные теории: классическая механика Ньютона, специальная теория относительности, общая теория относительности. По существу, каждая из этих теорий является новой механикой со все более усложняющимися представлениями о механическом перемещении в пространстве⁶.

Классическая механика описывает механические процессы в евклидовом пространстве в равномерно и прямолинейно движущихся (инерциальных) системах отсчета, допуская абсолютность времени (а с этим и возможность дальнего действия). СТО связана с 4-мерным псевдоевклидовым пространством-временем. В механике специальной теории относительности, которая основана на двух основных принципах: специальном принципе относительности и абсолютности величины скорости света – рассматриваются также и электромагнитные процессы в инерциальных системах отсчета, причем скорости движения физических тел не могут превышать скорости света в пустоте. При этом движение в пространстве с околосветовой скоростью⁷ сопровождается нетривиальными трансформациями геометрических и темпоральных характеристик. Наконец, общая теория относительности, построенная на общем принципе относительности⁸ и принципе эквивалентности, является фундаментальной теорией процессов (а фактически и движений) в ускоренно движущихся системах отсчета. Согласно принципу эквивалентности в этой теории ускорение отождествляется с гравитационным полем, а движение происходит по геодезическим линиям.

Отсюда становится ясно, почему перечисленные фундаментальные теории можно рассматривать как качественно различные формы механики. Каждая из них связана с введением и новым пониманием свойств физического движения *как перемещения в пространстве*. При этом движение в про-

⁵ К классу фундаментальных теорий, которые в той или иной степени основаны на механическом движении, но в явном виде до сих пор не связаны с принципом относительности, принадлежат, например, термодинамика, статистические теории и квантовая механика.

⁶ Более точно – механическом перемещении в пространствах все большей сложности (4-мерном псевдоевклидовом, а затем и римановом (с кривизной) пространстве-времени. Современные единые теории рассматривают еще более сложные пространства, например, 11-мерные в теории суперструн.

⁷ На самом деле, все эффекты СТО (замедление времени, сокращение размеров и др.) имеют место при любых скоростях, что следует из преобразований Лоренца. Однако при небольших скоростях они ничтожно малы.

⁸ Здесь весьма любопытен эвристический момент. Эйнштейн вспоминает, что ему с самого начала казалось естественным, что законы природы должны выполняться и в любых неинерциальных системах отсчета.

пространстве характеризуется различными классами характеристик: материальными носителями движения (вещество, электромагнитное и гравитационное поля), характером движения (равномерное, прямолинейное, ускоренное) и т.д.

В ОТО был сделан еще один принципиально новый концептуальный шаг: фундаментальное физическое понятие, а по существу, фундаментальный физический объект – тяготение было фактически сведено к перемещению в пространстве и времени определенного типа. В дальнейшем эта тенденция получила свое продолжение: в программах построения единых геометризованных теорий поля попытки аналогичного сведения к перемещению в пространстве и к свойствам самого пространства были предприняты и в отношении других силовых полей, в частности электромагнитного [4. С. 513–528].

Возникает вопрос: не является ли указанная трактовка, сводящая физику к механике, возрождением механицизма? Как известно, в свое время сторонники механицизма пытались выразить все физические (и не только физические) процессы через механические перемещения в пространстве и времени. Последующее развитие физики отвергло этот подход. Был сделан вывод о существовании новых, качественно отличных от механического, физических процессов и видов движения, несводимых к механическим в смысле классической механики Галилея–Ньютона. К ним относятся электромагнитные, гравитационные, ядерные взаимодействия. Однако, на наш взгляд, этот вывод не является окончательным, ибо и в современной физике природа различных физических взаимодействий постоянно подвергается серьезному пересмотру. В истории физического познания такому рассмотрению особенно часто подвергалось понятие механического движения. Приведем несколько примеров, обосновывающих эту точку зрения.

Уже в эпоху механицизма теплота, представляющая собой качественно новый тип физических процессов, была фактически сведена к чисто механическому движению молекул в рамках кинематической теории. В начале XX в., когда механицизм, казалось бы, окончательно потерпел крах, общая теория относительности представила гравитацию фактически как определенный вид механического движения, перемещения в пространстве-времени: в ОТО гравитационное поле фактически отождествляется с ускоренным (неинерциальным) движением. С другой стороны, движение под действием гравитационных сил стало рассматриваться как инерциальное (бессилловое) движение по геодезическим линиям в искривленном пространстве-времени.

Еще одна закономерность, связанная с указанной схемой эволюции принципа относительности и появившимися новыми фундаментальными физическими теориями, выражает последовательное *усложнение пространств* соответствующих теорий. И действительно, классическая механика строится в евклидовом пространстве и времени. СТО формулируется в 4-мерном псевдоевклидовом пространстве-времени, а ОТО – в 4-мерном римановом пространстве-времени. Логично предположить, что попытки по-

строения новых фундаментальных физических теорий, выражающих тенденцию в указанной схеме, будут связаны с поисками новых, все более сложных пространств соответствующих теорий.

Какова же природа пространства в квантовой механике? Если трактовать квантовую механику, прежде всего, как новую *механику*⁹, то ее можно рассматривать как теорию, описывающую движение квантовых объектов корпускулярно-волновой природы в обычном евклидовом пространстве и времени, но только вероятностным образом с помощью волновой функции. Это укладывается в рамки копенгагенской интерпретации. Однако пространство и время в существующей КМ – «плохие» с той точки зрения, что они старые, евклидовы и не отвечают тенденции, которую образует представленная выше последовательность уже существующих фундаментальных механик – теорий относительности. Другими словами, пространство и время в КМ должно быть, возможно, еще сложнее, чем в релятивистских теориях. Не исключено, что потребуются и новая топология пространства квантовой механики. Кроме того, как уже отмечалось, с квантовой механикой явным образом не связан и принцип относительности, являющийся одним из краеугольных камней этой последовательности. Тем не менее предпринимались попытки ввести в квантовую механику аналоги принципа относительности, например принцип относительности к средствам наблюдения (В.А. Фок).

В пользу того, что пространство должно существенным образом отличаться от обычного евклидова, по-видимому, говорят и некоторые известные эксперименты и феномены. Так, мысленный эксперимент «микроскоп Гейзенберга» дал повод утверждать об отсутствии траекторий у квантовых частиц, а в подходе Р. Фейнмана необходимо брать интеграл по всем возможным траекториям частицы, а частица движется по всем этим траекториям одновременно. Неклассичность перемещения в пространстве квантовой частицы следует и из 2-щелевого эксперимента. Наконец, копенгагенская интерпретация квантовой механики утверждает о том, что до или между двумя измерениями квантовые частицы существуют только в потенциальной форме, что не позволяет говорить ни о каком наблюдаемом движении в пространстве, а потенциальность объектов, по-видимому, требует более глубокого анализа природы и самих пространства и времени.

В настоящее время, по-видимому, наиболее перспективными и широко обсуждаемыми вариантами квантовой теории гравитации являются теория струн и петлевая квантовая гравитация. Квантовая механика является одним из оснований в каждой из них. Для создания квантовой теории гравитации необходимо проквантовать гравитационное поле или, что эквивалентно, – проквантовать ОТО. Квантовая теория гравитации должна быть сформули-

⁹ Вопрос о сути квантовой механики достаточно нетривиален и требует отдельного рассмотрения. Например, ее можно определить как теорию операторного анализа в гильбертовом пространстве. Поскольку волновая функция является основным объектом стандартной квантовой механики, то последнюю можно определить и как теорию волновой функции. Существуют и другие варианты.

рована в терминах фоновонезависимой теории. То есть по образу и подобию ОТО пространство в ней должно стать динамическим объектом. Но поскольку гравитация (риманово пространство) в квантовой теории гравитации окажется квантованной, то существует две возможности.

Во-первых, логично предположить, что указанная процедура должна затронуть и КМ как фундаментальную составляющую создаваемой теории. Другими словами, пространство КМ также должно быть динамическим объектом, а сама теория – фоновонезависимой. В настоящее время пространство в КМ – «плохое» «старое» евклидово.

Во-вторых, теоретически допустим вариант, когда пространство КМ останется нединамическим, т.е. евклидовым и тем самым будет принципиально отличаться от пространства другой составляющей этой ожидаемой теории – ОТО. Подобный подход разумен, поскольку стандартная КМ – нерелятивистская теория. Но этот вариант не очень хорош тем, что он несимметричен в отношении динамической природы пространства и времени, и нет никаких оснований отказываться от такой симметрии между КМ и ОТО в квантовой теории гравитации.

Таким образом, для создания квантовой теории гравитации, по-видимому, более перспективным является поиск такого пространства КМ, в котором квантовые объекты двигались бы в динамическом пространстве-времени. Не исключено, что это может быть уже не риманово пространство, а какое-то другое, например пространство Лобачевского. В соответствии с этим в самой квантовой теории гравитации будет необходимо «сшить» два пространства – риманово и Лобачевского. Геометрия Лобачевского активно исследуется, в том числе, и в отношении использования в физике [8; 9], однако следует отметить, что она не приобрела такого же статуса, как риманова. Таким образом, можно ожидать, что в результате должна быть получена некая синтетическая геометрия квантованной гравитации, представляющая собой сшивку двух динамических геометрий: геометрии ОТО и геометрии квантовой теории¹⁰. Не исключено также, что простого объединения этих двух геометрий будет недостаточно и будет необходимо выйти на топологический уровень.

С концептуальной точки зрения существенным остается также вопрос не только о конкретной геометрии, но и о природе самого пространства квантовой механики: является ли оно субстанциональным или реляционным? Ответ на него может существенно изменить и интерпретацию КМ. Так, например, выбор реляционной природы пространства поставит вопросы о том, каковы те элементы (будем называть их *реляты*), отношения между которыми и дает на уровне квантовой механики феномен пространства¹¹. В качестве того, что может определять реляционную природу пространства, можно рассмотреть, например, электромагнитное поле. «Электромагнитное

¹⁰ Также не исключено, что при этом наряду с римановой геометрией в качестве второй геометрии следует рассматривать геометрию другой интерпретации КМ.

¹¹ Феноменологический характер пространства и времени активно исследуется, например, в различных вариантах квантовой теории гравитации.

взаимодействие лежит в основе большинства процессов окружающего нас мира – от масштабов нашей планеты до атомов и молекул. Именно благодаря ему материя связана в вещество и тела. Видимо, не будет преувеличением утверждать, что классические пространственно-временные представления самым непосредственным образом обусловлены электромагнитным взаимодействием» [6. С. 103]. Эта мысль оправдана с той точки зрения, что на новых уровнях реальности возникают принципиально новые феномены. Так, газ в комнате имеет такие характеристики, как температура и давление, хотя атомы этого газа ими не обладают. Поэтому логично предположить, что на уровне физической реальности, на котором доминируют электромагнитные взаимодействия, возникают новые феномены, обусловленные именно этим взаимодействием. В данном случае предполагается, что таким принципиально новым феноменом-качеством является классическое пространство-время. Но можно ли при этом считать второстепенными гравитационные взаимодействия, которые также определяют классическую физику? Или считать, что сильные взаимодействия, которые формируют ядра атомов, из которых построен весь непосредственно наблюдаемый предметный макроскопический 3-мерный мир, не вносят существенный вклад в феномен под названием «классическое пространство-время»?

Можно предположить, что реляты должны включать в себя не только все объекты микромира от атомов¹² до элементарных частиц, но и экспериментальную установку (Н. Бор) и даже всю Вселенную, для которой, как известно, может быть написана волновая функция. В этом можно усматривать некоторую модификацию принципа Маха. Согласно одной из трактовок последнего инерция, а несколько конкретнее – инертные свойства тел, задаются всеми удаленными звездами. В нашем же случае можно говорить о том, что реляционная природа пространства задается всеми уровнями физической реальности. При этом вполне возможно, а может быть, и с необходимостью реляционную природу пространства квантовой механики будет определять и квантово-полевой вакуум как субстанция, по-видимому, лежащая в основании квантовой реальности¹³. Поскольку квантово-полевой вакуум является объектом квантовой теории поля, в этом случае происходит выход за пределы стандартной квантовой механики в релятивистскую область. В этом случае следует сделать вывод о том, что пространство стандартной квантовой механики задается квантовой теорией поля, то есть релятивистской квантовой механикой. В качестве развития этой гипотезы можно предположить, что вероятностный бестраекторный (в копенгагенской интерпретации) характер движения объектов микромира задается свойствами квантово-полевого вакуума. Другими словами, для того, чтобы более глубоко понять природу пространства квантовой механики, необходимо выйти за ее пределы.

¹² Определенный квантовый характер имеют и молекулы, и даже макроскопические объекты и процессы (квантовые жидкости, сверхтекучесть, сверхпроводимость и др.).

¹³ Последнее – согласно квантово-полевой картины мира.

Отметим еще одну перспективу в фундаментальной физике, связанную с данной проблематикой: возможно, придется создавать и последовательно реализовывать целую *программу построения неметрической физики* [5. С. 122–140]. Аналогично тому, как постепенно прорисовывается и формируется уже набравшая мощь программа геометризации физики и менее явно – программа топологизации физики.

В итоге можно сделать вывод о необходимости выработки новых представлений о пространстве и времени в квантовой механике и соответственно о всех ее дальнейших обобщениях, начиная с квантовой теории поля как ее спецрелятивистского обобщения до общерелятивистского в квантовой теории гравитации и планковской физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ashtekar A., Shilling T.A.* Geometrical Formulation of Quantum Mechanics. – arXiv:gr-qc/9706069. – 1997, 23 Jun.. – Vol.1.
2. Brown M. Relational Quantum Mechanics and the Determinacy Problem – 2007. – <http://ssrn.com/abstract=1006232>
3. *Everett H.*: 1957, «Relative State' Formulation of Quantum Mechanics", *Reviews of Modern Physics* 29: 454-462; *Everett H.*: 1957, *On the Foundations of Quantum Mechanics*, thesis submitted to Princeton University, March 1, 1957, in partial fulfillment of the requirements for the Ph.D. degree.
4. *Вейль Г.* Гравитация и электричество // Альберт Эйнштейн и теория гравитации. – М.: Мир, 1979. – 592 с.
5. *Владимиров Ю.С.* URL: <http://www.rusvera.mrezha.ru/653/9.htm>
6. *Владимиров Ю.С.* Метафизика. – М.: БИНОМ, 2002. – 534 с.
7. *Владимиров Ю.С.* Реляционно-статистическая интерпретация квантовой механики (см. данный номер журнала).
8. *Иваненко ДД.* Геометрия Лобачевского и новые проблемы физики // Неевклидовы пространства и новые проблемы физики: сборник статей, посвящённых 200-летию Н.И. Лобачевского. – М., 1993. – С. 3.
9. *Кадолицев С.Б.* Геометрия Лобачевского и физика. – М.: УРСС, 2007. – 72 с.
10. *Мостепаненко А.М.* Пространство и время в макро-, мега- и микромире. – М., 1974. – С. 226–227.
11. *Попова А.Д.* Квантовая космология: нужна ли? // 100 лет квантовой теории. История. Физика. Космология: труды Международной конференции. – М.: НИИ-Природа, 2002. – С. 218–225.
12. *Фок В.А.* Об интерпретации квантовой механики // Философские вопросы современной физики. – М.: Государственное издательство политической литературы. – 1959. – С. 160–162.
13. *Эйнштейн А.* Вводные замечания об основных понятиях // Собр. науч. трудов. – М.: Наука. – 1966. – Т. 3. – С.623–626.
14. *Эйнштейн А.* Физика и реальность – М.: Наука, 1965. – 359 с.
15. *Эрекаев В.Д.* Проблема времени в квантовой гравитации и квантовой космологии // *Метавселенная, пространство, время.* – М.: ИФРАН, 2013.

ON SPACE IN QUANTUM MECHANICS

V.D. Erekeyev

The space problem in the quantum mechanics is discussed. It is shown, that there are the certain arguments testifying to possibility to include the quantum mechanics in frameworks of known evolution of a principle of a relativity and fundamental physical theories connected with it. It is also shown, that this evolution expresses consecutive complication of the spaces of the corresponding theories. The assumption that Euclidean space of quantum mechanics is not enough for the description of quantum-mechanical processes is come out and should be replaced with more difficult according to the tendencies existing within the frameworks of specified evolution.

Key words: the quantum mechanics, a relativity principle, space of the physical theory.

АНАЛИЗ ИНТЕРПРЕТАЦИЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

МЫШЬ ЭЙНШТЕЙНА, КОТ ШРЁДИНГЕРА И ДРУГ ВИГНЕРА: ОТКРЫТИЕ «ВНУТРЕННЕЙ» РЕАЛЬНОСТИ

Протоиерей Кирилл Копейкин

*Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербургская православная духовная академия*

Невозможность отказаться от понятия комплекснозначной амплитуды вероятности, для которой существует детерминистическое динамическое уравнение, и свести описание системы только к наблюдаемым величинам, означает, что в квантовой механике, в отличие от того, что имеет место в классике, мы оказываемся вынуждены ввести еще одно дополнительное измерение бытия – дополнительное по отношению к вероятностному пространству результатов наблюдений, описываемому на языке действительных чисел, – измерение «внутреннее», к которому невозможно прикоснуться непосредственно, а потому и невозможно иметь полное знание о нем. Это вынуждает поставить вопрос о необходимости принятия новой онтологии, принципиально отличной от прежней классической и напоминающей вне-пространственную реальность лейбницеvских монад, обладающих «внутренним», живым, «субъективным» измерением бытия, проявляющим себя вoвне так или иначе в зависимости от того, что и как мы вопрошаем.

Ключевые слова: онтология, монада, ЭПР-парадокс, кот Шрёдингера, внутреннее измерение бытия.

Как отмечал академик Л.И. Мандельштам, всякая физическая теория состоит из двух взаимодополнительных и взаимообуславливающих компонентов: это, во-первых, тот «язык», при помощи которого теория представляет мир в теоретическом субъекте, создавая теоретический образ реальности. Во-вторых, теория содержит динамические уравнения («законы»), характеризующие эволюцию физических систем в этом теоретическом образе. «Без первой части теория иллюзорна, пуста. Без второй вообще нет теории. Только совокупность двух указанных сторон дает физическую теорию» [1. С. 326–327].

Главный критерий полноты языка теории – детерминизм. Детерминизм предполагает идею сохранности знания о системе; существование динамических законов подразумевает, что знание о системе не теряется и не прибавляется; на основании данных в некий момент времени мы можем предсказать поведение системы в будущем и вычислить его в прошлом. Первой универсальной полной теоретической системой стали «Математические начала натуральной философии» Ньютона, предуказавшие путь развития классической физики на несколько столетий. Постулированные на основании весьма ограниченного набора локальных данных, ньютоновские законы оказались справедливы в масштабе всей Вселенной. Именно это стало сильнейшим аргументом в пользу того, что используемый для описания мира язык классической ньютоновской физики – язык расстояний, масс, энергий, импульсов и сил – является исчерпывающим языком описания реальности. Это не менее удивительно, чем факт существования универсальных динамических законов. Действительно, казалось бы, естественно было бы ожидать, что у природы есть некая сокрытая жизнь, обнаруживающая себя вовне в том, что мы называем «явлениями природы». Именно такое переживание мира является для человека исходным и фундаментальным. И вдруг оказывается, что для описания мира вполне достаточно тех характеристик, посредством которых он, если так можно выразиться, «существует вовне», выявляя себя в физических со-отношениях. И именно то, что таких «внешних» характеристик оказывается достаточно для описания глобальной динамики мироздания, становится сильнейшим аргументом в пользу полноты этого языка. Подтверждаемая практикой достаточность используемого теорией языка описания мира приводит к тому, что теория начинает претендовать не только на описание того, что существует, но и на определение того, что в принципе может существовать, а значит, и на исключение того, что в принципе существовать не может.

Впрочем, впоследствии выяснилось, что некоторые классические системы ведут себя индетерминированно. Отсутствие абсолютного детерминизма означает, что классическая физика оказывается открытой по отношению к более глубоким фундаментальным теориям – статистической физике и квантовой механике.

В классической статистической физике простые (статистические) законы поведения сложной системы формулируются на основании минимального знания о ней. Для этого мы отказываемся от того, чтобы описывать такую систему (например, газ, состоящий из большого числа частиц) как обычную классическую систему, поскольку это потребовало бы чрезмерной детализации описания (в приведенном примере – задания координат и скоростей всех составляющих газ частиц). Вместо этого мы приближенно описываем динамику сложной системы при помощи средних значений некоторых величин (например, для газа такими средними величинами, позволяющими достаточно хорошо описывать состояние системы, могут быть давление и температура). Средние величины представляют собой некую проекцию полно-

го, но неизвестного нам способа описания микросостояния системы, на известный нам, но не полный способ задания средних макроскопических величин. Фактически в статистической физике возникают два способа представления внешней действительности в (теоретическом) субъекте: полный и неполный. Один из них – полный – характеризуется максимально детализированным описанием системы «с абсолютной точки зрения», другой – неполный – характеризуется достаточным для нас описанием системы при помощи выбранных нами усредненных параметров. При этом предполагается, что в принципе можно дать полное описание системы, «подсмотреть», какова она «на самом деле», однако в целях упрощения описания мы отказываемся от излишней детализации и наше незнание истинного «положения дел» (например, координат и скоростей всех составляющих газ частиц) компенсируется знанием вероятности реализации тех или иных макросостояний из микросостояний. Таким образом, в классической статистической физике вероятность представляет собою просто меру субъективного незнания (или нежелания знать) ситуацию детально, никакой онтологической реальности ей не приписывается.

В квантовой механике – иначе; там ситуация радикально отличается от того, что имеет место в классике. В классической физике, подчеркивает Мандельштам, «установление связи математических величин с реальными вещами предшествовало уравнениям, то есть установлению законов, причем нахождение уравнений составляло главную задачу, ибо содержание величин заранее представлялось ясным независимо от законов». Способы определения длины, массы, или времени казались самоочевидными (впрочем, благодаря теории относительности выяснилось, что это далеко не так); основной проблемой науки считалось нахождение уравнений, то есть установление «законов природы». Напротив, квантовая физика «пошла по иному пути, чем классика. ... Теперь прежде всего стараются угадать математический аппарат, оперирующий с величинами, о которых или о части которых заранее вообще не ясно, что они означают. Так, несомненно, поступал Эйнштейн, особенно при создании общего принципа относительности. Это особенно ясно видно и на примере того, как создавалось уравнение Шрёдингера» [1. С. 329]. Действительно, уравнение Шрёдингера, описывающее динамику квантовомеханических систем на языке амплитуды вероятности (вектора состояния или волновой функции), было исходно постулировано как статистический закон для поиска собственных значений энергии – цикл работ Шрёдингера 1926 г. в журнале «Annalen der Physik», где он ввел свое уравнение, назывался «Квантование как проблема собственных значений» («Quantisierung als Eigenwertproblem»). Входящая в это уравнение волновая функция первоначально не имела физической интерпретации, и лишь позднее, в основном усилиями Макса Борна, удостоенного впоследствии за свое открытие Нобелевской премии, удалось установить, что квадрат модуля волновой функции представляет собою плотность вероятности обнаружения системы в данном состоянии. Между тем реально наблюдаемыми в квантовой меха-

нике, как и в классике, оказываются координата, импульс, энергия, а вовсе не амплитуда; результаты этих измерений представляют собой вероятностные распределения. Плотность вероятности обнаружения системы в том или ином состоянии с теми или иными значениями координаты, импульса или энергии равна квадрату модуля амплитуды вероятности.

Такой способ описания оказывается столь же строгим и эффективным, как и классический. Результаты предсказаний, полученных при помощи описания системы на языке амплитуды вероятности, поразительно хорошо соответствуют результатам их экспериментальной проверки. Это означает, что сам математический аппарат квантовой механики свидетельствует в пользу того, что физическая (онтологическая) реальность в квантовой механике должна приписываться именно амплитуде вероятности, для которой существует детерминистическое динамическое уравнение. Именно так думал и сам Шрёдингер (Паули прозвал его взгляды «цюрихской ересью»), до конца жизни не желавший принять идею о том, что уравнение, носящее его имя, описывает не физическую действительность, а представляет собой лишь некую математическую абстракцию, лишённую онтологической реальности. Кроме того, существует наше знание о реальности, характеризующееся квадратом модуля амплитуды.

Таким образом, в нерелятивистской квантовой механике, как и в статистической физике, возникают два способа представления внешней действительности в теоретическом субъекте. Один из них описывает реальность при помощи комплексной амплитуды вероятности, подчиняющейся детерминистическому уравнению Шрёдингера, в пределе расширяя, как и в классике, квантовомеханический способ описания на всю Вселенную (уравнение Уилера – Де Витта). Другой представляет наше (вероятностное) знание о результатах измерения состояния системы на языке вещественных чисел (равных квадрату модуля комплексной амплитуды). Эти два способа описания мира в теоретическом субъекте оказываются принципиально несводимыми друг к другу. Как отмечает Д.Н. Клышко, «все существующие математические модели квантового процесса измерения содержат два непересекающихся множества объектов: s -числа [действительные] и q -числа [комплексные]. Это означает, что “железный занавес” между классическими и квантовыми мирами остается непроницаемым... и мы по-прежнему играем роль обитателей платоновой пещеры, наблюдающих лишь тени или проекции квантового мира» [2. С. 1213]. Невозможность отказаться от понятия амплитуды и свести описание системы только к наблюдаемым величинам означает, что в отличие от того, что имеет место в классике, мы не имеем возможности непосредственно прикоснуться к реальности.

Такой вывод никак не принимался Эйнштейном. Он был убежден в том, что существуют простейшие «элементы физической реальности», значение которых можно предсказывать с абсолютной достоверностью – с вероятностью, равной единице. В 1935 г. в соавторстве с Борисом Подольским и Натаном Розеном он предложил умоглядный эксперимент, демонстри-

рующий, как ему казалось, неполноту квантовой механики [3, 4]. Суть его сводится к тому, что при косвенном измерении параметров квантовомеханических объектов, связанных общим прошлым, между ними обнаруживаются нелокальные корреляции, так что, измеряя состояние одной из частиц, мы некоторым образом «воздействуем» на другую, хотя никакого носителя взаимодействия нет. Иначе говоря, если квантовая механика справедлива, то мир не может быть разложен на простейшие «элементы реальности», существующие независимо друг от друга.

Один из крупнейших российских физиков академик В.А. Фок называл взаимодействие, обусловленное наличием общего вектора состояния (как это происходит в ЭПР-взаимодействии), «не-силовым» и сравнивал его с взаимодействием человеческих личностей – взаимодействием не физическим, но информационным, -ическим [5. С. 83–84] (Шрёдингер придумал даже такой каламбур: «Теория волны становится психологической» [6. С. 290]). Эйнштейн никак не хотел поверить в это. Как вспоминал Уилер, «защищал он свою точку зрения чрезвычайно эффектно. Я помню, как на последней лекции Эйнштейна, которую я слушал, он спрашивал: “Если мышь смотрит на Вселенную, изменяется ли от этого состояние Вселенной?”» [7. С. 17].

В том же 1935 г. Шрёдингер после обширной переписки с Эйнштейном опубликовал статью «Текущая ситуация в квантовой механике» [8], посвященную обсуждению парадокса Эйнштейна – Подольского – Розена. В этой статье он, в частности, обсуждает следующий мысленный эксперимент: пусть в закрытом ящике находится кот и ампула с ядом, которая разбивается, если распадается хотя бы один атом находящегося там же радиоактивного вещества. Таким образом, состояние кота (жив он или мертв) зависит от специфически квантовомеханического процесса (распада радиоактивного атома). В соответствии с законами квантовой механики до тех пор, пока наблюдатель не откроет ящик и не увидит находящегося там кота, исследуемая система (кот и ядро радиоактивного атома) находится в состоянии, описываемом на языке вектора состояния или волновой функции как сосуществование (суперпозиция) альтернативных состояний живого и мертвого кота, таким образом, он «ни жив, ни мертв». Лишь в результате осознания наблюдателем результата измерения с определенной вероятностью реализуется одна из альтернатив и кот оказывается либо живым, либо мертвым. Такой вывод совершенно не согласуется с нашим интуитивным представлением о том, что кот, даже если мы не открываем ящик, должен быть либо живым, либо мертвым.

Расширением парадокса шрёдингеровского кота является так называемый «парадокс друга Вигнера», сформулированный выдающимся американским физиком Юджином Вигнером [9]. Он еще более усиливает парадоксальность ситуации квантовомеханического наблюдения. Действительно, если именно индивидуальное сознание (точнее, о-сознание) наблюдателя ответственно за окончательную реализацию одной из возможных квантово-

механических альтернатив, то почему же тогда разные наблюдатели видят один и тот же результат измерения? Пусть Вигнер, открыв коробку, видит живого кота. Тогда вектор состояния системы переходит в состояние «ядро не распалось, кот жив». Однако его друг, находящийся за пределами лаборатории, еще не знает об этом, и с его точки зрения состояние системы по-прежнему описывается суперпозицией живого и мертвого котов (плюс состояние ума осуществившего наблюдение Вигнера); для него редукция произойдет лишь тогда, когда он узнает об исходе эксперимента. То же справедливо и для всех остальных наблюдателей в мире. Таким образом, в масштабе Вселенной кот станет стопроцентно живым или стопроцентно мертвым лишь тогда, когда об этом узнают все существующие в ней сознания.

Парадокс шрёдингеровского кота особенно интересен тем, что он не затрагивает вопроса об эволюции рассматриваемой системы, но четко высвечивает главную проблему – проблему представления реальности в наблюдающем мир теоретическом субъекте и проблему его (представления) онтологической интерпретации. В классике проблемы нет – реальность там одна-единственная, и именно она представлена в субъекте в виде состояния исследуемой системы, а раз(лич)ные субъекты различаются лишь своим различным знанием (незнанием) этой единой реальности; именно этой реальности и приписывается статус подлинного существования. Парадокс шрёдингеровского кота возникает из-за того, что обоим способам представления реальности в субъекте (одному, описываемому амплитудой вероятности, подчиняющейся динамическому детерминистическому уравнению Шрёдингера, и другому, представляющему собою вероятностное пространство «внешних» наблюдений) мы приписываем одинаковый онтологический статус «подлинной реальности». Однако сам математический аппарат нерелятивистской квантовой механики и ее предсказательная эффективность свидетельствуют в пользу того, что онтологическая реальность должна быть приписываема именно тому уровню бытия, который описывается при помощи подчиняющейся универсальному детерминистическому динамическому закону амплитуды вероятности.

Первоначально обсуждение парадоксов Эйнштейна – Подольского – Розена, шрёдингеровского кота и друга Вигнера было чисто умозрительным до тех пор, пока в 1964 г. ирландский физик-теоретик Джон Стюарт Белл не сформулировал неравенства, позволяющие экспериментально проверить, действительно ли измеряемые параметры существуют «объективно» до измерения или же они возникают в результате измерительной процедуры [10; 11]. Впоследствии целая серия экспериментов выявила нарушение неравенств Белла [12–16]. Эти эксперименты произвели настоящую катастрофу в нашем понимании мира, раз и навсегда разрушив привычное, воспитываемое классической физикой представление о мире как «объективной физической (то есть не-психической, «вывернутой наружу») реальности», существующей независимо от наблюдений. По убеждению Абнера Шимони, «философское значение неравенств Белла заключается в том, что они допускают

практически прямую проверку иных картин мира, отличающихся от той картины мира, которую дает квантовая механика. Работа Белла позволяет получить некоторые прямые результаты в экспериментальной мета-физике» [17. С. 35]. С мнением Шимони согласен и Бернард д'Эспанья, увидевший в экспериментах по проверке неравенств Белла «первый шаг к возникновению экспериментальной мета-физики» [18. С. 1172]. И метафизика эта свидетельствует о том, что представления о мире как совокупности «частиц материи», обладающих некоторыми «объективными» свойствами, измерения которых лишь устраняют наше субъективное незнание относительно того, какие именно значения имели эти свойства, не соответствует реальному положению дел [19; 20]. Как оказалось, некоторые из параметров частиц, обнаруживаемых в результате экспериментов, могут вообще не существовать до измерения. «Доктрина, согласно которой мир состоит из объектов, чье существование не зависит от человеческого сознания, противоречит квантовой механике и экспериментально установленным фактам», – утверждает д'Эспанья [21. С. 158].

Обнаружение в опытах по проверке неравенств Белла априорного «несуществования» некоторых приписываемых микрообъектам параметров до эксперимента и их «возникновение» в результате постановки опыта вовсе не означает, что «осознание» результатов эксперимента оказывает воздействие на мир. Скорее, это можно интерпретировать следующим образом: привычные классические характеристики – такие как координата и импульс – не являются «естественными», онтологически присущими простейшим «элементам» ткани мироздания, но представляют собой «проекцию» состояния частицы, описываемого при помощи вектора состояния, на наши измерительные приборы. Полагая в квантовой механике в основу нашего способа описания мира результаты взаимодействия исследуемого объекта с прибором, то есть проецируя реальность на измерительный прибор, мы вводим, по словам академика В. А. Фока, наряду с прежним классическим понятием относительности к системе отсчета понятие относительности к средствам наблюдения [22. С. 12; 23. С. 160–162]. Те параметры, которые мы приписываем микрообъектам – это на самом деле не их собственные параметры, но параметры тех, как правило, классических или, по крайней мере, классически описываемых приборов, которые используются для измерения этих величин. Действительно, только для макроскопических тел можно представить осмысленную процедуру измерения, то есть сопоставления используемым в теории математическим символам реальных физических объектов. Когда же мы вторгаемся в микромир, то приборы и внешние условия проводимых квантовомеханических измерений мы по-прежнему должны описывать на нашем обыденном языке, то есть «классически», иначе мы просто не сможем никому объяснить, что же, собственно, мы измеряли. «Как бы далеко ни выходили явления за рамки классического физического объяснения, все опытные данные должны описываться при помощи классических понятий, – подчеркивал Нильс Бор. – Обоснование этого состоит просто в констатации

точного значения слова эксперимент. Словом эксперимент мы указываем на такую ситуацию, когда мы можем сообщить другим, что именно мы сделали и что именно мы узнали. Поэтому экспериментальная установка и результаты наблюдений должны описываться однозначным образом на языке классической физики» [24. С. 60]. В то же время саму реальность квантового мира мы оказываемся вынуждены описывать на языке комплекснозначной амплитуды вероятности.

Невозможность отказаться от понятия амплитуды и свести описание системы только к наблюдаемым величинам означает, что, в отличие от того, что имеет место в классике, мы не имеем возможности непосредственно прикоснуться к реальности. В классической физике, где реальность мира, если можно так выразиться, «вывернута вовне», для внешнего наблюдателя возможен внешний же контакт с исследуемой системой, который называется «измерением». Такого рода внешние наблюдения (измерения) лишь подтверждают соответствие наших знаний о состоянии системы реальной ситуации (или позволяют охарактеризовать начальные условия) и потому никак не влияют ни на саму систему, ни на ее состояние – представление реальности в теоретическом субъекте. В квантовой механике – иначе. Когда мы оказываемся вынуждены описывать реальность на языке комплекснозначной амплитуды вероятности (на языке упорядоченных пар чисел), то сам этот язык подталкивает к необходимости введения еще одного дополнительного измерения бытия – дополнительного по отношению к вероятностному пространству результатов наблюдений, описываемому на языке действительных чисел, – измерения «внутреннего», к которому невозможно прикоснуться непосредственно, а потому и невозможно иметь полное знание о нем. В этом случае измерение, производимое над физической системой, вообще говоря, изменяет знание наблюдателя о реальности, а значит, меняет состояние системы (амплитуду вероятности) – образ реальности в субъекте.

Открытие новой физической реальности и соответствующего ей теоретического понятия – волновой функции или вектора состояния – главное, на наш взгляд, достижение квантовой механики! Как подчеркивал Вернер Гейзенберг, «история физики – не просто накопление экспериментальных открытий и наблюдений, к которым подстраивается их математическое описание; это также и история понятий. Первая предпосылка познания явлений природы – введение подходящих понятий; лишь с помощью верных понятий мы в состоянии по-настоящему знать, что мы наблюдаем» [25. С. 46]. Новые понятия – это новые «органы восприятия», позволяющие обнаружить новые грани реальности. Именно благодаря введению Ньютоном новых физических понятий, в том числе понятия силы тяготения, стала возможна классическая механика. Это потребовало немалой интеллектуальной смелости: для нас существование силы тяготения является само собой разумеющимся фактом, а во времена Ньютона было абсолютно непонятно, как сила притяжения может действовать в пустом пространстве без какого бы то ни было материального посредника. Именно непроясненность этого вопроса вынудила

Ньютона написать знаменитое «*hypothesis non fingo*» («гипотез не измышляю») на последней странице «Общего поучения» («*Scholium generale*»), которым заканчивается второе издание «Математических начал натуральной философии». Ньютон первоначально полагал, что переносчиком гравитационного взаимодействия мог быть заполняющий пространство эфир, но для этого он должен был бы быть достаточно плотным, что неминуемо привело бы к отклонению от законов Кеплера, выполнявшихся на удивление хорошо. Если же эфир «нетелесен», то его свойства не могут входить в уравнения движения, так что публично Ньютон предпочитал высказываться предельно осторожно, утверждая, что исследованию (по крайней мере пока) могут подлежать «не виды сил и физические свойства их, а лишь величины и математические соотношения между ними» [26. С. 244]. Нечто подобное, на наш взгляд, происходит и сегодня – математика квантовой механики свидетельствует о том, что связанные общим прошлым квантовомеханические объекты «воздействуют» друг на друга (как это происходит в эксперименте Эйнштейна – Подольского – Розена), хотя никакого носителя взаимодействия нет, но каким образом это происходит нам абсолютно непонятно.

Введение нового «необъект(ив)ного» понятия вектора состояния свидетельствует о необходимости принятия новой онтологии, принципиально отличной от прежней классической. Онтология классической физики – материалистическая. Обсуждая проблему идеализации как предпосылку превращения естествознания в математическую науку, Кант в работе «Метафизические начала естествознания» писал: «Чтобы стало возможным приложение математики к учению о телах, лишь благодаря ей способному стать наукой о природе, должны быть предпосланы принципы конструирования понятий, относящиеся к возможности материи вообще; иначе говоря, в основу должно быть положено исчерпывающее расчленение понятия о материи вообще. Это – дело чистой философии, которая для этой цели не прибегает ни к каким особым данным опыта, а пользуется лишь тем, что она находит в самом отвлеченном (хотя по существу своему эмпирическом) понятии, соотношенном с чистыми созерцаниями в пространстве и времени (по законам, существенно связанным с понятием природы вообще), отчего она и есть подлинная метафизика телесной природы» [27. С. 60–61]. Впрочем, по мысли Шрёдингера, «отношение Канта к науке было невероятно наивным. Он принял физическую науку в той форме, какой она достигла в его время (1724–1804), как нечто более или менее окончательное и занялся философским объяснением ее утверждений» [28. С. 74]. Но, тем не менее, в классической физике кантовское понятие материи как неизменной самотождественной субстанции было адекватно создаваемому ей теоретическому образу мира. В квантовой механике остается неясным, какая онтологическая реальность соответствует вектору состояния, представляющему собой фундаментальное квантовомеханическое понятие и являющемуся математическим представителем микрообъекта. Как отмечал известный российский физик Д.Н. Клышко, «подводя итог, мы приходим к пессимистическому взгляду на

современное состояние “великой квантовой проблемы” физики XX в. – дать реалистическое [фактически – материалистическое, точнее – субстанциальное] толкование вектора состояния. Несмотря на все усилия нескольких поколений физиков, сотни статей, десятки конференций и монографий, изобретение множества терминов, – разумной общепринятой альтернативы копенгагенскому языку [языку рецептурному, принципиально отказывающемуся от постановки вопросов об онтологической природе мироздания] ...повидимому, не создано» [2. С. 1213]. Главный же вывод, на наш взгляд, с неизбежностью следующий из проделанного выше анализа процесса квантовомеханического измерения, таков: онтологическая реальность, соответствующая вектору состояния, напоминает вне-пространственную реальность лейбницеvских монад, обладающих «внутренним», живым, «субъективным» измерением бытия, но при этом имеющих «окна», посредством которых они могут «вступать в общение» (обмениваться частицами – переносчиками взаимодействия) с другими монадами. Именно эта описываемая на языке амплитуды вероятности и сокрытая от нас «внутренняя» реальность (открытой является реальность «общего пространства со-знания», пространства «внешних» наблюдений), проявляющая себя по отношению к нам так или иначе в зависимости от того, что и как мы вопрошаем, и является подлинной реальностью, Реальностью с большой буквы. Самое же удивительное заключается в том, что эта реальность – относительна! Она в известном смысле «субъективна», а потому может проявлять себя так или иначе по отношению к внешнему вопрошанию. И примечательно, что по мысли П.П. Гайденко, «если какая из естественнонаучных программ XVII в. и сохранила свою живую актуальность также и для XX [а тем более для XXI, – добавили бы мы] столетия, то это, пожалуй, лейбницева» [29. С. 332].

Автор выражает глубокую благодарность А.В. Белякову за многочисленные стимулирующие обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мандельштам Л.И.* Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике / под ред. С.М. Рытова. – М.: Наука, 1972. – С. 325–437.
2. *Клышко Д.Н.* Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты // Успехи физических наук. – 1994. – Т. 164. – Вып. 11. – С. 1187–1214.
3. *Einstein A., Podolsky B., Rosen N.* Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // *Physical Review*. – 1935. – Vol. 47. – N 10. – P. 777–780.
4. *Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н.* Можно ли считать квантовомеханическое описание физической реальности полным // Эйнштейн А. Собрание научных трудов: в 4 т. / под ред. И.Е. Тамма, Я.А. Смородинского, Б.Г. Кузнецова. Т. III: Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики 1901–1955. – М.: Наука, 1966. – С. 604–611.

5. *Фок В.А.* Замечания к творческой автобиографии Альберта Эйнштейна // Эйнштейн и современная физика: сб. памяти А. Эйнштейна. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1956. – С. 72–85.
6. *Бройль де Л.* Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики (с критическими замечаниями автора) / предисл. и дополняющие замечания Ж. Лошака; пер. с франц. Н. В. Самсоненко; под ред. Г.З. Зайцева. – М.: Мир, 1986.
7. *Уилер Дж. А.* Предвидение Эйнштейна. – М.: Мир, 1970.
8. Schrodinger E. Die gegenwartige Situation in der Quantenmechanik // *Naturwissenschaften*. – 1935. – V. 23. – N 48. – S. 807–812; – N 49. S. 823–828; – N 50. S. 844–849.
9. *Wigner E.P.* Remarks on the Mind-Body Question // *Wigner E. P. The Scientist Speculates* / ed. by L. G. Good. – London, 1961. – P. 284–302.
10. *Bell J.S.* On The Einstein – Podolsky – Rosen Paradox // *Physics*. – 1964. – Vol. 1. – N 3. – P. 195–200.
11. *Bell J.S., John S.* Bell on the Foundations of Quantum Mechanics / ed. by M. Bell, K. Gottfried, M. Veltman. – Singapore, 2001.
12. *Freedman S.J., Clauser J.F.* Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories // *Physical Review Letters*. – 1972. – Vol. 28. – P. 938–941.
13. *Aspect A., Grangier P., Roger G.* Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell’s Theorem // *Physical Review Letters*. – 1981. – Vol. 47. – P. 460–463.
14. *Aspect A., Dalibard I., Roger G.* Experimental Tests of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers // *Physical Review Letters*. – 1982. – Vol. 49. – P. 1804–1807.
15. *Weihs G. et al.* Violation of Bell’s Inequality under Strict Einstein Locality Conditions // *Physical Review Letters*. – 1998. – Vol. 81. – P. 5039–5043.
16. *Scheidt et al.* Violation of Local Realism with Freedom of Choice // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – November 16. – 2010. – Vol. 107. – P. 19708–19713.
17. *Shimony A.* Contextual Hidden Variables Theories and Bell’s Inequalities // *The British Journal for the Philosophy of Science*. – 1984. – Vol. 35. – N 1. – P. 258–45.
18. *d’Espagnat B.* Toward a Separable «Empirical Reality»? // *Foundations of Physics*. – 1990. – Vol. 20. – N 10. – P. 1147–1172.
19. *Aspect A.* Quantum Mechanics: To Be or not to Be Local // *Nature*. – Vol. 446 (19 April 2007). – P. 866–867.
20. *Groblacher S., Paterek T., Kaltenbaek R., Brukner C., Zukowski M., Aspelmeyer M., Zeilinger A.* An Experimental Test of Non-Local Realism // *Nature*. – Vol. 446. (19 April 2007). – P. 871–875.
21. *d’Espagnat B.* The Quantum Theory and Reality // *Scientific American*. – Nov. 1979. – P. 158–181.
22. *Фок В.А.* Квантовая физика и строение материи. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1965; – 2-е изд. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010.
23. *Фок В.А.* Об интерпретации квантовой механики // *Философские вопросы современной физики* / под ред. И. В. Кузнецова и М. Э. Омеляновского. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 154–176.
24. *Бор Н.* Атомная физика и человеческое познание. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961.
25. *Гейзенберг В.* Развитие понятий в истории квантовой механики // *Гейзенберг В. Избранные философские работы: Шаги за горизонт. Часть и целое (Беседы вокруг атомной физики)* / пер. А.В. Ахутина, В.В. Бибикина. – СПб.: Наука, 2006. – С. 46–59.
26. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии / пер. с лат. и прим. А.Н. Крылова; предисл. и ред. Л.С. Полака. – М.: Наука, 1989.

27. *Кант И.* Метафизические начала естествознания // Кант И. Сочинения: в 6 т. – Т. 6 / ред. Т.И. Ойзерман. – М.: Мысль, 1966. – С. 53–176.
28. *Шрёдингер Э.* Разум и материя / пер. с англ. – М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000.
29. *Гайденко П.П.* Эволюция понятия науки (XVII–XVIII вв.). Формирование научных программ Нового времени. – М.: Наука, 1987.

EINSTEIN'S MOUSE, SCHROEDINGER'S CAT AND WIGNER'S FRIEND: THE OPENING OF AN "INNER" REALITY

Archpriest Kirill Kopeikin

The impossibility of rejecting the concept of complex-valued probability amplitude, for which there exists a deterministic dynamic equation, and restricting the description of a system to observed quantities alone means that in quantum mechanics, in contrast to what we find in classical physics, we are forced to introduce still another, additional dimension of being, additional with respect to the probabilistic space of observation results described in the language of real numbers – an “inner” dimension which cannot be touched directly and of which, therefore, it is impossible to have complete knowledge. This compels us to raise the question of the need to adopt a new ontology fundamentally different from the former, classical one and reminiscent of the spaceless reality of Leibniz’s monads possessing an “inner,” living, “subjective” dimension of being manifesting itself outwardly in one way or another depending on what and how we inquire.

Key words: ontology, monad, EPR paradox, Schroedinger’s cat, inner dimension of being.

КВАНТОВАЯ ЧАСТИЦА И ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕЕ ПОСТУЛАТЫ В «ТЕОРФИЗИЧЕСКОЙ» ИНТЕРПРЕТАЦИИ

А.И. Липкин

Московский физико-технический институт

Дается система постулатов квантовой механики, которая задает основания квантовой механики и определяет «квантовую частицу», обладающую корпускулярно-волновым и вероятностным поведением, которая задает онтологию квантовой механики. При этом проявляя в одних отношениях корпускулярные, в других волновые свойства она не сводится ни к волне, ни к частице. Эта система постулатов задает «теорфизическую» «интерпретацию» квантовой механики, которой пользуются «работающие физики». Она является альтернативой «копенгагенской» и противостоящей ей «антикопенгагенской» интерпретации.

Ключевые слова: интерпретация квантовой механики, основания квантовой механики, постулаты квантовой механики, онтология квантовой механики, парадоксы квантовой механики, корпускулярно-волновой дуализм, соотношения неопределенностей, двухщелевой эксперимент.

В принципе разные «интерпретации» (точнее парадигмы) предполагают разные онтологии. К. Поппер ещё 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. Интерпретаций сегодня много, но для цели данной статьи рассмотрение этих трех достаточно. Наиболее общепринятой в философии науки является первая. Вторая представлена главным образом знаменитыми «парадоксами», которые призваны показать незаконченность «копенгагенской интерпретации». Онтологии, представляющие первую, множественны и, как правило, нечетки. Попытка создать проработанный вариант такой онтологии на базе идущих от Аристотеля понятий «потенциального» и «реального» дана здесь А.Ю. Севальниковым. Онтологии, представляющие вторую интерпретацию, связаны со «статистической интерпретацией», с интерпретацией со скрытыми параметрами (бюмовской) и т.п. Третья интерпретация, по Попперу, онтологии не предполагает, ибо является чисто инструменталистской, сводящейся к математическому формализму. Автор, исходя из принадлежности сообществу «работающих физиков» и следуя призыву А. Эйнштейна: «Если вы хотите кое-что выяснить у физиков-теоретиков о методах, которые они применяют, я советую вам твердо придерживаться одного принципа: не слушайте, что они говорят, а лучше изучайте их действия», выявил в основе действий этой группы ясно видимую онтологию, заданную в рамках четкой формулировки оснований квантовой механики, в рамках которой

никаких парадоксов нет (поэтому они и не обращают внимание на споры первых двух групп). Назовем эту формулировку «теорфизической интерпретацией». Она задает «основания квантовой механики» в соответствии с общей схемой, изложенной в [9], где физика представляется как совокупность разделов физики (РФ_j), каждый из которых имеет собственные основания (ОРФ_j) в виде системы постулатов, определяющих базовые понятия, среди которых особое место занимают «первичные идеальные объекты» (ПИО), образующие *онтологические основания физики*: из них строятся физические модели явлений, которые мною названы «вторичными идеальными объектами» (ВИО). В физике идеальные объекты (ИО) – то, что «движется» в некотором общем смысле, определяемом тем, что движение представляется как переход объекта из одного состояния в другое $S_A(t_1) \rightarrow S_A(t_2)$.

Сказанное можно выразить следующей схемой:

$$\{\text{ОРФ}_j [\text{ПИО}_j]\} \rightarrow [\text{ВИО}(\{\text{ПИО}_j\})] \leftarrow \text{Явление.} \quad (1)$$

Итак, ВИО явным образом определяются через ПИО, а ПИО задаются в основаниях с использованием неявного типа определения, где группа базовых понятий, включающая ПИО, определяется группой постулатов. Такой тип определения для геометрии ввел Д. Гильберт. Переход от декартовского принципа очевидности к гильбертовскому неявному типу определения базовых понятий составляет суть методологической революции границы XIX–XX вв., имевшей место в математике и физике. Именно эта революция лежит в основе перехода от «классической» к «неклассической» физике. Гильбертовский тип определения базовых понятий позволяет вводить более сложные и неочевидные (весьма непривычные) понятия, к которым относятся и ПИО квантовой механики – «квантовая частица».

Основную часть оснований квантовой механики¹⁴, определяющую квантовую частицу, можно представить в виде следующей системы постулатов:

1. *Постулаты Шрёдингера*¹⁵, вводят а) *математический образ состояния* квантового объекта (системы) $S_A(t)$ в виде “*волновой функции*” $\Psi_A(t)$ (ее часто называют Ψ -функцией)¹⁶ и б) *уравнение Шрёдингера* в качестве уравнения движения, куда входит оператор Гамильтона $H_{\text{кв}}$, являющийся математическим образом квантовомеханического объекта (и внешних условий). В силу того, что уравнение Шрёдингера – уравнение волнового типа, эти постулаты ответственны за волновые свойства квантового объекта. При этом связь состояний здесь, как и в классической физике, абсолютно детерминистична.

¹⁴ Полный перечень постулатов приведен в [9], туда входит еще ряд постулатов про пространство и время, общих с классической механикой.

¹⁵ Можно исходить из постулатов Гейзенберга, которые эквивалентны постулатам Шрёдингера. Но в представлении (математическом представлении) Шрёдингера проще излагать физику дела.

¹⁶ Поэтому у нее нет собственного физического смысла, поиском которого занимаются некоторые [14].

2. Постулаты квантования Гейзенберга (Гейзенберга–Бора) задают способ построения *математического образа физического объекта* – квантовый оператор Гамильтона $H_{кв}$, который входит в «уравнение движения» (уравнение Шрёдингера). Стандартную процедуру его построения можно представить в виде *процедуры квантования «затравочного» классического объекта (системы)*.

Эта общая процедура состоит в следующем. Сначала берется классическая модель объекта (например, планетарная модель атома). Для него строится классический математический образ – классический гамильтониан $H(x, p)$ в декартовой системе координат (являющийся функцией от положений (x) и импульсов (p) частиц). Затем проводится процедура квантования в виде замены импульсов на соответствующие операторы (например, компоненту импульса частицы p_x меняют на оператор $(-ih/4\pi)\partial/\partial x$)¹⁷. В результате этого получают квантовый гамильтониан $H_{кв}$, то есть математический образ квантового объекта, отвечающий квантовомеханической физической модели (так получается квантово-механическая модель атома с делокализованными состояниями (“орбиталями”) электронов в атоме)¹⁸. Эта процедура (но без такого особого названия) была сформулирована в фундаментальных работах 1927–1930 гг. Джона фон Неймана и Поля Дирака [5. С. 156; 10], а у Луи де Бройля она существует под именем «автоматический вывод волнового уравнения» [2. С. 45]. По сути, она появляется уже в первых основополагающих работах Гейзенберга (1925). В 1949 г. Бор излагает дело так: «Гейзенберг (1925) заложил основы рациональной квантовой механики, которая получила быстрое развитие благодаря важным вкладам Борна и Иордана, а также Дирака. Теория вводит формальный аппарат, в котором кинематические и динамические переменные классической механики заменяются абстрактными символами, подчиняющимися некоммутативной алгебре» [1. Т. 2. С. 404–405]. Последние есть не что иное, как операторы в современной терминологии. При этом, по утверждению Джеммера, «фундаментальной особенностью, характерной для подхода Гейзенберга, был способ использования принципа соответствия Бора... Гейзенберг... рассмотрел... возможность “угадать” – в согласии с принципом соответствия (Бора. – *А.Л.*) – не решение частной квантово-механической задачи, а математическую схему новой механики» [4. С. 199]. Поэтому рассматриваемую процедуру квантования «затравочного» классического объекта в «новой» квантовой механике¹⁹

¹⁷ В более общем случае надо говорить не о координате и импульсе, а о канонических переменных.

¹⁸ Эта процедура, которая здесь названа «квантованием затравочной классической модели», может быть проведена с разной степенью полноты. Ею, в частности, определяется выбор квазиклассического (использующего сочетание «первичных идеальных объектов» квантовой механики и классической электродинамики) или последовательного квантово-механического описания электромагнитного поля (или фильтров типа экрана с щелью).

¹⁹ В литературе «квантовая теория» и «квантовая механика» рассматриваются как синонимы. В нашей системе понятий, где четко различаются основания раздела физики и теории конкретных явлений мы под «квантовой механикой» понимаем раздел физики. Поэтому мы

можно считать гейзенберговским обобщением боровского «принципа соответствия» «старой» квантовой теории²⁰. В предлагаемой в данной работе формулировке указанная процедура возводится в ранг теоретического постулата, входящего в базовую систему исходных понятий и постулатов квантовой механики, подобно тому как Бор возводил в ранг «чисто теоретического закона» свой «принцип соответствия» в «старой» квантовой теории [1. Т. 1. С. 505]²¹.

Эта процедура используется и при приготовлении объекта в начальном состоянии (например, по логике классической физики готовится поток электронов с определенным импульсом, после чего ему приписывается соответствующая волновая функция типа плоской волны), а также при задании операторов, отвечающих любым измеримым величинам в постулатах Борна.

Из места «затравочной» классической модели в базовой системе исходных понятий и постулатов квантовой механики вытекает то, что в нерелятивистской квантовой механике часто фигурируют те же измеримые величины, а вследствие этого и те же типы процедур измерения и приготовления, что и в классической физике²². Так, измерение положения квантовой частицы (микрочастицы) осуществляется с помощью фильтра или фотопластинки и метра (микрометра), а приготовление частиц с определенным импульсом осуществляется с помощью излучающей их нагретой спирали и соответст-

сопоставляем «старую квантовую теорию» (устоявшийся в литературе термин) и «новую» квантовую механику как промежуточную стадию становления и результат.

²⁰ «Принцип соответствия» Бора заключался в «требовании непосредственного перехода квантово-теоретического описания в обычное в тех случаях, когда можно пренебречь квантом действия» [1. Т. 2. С. 66]. За счет этого определялись неизвестные параметры в формулах «старой» квантовой теории.

²¹ Отметим, что в формулировке П. Дирака (1930) обсуждаемая процедура содержит ряд дополнительных оговорок: «Обычно можно предполагать, что гамильтониан в классической и квантовой механике является одной и той же функцией канонических координат и импульсов (...в декартовой системе координат...). При этом *могло бы возникнуть затруднение*, если бы классический гамильтониан содержал произведение множителей, квантовые аналоги которых не коммутируют между собой, ибо тогда было бы неизвестно, в каком порядке расположить эти множители в квантовом гамильтониане. *Однако для большинства простейших динамических систем, изучение которых важно в атомной физике, такое затруднение не возникает* (выдел. – А.Л.)» [4. С. 156]. Указанное «затруднение», часто решается введением дополнительного оператора упорядочения (типа оператора временного упорядочения в представлении чисел заполнения). Несколько более сложная цепочка опосредований используется при введении в нерелятивистской квантовой механике такой неклассической величины, как спин: здесь «классической затравкой» является идея внутреннего собственного момента вращательного движения у частицы и связь его со свойством группы вращения (изотропностью пространства). Есть и другие дополнительные способы введения тех или иных элементов в гамильтониан системы, но при внимательном анализе, как правило, они в той или иной форме тоже восходят к классическим «затравочным» моделям.

²² «Вследствие этого, – говорит Дирак о рассматриваемой процедуре, – мы можем в большинстве случаев употреблять для описания динамических систем в квантовой теории тот же язык, что и в классической теории (например, можем говорить о частицах с определенными массами, движущихся в заданном поле сил), и если нам дана система в классической механике, то обычно можно придать смысл понятию “той же самой” системы в квантовой механике» [5. С. 156].

вующего фильтра. Таким образом, благодаря процедуре квантования «затраченного» классического объекта классическая физика оказалась встроенной в основания квантовой физики²³.

3. И наконец, постулаты М. Борна – самые главные, вводящие вероятность и корпускулярно-волновое поведение. Представим их в виде трех пунктов.

В качестве первого возьмем общепринятую «вероятностную интерпретацию волновой функции» М. Борна, задающую правила, позволяющие по математическому образу состояния $\Psi_A(t)$ определить *распределения вероятностей* соответствующих измеримых величин. Волновая функция Ψ_A задает распределение вероятностей всех измеримых величин в данном состоянии объекта-системы (если мы знаем Ψ_A , то мы можем узнать распределение вероятностей любой измеримой величины и их комбинаций).

Логичным продолжением первого пункта является второй: *в квантовой механике состояние физического объекта определяется не значениями, а распределениями вероятностей значений* соответствующих измеримых величин²⁴. Это центральное для оснований квантовой механики положение.

Из этого следует третий пункт – *одно измерение ничего не говорит о состоянии объекта* (ни до, ни после этого акта измерения, если оно не приготовлено в особом «собственном» состоянии), чтобы определить распределение вероятностей, *требуется достаточно длинная серия измерений* (предполагающая к тому же использование «томографического» метода²⁵ или его аналога, чтобы выявить и характерную для волны фазу). Это существенное изменение операций измерения по сравнению с классической механикой.

Задаваемое этими постулатами корпускулярно-волновое и вероятностное поведение – это новый тип поведения, оно имеет какие-то общие свойства с поведением частицы и какие-то общие свойства с поведением волны (интерференция и дифракция), но не сводится к ним.

Эти свойства очень ярко проявляются в известном мысленном двухщелевом эксперименте, где, пуская квантовые частицы (фотон, электрон) по одной, мы получаем на фотопластинке поглощение частицы в определенном месте (корпускулярное свойство), а если будем продолжать достаточно долго это повторять, то на распределении вероятности получим типичную дифракционно-интерференционную картинку (волновое свойство).

В связи с этим экспериментом часто возникает искушение задать вопрос: «Через какую щель пролетел данный электрон?», то есть вопрос про

²³ Квантовая механика как бы надстраивается над классической физикой, существенным образом используя физические модели последней, изменяя их. В более ранний «классический» период этот прием не использовался, там новые разделы физики создавали свои собственные модели ПИО.

²⁴ Очень часто при изложении квантовой механики акцент делают, во-первых, на средних значениях, а не на распределении вероятностей, во-вторых, на положении частицы, хотя эти правила относятся к любой измеримой величине.

²⁵ Этот метод предполагает серии измерений взаимодополнительных величин (см.: [12; 13] и другие работы, указанные в [7]).

траекторию электрона. Но этот вопрос является неадекватным, в квантовой механике движение отдельного электрона описывается лишь вероятностно, и адекватной постановкой вопроса о траектории электрона будет вопрос о вероятности нахождения электрона в последовательные моменты времени t_1, t_2, t_3, \dots в точках пространства x_1, x_2, x_3, \dots . Однако в этой задаче может возникнуть ситуация, что соответствующие операторы (в нашем случае отвечающие за положение частицы) в разные моменты времени не коммутируют друг с другом, а тогда «стандартные алгоритмы квантовой теории непригодны для расчета» соответствующих многомоментных (в случае вопроса про щель двухмоментных) функций корреляции [6. С. 988]. Это одно из выражений утверждения об отсутствии траекторий у квантовой частицы. Другую сторону этого положения высвечивает рассуждение Н.Б. Делоне: «Длина волны де Бройля обратно пропорциональна скорости частицы, так что при большой скорости частицы... частица является практически точечной... Такая частица должна описываться законами классической физики. Этот вывод хорошо подтверждается фотографиями следов быстрых частиц» [3. С. 77–78]. Иначе говоря, если частица находится в таком состоянии, что мы можем зафиксировать ее траекторию, то мы не увидим дифракционно-интерференционной картины²⁶. Из корпускулярно-волнового дуализма, зафиксированного в постулатах Борна, следует, что летящий электрон взаимодействует с обеими щелями, но не может быть зафиксирован одновременно в двух щелях, в этом суть его корпускулярно-волнового поведения²⁷. Электрон с определенным импульсом движется как плоская волна (но это движение описывается вероятностно), а поглощается локально, как частица. Квантовая частица – корпускулярно-волновой объект нового типа, она ведет себя по-другому, поэтому к аналогиям с классической частицей надо относиться с большой осторожностью.

Другое яркое проявление корпускулярно-волнового поведения выявляет соотношение неопределенностей Гейзенберга для взаимодополнительных величин. Здесь важно понимать, что: во-первых, оно *теоретически выводится* из постулатов Борна и постулатов Шрёдингера, а во-вторых, оно является *свойством не измерения, а состояния*. Состояние, полностью описываемое волновой функцией, определяет распределение вероятностей для всех измеримых величин, включая взаимодополнительные.

Перечисленные выше постулаты Шрёдингера, Борна и квантования задают «теорфизическую» «интерпретацию» для одночастичных систем.

²⁶ Более строгая постановка задачи о вычислении распределения вероятностей возбуждения двух атомов в камере Вильсона пролетающей быстрой квантовой частицей рассмотрена в [11. С. 242].

²⁷ «Новая теория, которая связывает волновую функцию с вероятностями для одного фотона (в «состоянии поступательного движения»). – А.Л.) преодолевает эту трудность, считая, что каждый фотон входит отчасти в каждую из двух компонент (интерферометра. – А.Л.). Тогда каждый фотон интерферирует лишь с самим собой. Интерференция между двумя разными фотонами никогда не происходит» [5. С. 21].

4. Для многочастичных систем требуется добавить еще один постулат – *принцип тождественности квантовых частиц*, который определяет правила сборки многочастичных систем в квантовой механике. Из него следует «принцип Паули» для заполнения орбит электронов в атоме. Из него также следует наличие двух типов частиц – бозонов (фотоны) и фермионов (электроны, протоны, нейтроны), обладающих разными коллективными свойствами («статистиками»). Без него нельзя описать явления сверхпроводимости и сверхтекучести при низких температурах и многие другие многочастичные (коллективные) квантовые эффекты. Это холистский принцип. Из-за него система частиц не сводится к совокупности частиц²⁸. Ярким примером этого являются введенные в рассмотрение Эйнштейном, Подольским и Розеном (в их знаменитом «ЭПР-эксперименте») «перепутанные» состояния двух частиц, обладающие тем свойством, что, как бы далеко частицы ни разлетелись, их состояние остается двухчастичным и не сводится к состоянию двух независимых частиц²⁹. Учет этого, так же как и правильный ответ на первый пункт в табл. 1, приводит к разрушению ЭПР-парадокса, превращая его в неадекватную интерпретацию ЭПР-эксперимента.

Задав постулаты «теорфизической» «интерпретации», можно провести классификацию (и сравнение) указанных в начале трех «интерпретаций» по следующим трем пунктам.

Таблица 1

Три «интерпретации» квантовой механики

Интерпретация	Существует ли состояние квантовой системы объективно и независимо от измерения?	Является ли вероятностное описание отдельной микро-частицы принципиальным фактом квантовой механики?	Полна ли «новая» квантовая механика?
«Копенгагенская»	НЕТ	ДА	ДА
«Антикопенгагенская»	ДА	НЕТ	НЕТ
«Теорфизическая»	ДА	ДА	ДА

В заключение обратимся к «разоблачению» «парадоксов» квантовой механики, которых в «теорфизической интерпретации» нет. Во-первых, все они существуют только в рамках «копенгагенской» интерпретации, только при «копенгагенском» ответе на первый вопрос (который, кстати, противоречит их ответу на второй вопрос). Они рассыпаются, как только мы обращаемся к «теорфизическому» пониманию постулатов Борна, где один акт измерения ничего не говорит о состоянии. Другой причиной, которая приводит к парадоксам, в частности к «редукции (коллапсу) волновой функции», является редукция всего к физике в духе Лапласа (все состоит из частиц, поведение частиц подчиняется законам механики, следовательно, все может

²⁸ В многочастичных системах квантовой теории поля этот принцип проявляется в процедуре «временного упорядочения» в математическом слое.

²⁹ Классический волновой аналог – свет, проходящий через полупрозрачное зеркало: разность фаз двух лучей, распространяющихся в разные стороны, сохраняется, как бы далеко эти лучи ни разошлись.

быть сведено к механике). Только у Лапласа все редуцировалось к ньютоновской механике, у Шредингера – к квантовой механике, более новый вариант – к квантовой статистической механике. Но технические процедуры сравнения с эталоном, например измерение длины с помощью метра, есть не явление природы, а техническое действие [8; 9].

Заметим, что фон Нейман в своей теории измерений, где он вводит процедуру растворения прибора в теоретическом описании, справедливо фиксирует, что при таком анализе измерения обязательно есть «нерастворимый» в его процедуре «остаток», который не является предметом физической теории. Этот остаток он описывает по Маху, на языке восприятий, у Н. Бора по сути тот же остаток фиксируется как «необходимость использования классических приборов» (и языка), утверждение о «редукции (коллапсе) волновой функции», которое добавляется как *ad hoc* гипотеза, – другая форма фиксации этого остатка. В «теорфизической» интерпретации этот остаток, исходя из анализа того, что лежит в основе отличия физики от натурфилософии со времен Г. Галилея, представляет собой технические операции сравнения с эталоном, а технические операции не являются естественными явлениями и не описываются (без «нерастворимого остатка») физическими теориями и волновыми функциями. Поэтому в теорфизической интерпретации нет места ни для парадокса «кошки Шредингера», ни для «коллапса волновой функции». А раз нет проблемы, то нет и необходимости вводить ни особую роль наблюдателя, ни сознание, ни очень напоминающее шизофрению расщепление миров в «многомировой» интерпретации Эверетта. Как и предполагал Эйнштейн, квантовая механика – это физика, где нет места для особой роли наблюдателя или сознания. Специфика процедур измерения здесь сводится к указанной в постулатах Борна необходимости проводить длинную серию измерений.

Итак, я полагаю, что философские утверждения многих физиков, включая отцов квантовой механики, и особенно Н. Бора, касающиеся рефлексии квантовой механики, являются неадекватными. Неадекватной является и подобная рефлексия, выраженная семейством интерпретаций, объединенных под именем «копенгагенской» интерпретации, которая представляется мне внутренне противоречивой, ибо в ней второе положение не согласуется с первым (см. табл. 1). С другой стороны, если следовать указанному выше предложению Эйнштейна анализировать, что физики делают, а не что они говорят об этом, то вырисовывается четкая самосогласованная «теорфизическая» интерпретация свободная от парадоксов и «особой роли» сознания или наблюдателя. Базовым онтологическим объектом является здесь *квантовая частица*, которую надо воспринимать как новый онтологический физический объект, обладающий новыми непривычными свойствами корпускулярно-волнового и вероятностного поведения, задаваемого, в первую очередь, постулатами М. Борна. Этот объект, как и базовые («первичные») идеальные объекты других разделов физики, например классическая частица, служит строительным материалом для построения физических моделей явлений, это

полноценный онтологический объект, хотя и «неочевидный». Переход к «неочевидным» объектам в физике начинается с электромагнитного поля Максвелла, это характерная черта «неклассической» физики, обозначенной методологической революцией границы XIX–XX вв., состоявшей в переходе к неявному типу определения базовых понятий. Проблемы с пониманием квантовой механики связаны с этой «неочевидностью» и тем, что по старой привычке, адекватной «классической» физике XVII – первых третей XIX в., пытаются следовать устаревшему декартовскому принципу «очевидности» базовых понятий. Полагаю, что именно это стоит за известным утверждением Р. Фейнмана, что «квантовую механику никто не понимает». Однако неочевидность не следует отождествлять с непониманием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бор И. Избранные научные труды: в 2 т. М.: Наука, 1970–1971.
2. Де Бройль Л. Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. – М.: Мир, 1986.
3. Делоне Н.Б. Квантовая физика. – М.: Физматлит, 2004.
4. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. – М.: Наука, 1985.
5. Дирак П. Принципы квантовой механики. – М.: Наука, 1979.
6. Клышко Д.Н. Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения // Успехи физических наук. – 1998. – Т. 168. – № 9. – С. 975–1015.
7. Клышко Д.Н., Липкин А.И. О «коллапсе волновой функции», «квантовой теории измерений» и «непонимаемости» квантовой механики // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2000. – С. 736–785. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2000/053.pdf>.
8. Липкин А.И. Две методологические революции в физике – ключ к пониманию оснований квантовой механики // Вопросы философии. – 2010. – Вып. 4. – С. 74–90.
9. Липкин А.И. Основания физики. Взгляд из теоретической физики. – М.: УРСС, 2014.
10. Нейман фон И. Математические основы квантовой механики. – М.: Наука, 1964.
11. Шифф Л. Квантовая механика. – М.: Иностран. лит-ра, 1957.
12. Dunn T.J., Walmsley I.A., Mukamel S. Experimental Determination of the Quantum-Mechanical State of a Molecule Vibrational Mode Using Fluorescence Tomography // Phys. Rev. Lett. – 74 884 (1995).
13. Kurtsiefer Ch., Pfau T., Mlynek J. Measurement of the Wigner function of an ensemble of helium atoms // Nature. – 1997. – Vol. 386/13. – P. 150–153.
14. Peres A. What is a state vector? // Amer. J. of Physics. – 1984. – V. 52. – P. 644–650.

THE QUANTUM PARTICLE AND THE POSTULATES DETERMINING IT IN A “THEORPHYSICAL” INTERPRETATION

A.I. Lipkin (MIPT)

A system of postulates of quantum mechanics is done. It sets the foundation of quantum mechanics and defines the “quantum particle” with corpuscular-wave and probabilistic behaviour. The “quantum particle” sets the ontology of quantum mechanics. While in some respects it looks like a particle, in others respects it looks like a wave it is not confined to wave or particle. These postulates give “theoretical physics” “interpretation” of quantum mechanics, which is used by “working physicists” and is an alternative to both “Copenhagen” and “anti-Copenhagen” interpretations.

Key words: interpretation of quantum mechanics, foundations of quantum mechanics, postulates of quantum mechanics, ontology of quantum mechanics, the paradoxes of quantum mechanics, wave-particle duality, the «uncertainty relation», two slit experiment.

ТЕОРЕМА БЕЛЛА, ВЫЧИСЛИМОСТЬ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ И ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ЛОКАЛЬНОГО РЕАЛИЗМА

А.Д. Панов

*Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына*

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

С использованием явного контр-примера в статье показано, что, несмотря на формальную корректность теорем о невозможности скрытых переменных в квантовой механике, в основе квантового поведения может лежать динамика некоторого классического субстрата, обладающего свойствами локального реализма. Возможность введения такого классического субстрата в кажущемся противоречии с теоремами связана с упрощенной трактовкой понятия локальности в интерпретации теорем о невозможности скрытых переменных. В этих трактовках не учитывается относительность понятия локальности по отношению к делению физической реальности на слои, связанные друг с другом отношением субстрат-изображение. Показано, что квантовая механика может быть получена как изображение в локально-классическом субстрате и исследуются некоторые следствия этой возможности.

Ключевые слова: скрытые переменные, теорема Белла, локальный реализм, вычислимость, компьютер, субстрат, изображение, виртуальная реальность, слой реальности, относительность.

Введение

Теорема Белла о скрытых параметрах утверждает, что если квантовая динамика системы спинов в эксперименте Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР) управляется локальными скрытыми параметрами, то для величины корреляции измеренных проекций спинов на различные направления должны выполняться определенные неравенства, которые известны как неравенства Белла [1]. Так как эксперименты показывают, что неравенства Белла в действительности нарушаются, то на основании этого обычно делается вывод, что локальные скрытые параметры, как возможная онтологическая основа квантовой теории, исключаются наблюдениями: локальный реализм в квантовой теории невозможен. Мы покажем, что этот вывод, как минимум, нуждается в уточнении. Сначала будет построен явный контр-пример к теореме Белла, а затем мы внимательно изучим, что сделало возможным его появление и как должна быть уточнена формулировка теорем о невозможности скрытых параметров, чтобы этот пример не выглядел противоречием. Ключевым понятием, которое возникнет в этом анализе, является набор «слоев реальности», связанных друг с другом отношением субстрат-изображение. В заключительной части статьи будет дано некоторое исследование и развитие

этого понятия исходя из первоначального контр-примера к теореме Белла, где оно естественным образом и возникает.

Теорема Белла в виртуальной реальности

Для построения контр-примера к теореме Белла необходимо провести некоторую предварительную работу, с которой мы и начнем.

Под локальностью классических скрытых переменных, упоминаемой в теореме Белла, понимается следующее. Пусть над системами A и B проводятся измерения некоторых величин. Результаты измерений могут зависеть, во-первых, от условий проведения измерений над каждой из систем (например – от направления осей, для которых измеряются проекции спинов в ЭПР-эксперименте со спинами) и от возможных состояний некоторых скрытых переменных, которые характеризуют каждую из систем в отдельности (точнее, каждое измерение в отдельности, так как скрытые переменные могут относиться и к прибору). Обозначим совокупность всех таких локальных переменных, характеризующих измерения над системами A и B , соответственно a и b . Во-вторых, имеется некоторое общее причинное прошлое обеих систем, которое характеризуется некоторым набором параметров λ . Предположим, что измерения над системами производятся таким образом, что события, отвечающие этим измерениям, разделены пространственно-подобным интервалом, то есть информация о результатах измерения в одной системе не может повлиять на результаты измерения в другой системе за счет передачи сигналов со скоростью, не превышающей скорость света. Тогда переменные a и b называются локальными в том случае, когда результат измерения над системой A не может зависеть от параметров b системы B , и наоборот. Иными словами, результаты измерений описываются некоторыми функциями $A(a, \lambda)$ и $B(b, \lambda)$ (корреляции будут представляться интегралами от таких функций с некоторыми весами, имеющими смысл функций распределения по скрытым параметрам разного типа [1]), но функции вида $A(a, b, \lambda)$ и $B(b, a, \lambda)$ исключены.

Рассмотрим теперь обычный компьютер. Для простоты будем описывать состояние компьютера состоянием его памяти (в такое описание можно включить как оперативную память, так и состояние всех регистров процессора). Память компьютера представлена набором двоичных ячеек – триггеров, каждый из которых может рассматриваться как классическая система с двумя состояниями. Ячейки памяти компьютера представляют собой физические устройства, расположенные определенным образом в пространстве. Совершенно очевидно, что, с принципиальной точки зрения, можно произвести измерение состояния любых двух ячеек таким образом, что события измерений будут разделены пространственно-подобно (или будут даже просто одновременны в лабораторной системе), причем результат каждого измерения будет определяться исключительно состоянием измеряемой ячейки и результаты измерения над разными ячейками не влияют друг на друга. С фи-

зической точки зрения состояния триггеров компьютера являются типичным примером локальных переменных, причем эти переменные имеют чисто классический характер в том смысле, что результат измерения всегда определяется состоянием триггера совершенно однозначно. В данном случае можно говорить о наличии локального классического реализма, который и определяет онтологию системы «классический компьютер».

Математические задачи делятся на алгоритмически разрешимые и алгоритмически неразрешимые. Определенный класс задач называется алгоритмически разрешимым в том случае, когда для любой задачи из этого класса можно указать единый алгоритм, применяя который можно решить любую такую задачу. Хорошо известным примером алгоритмически разрешимой задачи является поиск наибольшего общего делителя двух произвольных целых чисел. Эффективным алгоритмом в этом случае является алгоритм Евклида. Алгоритмически разрешимые задачи можно решать с использованием компьютера без вмешательства человека, чисто механическим способом. К алгоритмически неразрешимым задачам относятся такие классы задач, для которых единого алгоритма для решения любой задачи из этого класса указать невозможно. Широко известным примером алгоритмически неразрешимой задачи является проблема существования решения для диофантовых уравнений общего вида. Эта задача известна как десятая проблема Гильберта, и в начале 1970-х гг. Юрий Матиясевич доказал алгоритмическую неразрешимость этой задачи [2].

Квантовая теория в математическом отношении является алгоритмически разрешимой теорией. Точнее говоря, поведение квантовой системы, предписываемое квантовой механикой, может быть предсказано со сколь угодно высокой наперед заданной точностью чисто алгоритмическим путем с использованием обычного, то есть классического, компьютера. Действительно, квантовая теория работает с тремя основными теоретическими объектами – состояниями, эволюцией состояний во времени и измерениями. Состояния квантовых систем задаются векторами гильбертова пространства. Вектор гильбертова пространства – хорошо понятный объект, который в компьютере может быть представлен с любой требуемой точностью даже в том случае, когда пространство состояний бесконечномерно. Вычисление эволюции квантовой системы сводится либо к решению задачи Коши для системы линейных дифференциальных уравнений, либо к умножению заданного вектора состояния на фиксированную унитарную матрицу. Обе эти задачи допускают алгоритмическое решение. Последним существенным ингредиентом квантовой теории является процедура измерения, которая предписывает, с какой вероятностью при измерении будут получаться разные значения наблюдаемых величин. Вычисление вероятностей сводится к вычислению скалярных произведений векторов гильбертова пространства, что опять-таки является алгоритмически разрешимой задачей. Вероятности можно не только вычислить, но с использованием вычисленных значений можно эмулировать процесс измерения. Для этого нужно симулировать вы-

численное распределение вероятностей, для чего можно использовать различные компьютерные датчики случайных чисел. Современные датчики случайных чисел позволяют генерировать неповторяющиеся последовательности чисел с нужными статистическими свойствами практически бесконечной длины, что делает их фактически неотличимыми от настоящих случайных чисел.

Теперь мы готовы к построению контр-примера к теореме Белла. С принципиальной точки зрения поведение любой квантовой системы может быть со сколь угодно высокой точностью промоделировано на обычном классическом компьютере. В частности, может быть промоделировано и поведение спиновых систем, нарушающих неравенства Белла, а также других квантовых систем, поведение которых существенным образом определяется так называемой спутанностью квантовых состояний (несепарабельностью) и возникающими отсюда квантовыми корреляциями, имеющими неклассический характер. В нашей статье [3] описана простая компьютерная модель измерения спинов для ЭПР-пары скоррелированных частиц, которая действительно приводит к нарушению неравенства Белла. С использованием классического компьютера можно в принципе исчерпывающим образом моделировать поведение любого квантового компьютера, и даже существуют стандартные программные пакеты для решения такого рода задач [4–7].

Вычислимость квантовой теории означает, что классический компьютер определенным эмерджентным образом может демонстрировать квантовое поведение, симулируя поведение квантовых систем. Если представить себе на минуту, что вместе с фрагментом квантового мира в компьютере был промоделирован и наблюдатель и при этом моделирование имеет достаточно совершенный характер, то такой наблюдатель не сможет обнаружить, что он является составной частью вычислительной модели и, в частности, не заподозрит, что наблюдаемое им квантовое поведение спиновых систем, нарушающее неравенства Белла, «ненастоящее». Конечно, трудно относиться серьезно к полному компьютерному моделированию наблюдателя (в действительности это невозможно в принципе в нашей Вселенной, см. ниже), но действительно можно построить компьютерные модели несложных приборов вместе с наблюдаемыми ими квантовыми системами, причем такие компьютерные модели приборов будут регистрировать квантовое поведение без всякого ущерба. Однако в основе этого наблюдаемого квантового поведения с полной очевидностью лежит работа обыкновенного компьютера, которая описывается в существенно локальных и классических терминах. Если, в частности, компьютер симулирует измерение спинов скоррелированной ЭПР-пары частиц, то неравенство Белла будет нарушено и ситуация может рассматриваться как контр-пример к теореме Белла: *состояние компьютера играет роль классических локальных скрытых переменных для квантовой динамики спинов, симулируемой этим компьютером*, в то время как теорема Белла для динамики скоррелированных спинов исключает локальный реализм. Что же является причиной возникшего противоречия?

Заметим сразу, что тривиальное разрешение парадокса на основании того, что симулированное квантовое поведение не является «настоящим» квантовым поведением, не проходит. В тщательно симулированной квантовой системе присутствуют все необходимые ингредиенты, которые предусмотрены теоремой Белла. В ней должно быть определено симулированное пространство-время, обладающее лоренцевой причинной структурой, поэтому есть и хорошо определенное понятие локального реализма. Для этого пространства-времени определены все необходимые волновые функции, его населяют некоторые симулированные приборы, проводящие измерения над симулированными квантовыми системами. Если нечто во всех отношениях ведет себя как квантовая система, то оно и должно считаться квантовой системой, по крайней мере с операциональной точки зрения. В теореме Белла ведь ничего не говорится о природе пространства-времени и других объектов, имеющих отношение к делу, объекты не разделяются на «настоящие» и «ненастоящие». Используются только свойства объектов, а с этим в тщательно симулированной компьютерной модели все в порядке. Причину возникновения противоречия (лучше сказать – парадокса) надо искать глубже. Попробуем разобраться.

Обычный классический компьютер представляется системой локальных классических параметров, с этим спорить невозможно. Но он представляется системой таких параметров с нашей, человеческой точки зрения, внешней по отношению к виртуальной реальности, симулируемой компьютерной программой. Компьютерная программа создает свою собственную реальность, и пространство-время, которое существует в этой реальности, не совпадает с нашим пространством-временем. Возникающее в виртуальной реальности понятие локального реализма не имеет отношения к локальности физических состояний компьютера, моделирующего эту реальность. Имеют место два разных слоя реальности, для каждого из которых отдельно определено свое понятие локального реализма: *мы имеем в наличии два разных локальных реализма*. В рассматриваемом контексте один слой реальности мы склонны называть физическим, а другой – виртуальным. Теорема Белла, примененная к виртуальной квантовой динамике, будет утверждать невозможность локального реализма относительно виртуального же пространства-времени, но она полностью игнорирует тот факт, что реальной *онтологической* основой виртуального квантового поведения в рассмотренном примере является локальная классическая динамика ячеек памяти компьютера.

Чтобы построенный пример не выглядел противоречием с теоремой Белла, формулировка теоремы должна быть уточнена. Именно теорема должна утверждать, что невозможны скрытые параметры, обладающие свойством локальности *относительно* того же слоя реальности, в котором находятся и рассматриваемые квантовые системы. Теорема вовсе не запрещает того, что квантовая реальность сама имеет смысл *изображения* в субстрате, обладающем свойствами и классичности и локальности – именно таким способом связана виртуальная реальность симуляции с классической

реальностью компьютерного субстрата. Подчеркнем, что, несмотря на возникающие здесь довольно странные формулировки, связанные с введением во обиход различных слоев реальности, тут нет никаких домыслов и спекуляций – все это основано не только на вполне реалистичных примерах, но даже на реально работающих компьютерных программах.

Выше курсивом было выделено слово *относительно*. И это очень важно. Понятие локального реализма имеет относительный характер: должно быть явно указано, относительно какого слоя реальности он рассматривается. То, что в одном слое реальности является локальным реализмом, в другом слое реальности может не обладать этим свойством и может оказаться чем-то совсем иным. Как это получается, можно, в частности, проследить на примере упоминавшейся уже простой компьютерной программы, симулирующей измерение над ЭПР-парами из статьи [1].

В упомянутой программе имеется две системы A и B , представляющие частицы со спинами $\frac{1}{2}$. Готовится начальное синглетное состояние объединенного спинового состояния двух частиц (полный спин равен нулю) и затем симулируются измерения спинов этих частиц на различные направления. Результаты измерений зависят от трех параметров: направлений осей a и b , относительно которых измеряется проекция спинов частиц A и B соответственно, и значения генератора случайных чисел λ , который используется для симуляции действия проекционного постулата в квантовом измерении. Локальный реализм означал бы, что результат измерения определяется через некоторые функции $A(a, \lambda)$ и $B(b, \lambda)$, характеризующие отдельно измерения над частицами A и B . Действительно, похожие функции возникают в программе, но только они имеют вид $A(a, b, \lambda)$ и $B(b, a, \lambda)$, то есть указывают на явное влияние систем друг на друга и нарушение принципа локальности. С точки зрения симулированной виртуальной реальности направление оси a каким-то «мистическим» образом влияет на процессы в неопределенно отдаленном месте, где располагается частица B , и наоборот. Между тем на уровне компьютерного аппаратного обеспечения все величины a, b, λ – всего лишь физические состояния ячеек памяти, имеющих вполне определенную локализацию в пространстве и времени и точно соответствующих онтологии локального реализма. Таким способом локальный реализм аппаратного обеспечения преобразуется в нелокальную физику на уровне виртуальной реальности: что является локальным в одной реальности, не является локальным в другой.

То, что физическая локальная структура компьютера с концептуального уровня выполняемой на нем программы в общем случае недостижима и не имеет для программы никакого значения, можно понять из самых общих соображений. Действительно, работа любого вычислительного устройства в принципе эквивалентна работе некоторой машины Тьюринга (тезис Черча–Тьюринга), и логическая структура машины Тьюринга представляет максимально детальный уровень реальности для выполняемой на ней программы. Но даже в самое детальное описание машины Тьюринга не входят никакие

пространственно-временные характеристики локализации этого механизма, поэтому они оказываются за рамками «реальности», доступной программе. Действительно, машины, имеющие различную пространственно-временную организацию и работающие на разных принципах, могут выполнять одну и ту же программу (представлять одну и ту же машину Тьюринга). По отношению к структуре виртуальной реальности, реализуемой программой, физические характеристики компьютера не играют роли.

Физическая квантовая теория на классическом субстрате

Возможность существования различных слоев реальности не является ни философской гипотезой, ни тем более фикцией, так как примеры реализации этой возможности даны. Эти примеры могут показаться банальными, если бы не следствия, которые можно отсюда получить.

До сих пор мы имели всего два слоя реальности: слой виртуальной реальности компьютерной программы и слой «физической реальности» компьютерного аппаратного обеспечения. Однако чисто логически ниоткуда не следует, что этим все и ограничивается. В точной аналогии и подобно тому, как квантовая динамика, симулируемая компьютерной программой, является эмерджентным проявлением классического локального реализма триггерных схем компьютера (а в этом сомневаться не приходится), наблюдаемая нами в экспериментах квантовая динамика «физического уровня реальности» в принципе может быть эмерджентным проявлением некоторой более глубокой классической, и локальной реальности. Представленные примеры вполне доказывают логическую возможность такой ситуации. Иначе говоря, реальная квантовая динамика может иметь смысл изображения, построенного на некотором скрытом от нас субстрате, который может обладать свойствами как классичности, так и локальности. Это положение дел можно образно описать еще так: если соотношение неопределенностей возникает на уровне атома, то это вовсе не означает, что оно является вездесущим на всех более глубоких уровнях физического описания. Экспериментальные наблюдения нарушения неравенств Белла и теоремы квантовой механики о невозможности классических локальных скрытых переменных вовсе не закрывают локальный реализм на более глубоком онтологическом уровне, так как эти теоремы относятся только к реальности нашего «текущего» физического уровня. Так что распространенное убеждение, что в основе квантового поведения не может лежать классический локальный реализм, основано на упрощенном понимании локального реализма как чего-то, имеющего абсолютный характер.

Подумаем о возможной природе этой более глубокой реальности, предполагая, что можно отнестись серьезно к ее существованию.

Прежде всего, нужно признать, что рассмотренные выше примеры, связанные с симуляцией квантовой динамики в компьютерных вычислительных моделях, были лишь «лесами», которые позволили психологически наиболее

простым способом прийти к выводу о возможности реализации квантовой динамики как изображения в классически-локальном субстрате. В действительности имеются и другие способы построения такого изображения. Например, динамика волновой функции во времени может быть просто записана на внешний классический носитель информации, и эта вполне локально-классическая и к тому же статическая запись тоже адекватно представит квантовую динамику, так как симуляция во времени и эта статическая запись находятся попросту во взаимно однозначном соответствии. Можно представить себе, что такой текст порожден просто записью последовательных состояний компьютера, который действительно симулировал квантовую динамику, но делать это совсем не обязательно. Запись может иметь произвольное происхождение и важно только, что эволюция квантовой волновой функции действительно может быть представлена текстом на классическом носителе информации (факт соответствия записи некоторой реальной квантовой эволюции всегда можно проверить). Таким образом, имеется целый класс разных возможностей представления квантовой динамики как изображения в локально-классическом субстрате. Далее можно рассмотреть некоторую смесь обеих рассмотренных возможностей, или, для разнообразия, можно представить себе не символьную запись, а аналоговую, наподобие записи звука на магнитной ленте. Кстати, и компьютерная симуляция не обязана быть цифровой, вполне можно представить себе симуляцию аналоговым, но классическим компьютером. Все это не меняет существа дела.

Хотя мы пришли к выводу о логической возможности локально-классического субстрата для квантовой динамики, рассматривая вычислительную симуляцию и представление записью на классическом носителе информации, но реальный локально-классический субстрат квантовой теории, если такой существует, не обязан быть похож ни на то ни на другое. Примеры демонстрируют только логическую возможность классически-локального субстрата, но ничего сверх этого. Более того, слишком прямолинейная аналогия с нашими примерами имеет неприятные следствия.

Если попытаться представить себе, что наш квантовый мир является реальной симуляцией в некотором классическом автомате или «статической» записью в локально-классическом субстрате, то придется принять предположение о существовании какого-то совершенно необъятного пространственного вместилища для такого рода устройств или носителей информации. Действительно, даже для того, чтобы просто записать с разумной точностью волновую функцию электронной оболочки всего одного многоэлектронного атома, например атома урана, не хватит объема всей видимой Вселенной, даже если по одному биту информации размещать в каждой планковской ячейке пространства. Конфигурационное пространство для 92 электронов оболочки урана имеет размерность $92 \times 3 \times 2 = 552$ (при нерелятивистском описании с учетом спина электронов), и если потребовать хотя бы по 1000 узлов координатной сетки вдоль каждой координаты для записи волновой функции, то потребуется память объемом в $1000^{552} = 10^{1656}$ комплексных чисел. В

то же время в видимой части Вселенной содержится всего порядка 10^{153} планковских ячеек пространства (каждая размером 10^{-33} см). Как видно, не хватает еще около полутора тысяч порядков. По этой причине наши реальные классические компьютеры, хотя и, действительно, могут симулировать динамику квантовых систем без всякого ущерба, но очень сильно ограничены в смысле сложности квантовых систем, которые могут быть промоделированы с исчерпывающей точностью. Например, как уже упоминалось выше, квантовые компьютеры могут быть симулированы классическими компьютерами, но только очень небольшие квантовые компьютеры – содержащие не более примерно 30 кубит квантовой памяти. Можно, конечно, представить себе очень высокую размерность такого «пространственного вместилища», но подобные шаги кажутся уже несколько искусственными.

Таким образом, если локально-классический субстрат нашего квантового мира и существует, то вряд ли локальность в нем может быть понята примитивно-пространственным образом. Но тогда неизбежно возникает вопрос, почему то понятие локальности, которое заменяет обычную пространственно-временную локальность, вообще следует считать локальностью, а не чем-то еще. Как отвечать на этот вопрос, неясно, так как мы пока не имеем ни одного конкретного примера реализации такого «локально-классического» субстрата для реального квантового мира. Вероятно, ответ на вопрос может быть связан со степенью естественности соответствующего понятия «локальности», но это уже область чистых спекуляций, не представляющая для нас интереса.

Важно здесь другое. Придя к представлению об онтологически более глубоком уровне реальности, для которого физический квантовый мир есть некоторый сорт изображения в соответствующем субстрате, мы видим, что этот субстрат в принципе может иметь в определенном смысле локально-классический характер (и в этом смысле теорема Белла о скрытых параметрах в своей исходной формулировке неверна), но вовсе не обязан быть именно таким. Интересная возможность состоит в том, что субстрат может обладать чертами классичности, но не локальности. В частности, он может гораздо больше напоминать абстрактную математическую структуру, чем физическую систему, размещенную в некотором подобии пространства. В этом случае упомянутый выше неприятный вопрос о «вместилище» для существования такой чудовищно сложной структуры автоматически снимается, так как соответствующая мода существования имеет в каком-то смысле полностью внепространственный характер, никакого «места» для нее не требуется.

На что может быть похоже такое внепространственное существование, указывает одна интересная аналогия. Рассмотрим какой-нибудь математический объект, который характеризуется значением, которое можно вычислить. Например, это может быть значение некоторого выражения или что-то более сложное, вроде истинностного значения утверждения, имеющего форму теоремы. Доказать теорему и означает вычислить истинностное значение, соответствующее ее утверждению. Для определенности рассмотрим триллион-

ный десятичный знак в разложении корня из двух, обозначив его d . Эта величина представляет собой цифру от 0 до 9, никому в настоящее время неизвестную и нигде физически не зафиксированную. Как физического объекта этой вещи в природе нет. Тем не менее можно утверждать, что кто бы ни взялся сосчитать d , и какой бы метод он ни использовал, результат у всех будет один и тот же, так как эта величина существовала до и независимо от того, кто и когда вознамерился ее вычислить. Величина d существует объективно, хотя это существование никаким очевидным образом нельзя привязать к какому-нибудь определенному месту, оно не имеет никакой локализации. Утверждение об объективном существовании объекта d отнюдь не является ни эвристической гипотезой, ни философским постулатом, так как оно является фальсифицируемым в смысле Поппера. Действительно, достаточно предъявить два правильных вычисления d с различными результатами, и объективное существование d будет фальсифицировано (этот круг вопросов подробно обсуждается в нашей статье [8]). Заметим также, что правильность вычисления не является предметом чьего-то субъективного мнения, так как ответ на этот вопрос является в принципе алгоритмически разрешимой задачей – он может быть получен чисто механическим способом.

Таким образом, объективное существование чего-то не предполагает непременно, что это существование протекает во времени и пространстве «масс-энергетическим способом». Примерно так может существовать и классический, но нелокальный субстрат, в котором наш реальный физический квантовый мир может быть построен как изображение. Таким образом, такой субстрат может больше напоминать абстрактную математическую структуру, чем «вещь» в физическом смысле.

Аналогию с абстрактной математической структурой можно еще более усилить. Покажем, что структура математики обладает определенными чертами «классичности».

Вычисление в математике является аналогом измерения в физике. Значение введенного выше объекта d нам было сначала неизвестно, но, вычислив его, мы можем его найти. Это действительно очень похоже на измерение: для измерения в физике нужно выполнить некоторую предписанную процедуру, после чего мы получаем значение наблюдаемой; в математике тоже нужно выполнить некоторую предписанную процедуру (алгоритм), что приводит к значению искомой величины. Чисто внешне кажется, что эти процедуры в физике и в математике сильно различаются, но это в значительной степени иллюзия. Вычисление всегда выполняется с использованием некоторого физического устройства, которым может быть компьютер, но может быть, конечно, и наш мозг. То есть вычисление вполне можно рассматривать как определенный сорт физического эксперимента. А если мы захотим разложить очень большое целое число на простые множители с использованием квантового компьютера (по-другому это сделать и невозможно), то наше «вычисление» и, правда, будет иметь вид сложного физического эксперимента: вакуумные камеры, сверхнизкие температуры и т.д. (так вы-

глядят современные прототипы квантовых компьютеров). Между физическими измерениями и математическими вычислениями нет пропасти.

Введенные таким способом математические «измерения» имеют классический характер в том смысле, что они не меняют значение «измеряемой» (вычисляемой) величины. В этом смысле они вполне аналогичны измерениям классической физики, а вся обыкновенная математика тем самым наделяется чертами классичности. Ни из каких априорных соображений не следует, что именно так оно обязательно и должно было быть. Существованию стабильного математического мира можно только порадоваться и удивиться. Вполне можно себе представить абстрактные миры, подобные миру математики, но не обладающие свойством классичности в определенном выше смысле. Это может быть немного похоже, например, на абстрактные миры субъективных переживаний, где попытка проследить за мыслью немедленно приводит к изменению самой мысли.

Таким образом, классический, но нелокальный «физический» субстрат квантовой теории может оказаться в чем-то похожим просто на абстрактную математическую структуру. Если бы мы стали настаивать на том, что это в точности и есть математическая структура, то пришли бы к неожиданному выводу, что весь квантовый мир просто тождествен своему собственному математическому представлению или может рассматриваться как математический образ, имеющий объективное, но «абстрактное» существование, подобно способу существования триллионного знака в разложении корня из двух. *It from Bit* по Джону Арчибальду Уилеру. Однако нет никаких оснований настаивать на том, что это именно так. Пример с компьютером и генерируемой им виртуальной реальностью показывает, что связь между квантовой физикой и возможным субстратом может быть и гораздо более «физической». Реальная картина может оказаться довольно сложной: субстрат может иметь и некоторые черты абстрактной математической структуры, и некоторые черты физического объекта. Все это указывает на то, что искомая «окончательная физическая теория» (если вообще можно о такой говорить) может не оказаться именно *физической* теорией в собственном смысле слова. Это заставляет также с очень большой осторожностью принимать чисто абстрактную природу обыкновенной математики. Уже рассмотренные выше примеры показывают, что и в обычной математике есть очень много физического (см. также [9]). Возможно, на очень глубоком онтологическом уровне связь физики и математики гораздо теснее, чем это выглядит с более высоких этажей онтологии, или даже физика и математика и вовсе произрастают из единого корня, который сам не является ни тем ни другим. Физика и математика могут оказаться просто двумя разными сторонами или двумя различными пределами одной сущности. Не с этим ли связана «непостижимая эффективность математики в естественных науках» [10]?

Хотя до сих пор к понятию слоев реальности нас вела возможность введения скрытой локально-классической или просто классической онтологии для квантовой теории, следует отметить, что более глубокие онтологические

слои реальности с логической точки зрения могут не обладать свойствами ни классичности, ни локальности, но быть либо квантовыми, либо и вовсе иметь структуру, не имеющую отражения в современном научном языке. Классичность и локальность – это только некоторые из разрешенных возможностей. Как это, может быть, легко представить себе на основе следующего примера.

Предположим, универсальные квантовые компьютеры уже построены (их пока нет, но когда-нибудь они появятся). Тогда с использованием квантового компьютера легко можно будет создавать симуляцию любых квантовых систем. Это сделать значительно проще, чем с использованием классических компьютеров. Возникает ситуация, когда одна квантовая система является изображением в квантовом субстрате, отличном от самой системы. Точно так же квантовая динамика нашей физической реальности может быть изображением в субстрате некоторой скрытой, но тоже квантовой реальности.

В современной теоретической физике можно найти многочисленные намеки на появление структур, весьма напоминающих расслоение реальности, о котором шла речь выше. Такие построения наиболее характерны для ряда направлений в квантовой гравитации (хороший критический обзор основных современных направлений квантовой гравитации дан в статье [11]), но не только. В квантовой гравитации в настоящее время разрабатывается несколько направлений; есть ли среди них хотя бы одно «правильное» – неизвестно, тем не менее можно выделить ряд характерных идей. В большинстве случаев пространство-время, как дифференцируемое многообразие, возникает в этих теориях как эффективное эмерджентное проявление некоторой пра-структуры в результате определенной предельной процедуры, которая в разных теориях может иметь разный смысл. Это несколько напоминает связь типа субстрат-изображение, которая рассматривалась выше. Сама эта пра-структура в разных теориях может быть устроена очень разными способами. В ряде теорий – петлевая квантовая гравитация, причинные множества, триангуляции разного типа и некоторые другие – пра-структура имеет чисто комбинаторную математическую природу и помещается, вообще говоря, вне какого-либо «пространственного» многообразия. Это очень похоже на тот рассмотренный выше вариант субстрата, который был похож на абстрактную математику.

Другой характерный пример представляется теорией струн (которая тоже является одним из вариантов квантовой гравитации). В этой теории изначально, на эвристическом уровне, имеется понимание, что на масштабах планковской длины и времени пространство-время не является гладким многообразием, но подвержено квантовым флуктуациям, а гладкое многообразие получается только на больших масштабах путем их усреднения. Тем не менее построение теории начинается с фиксации гладкого статического пространственно-временного фона, в котором и рассматривается движение одномерных объектов – струн. Важно четко понимать, что этот гладкий статический фон не есть реальное физическое пространство, которое должно

быть динамическим и подверженным квантовым флуктуациям. Так как этот фон обычно считается многомерным [10; 11], то часто можно встретить утверждение, что в теории струн физическое пространство многомерно. С этим утверждением трудно согласиться, так как многомерность относится к статическому фону теории струн, но вовсе не к реальному физическому пространству. Чтобы понять, что есть в теории струн реальное физическое пространство, нужно построить полную динамическую теорию движения и взаимодействия струн в этом статическом фоне, найти так называемые когерентные состояния, и только анализ структуры этих состояний покажет, что есть физическое пространство-время. До этого, судя по всему, еще очень далеко. Статическое же фоновое пространство-время теории струн очень напоминает субстрат некоторой скрытой реальности, причем субстрат, имеющий характер классического многообразия, снабженного локальностью благодаря определенной на нем причинной лоренцевой структуре. Это сильно отличает субстрат теории струн от чисто комбинаторного субстрата петлевой гравитации и некоторых других теорий. Таким образом, среди современных теорий квантовой гравитации можно обнаружить использование объектов, напоминающих обсуждавшиеся выше субстраты скрытых реальностей, причем всех основных типов – от локально-классических до чисто комбинаторных, абстрактно-математических. Надо, правда, отметить, что аналогия здесь, все-таки, не вполне прямая: например, в петлевой квантовой гравитации ведущую роль играют не сами фундаментальные комбинаторные структуры (на самом деле – так называемые помеченные графы), а амплитуды переходов между такими структурами и т.д.

Слоеный пирог реальностей

Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть наш обыкновенный классический компьютер моделирует некоторую виртуальную реальность. Она может быть и квантовой, и классической, – сейчас это не имеет значения. Генерированная реальность может быть настолько богатой, что в ней может быть создан виртуальный компьютер. Запрограммируем теперь эту виртуальную машину тоже на генерирование виртуальной реальности. Эта новая виртуальная реальность может не иметь никакого отношения к виртуальной реальности более низкого уровня, но снова может быть настолько богатой, что в ней опять можно построить виртуальный компьютер еще более высокого уровня. И так далее. В этом квазиреалистичном примере возникает целый многоуровневый сэндвич из различных реальностей, причем они могут иметь различную природу и характеризоваться различными типами локальности или отсутствием таковой. Этот пример показывает, что многослойная реальность с различными типами локальности в слоях логически возможна, поэтому нельзя исключить, что подобная многослойная структура свойственна и нашему реальному миру. Наблюдаемая физическая реальность является в этой модели верхним слоем физического слоеного пи-

рога реальностей и имеет характер изображения по отношению к предыдущему слою. Все другие слои связаны между собой подобным же образом. Как теперь понятно, мы сами имеем возможность строить над слоем физической реальности – над нашим «текущим» слоем – новые и новые слои реальности с использованием компьютерного моделирования. Подчеркнем, что пока нам неизвестны какие-либо надежные указания на то, что такая многослойная квантово-классическая структура под физической реальностью действительно имеет место, но с чисто логической точки зрения такая возможность определенно существует, это показывает рассмотренный компьютерный пример. Таким образом, в основе онтологии квантовой теории может лежать многослойная структура, содержащая, быть может, также и слои, характеризующиеся классичностью и локальным реализмом. Это еще более меняет представление о возможной природе «окончательной теории».

Познаваемость субстрата квантовой теории

Последний вопрос, который мы здесь затронем, связан с потенциальной познаваемостью классической локальной или какой-нибудь иной реальности, лежащей в основе квантовой теории, если таковая действительно существует. Здесь полезна аналогия. Предположим на минуту, что классический компьютер моделирует квантовый мир, в котором имеются, в том числе, и наблюдатели. Как уже упоминалось, даже самые скрупулезные поиски не смогут завести этих наблюдателей дальше, чем логическая структура машины, лежащая в основе симуляции. Физическая структура машины лежит вне пределов досягаемости для наблюдателей, живущих в модельной реальности. Но, изучив логическую структуру машины, наиболее прозорливые из наблюдателей могут догадаться, что эта структура существует неспроста и что за ней стоит некоторый физический агент, о строении которого могут быть сделаны разумные предположения. На основе этих предположений могут быть сделаны и предсказания, которые могут быть проверены путем исследования логической структуры симулятора. В этом смысле физическая природа компьютера, в котором существует эта квантовая симуляция с наблюдателями, для симулированных наблюдателей, по крайней мере частично, может быть познаваема. Во всяком случае, они могут выдвигать о ней обоснованные гипотезы и проверять их следствия. Точно так же, онтология более глубокой реальности, которая, быть может, лежит в основании физического квантового мира, может быть частично познаваема для нас, даже если она окажется недоступна прямым наблюдениям. Если, однако, этот субстрат сам является только поверхностью многослойной структуры, как это обсуждалось в предыдущем разделе, то в слои, не соседствующие непосредственно с нашей физической реальностью, нашему разуму проникнуть будет очень трудно. Это может положить абсолютный предел человеческому познанию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гриб А.А.* Неравенства Белла и экспериментальная проверка квантовых корреляций на макроскопических расстояниях // УФН. – 1984. – Т. 142. – С. 619–634.
2. *Матиясевич Ю.В.* Десятая проблема Гильберта. – М.: Наука, 1993.
3. *Панов А.Д.* Технологическая сингулярность, теорема Пенроуза об искусственном интеллекте и квантовая природа сознания. Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2014. – № 5. – М.: Изд-во «Новые технологии».
4. *Juliá-Díaz B., Burdis J.B., Tabakin F.* QDENSITY – A Mathematica quantum computer simulation. arXiv: quant-ph/0508101. 2005.
5. *Juliá-Díaz B., Burdis J.B., Tabakin F.* QDENSITY – A Mathematica quantum computer simulation. Computer Physics Communications. – 2009. – V. 180. – P. 474.
6. *Tabakin F., Juliá-Díaz B.* QCMPI: A parallel environment for quantum computing. Computer Physics Communications. – 2009. – V. 180. – P. 948–964.
7. *Tabakin F., Juliá-Díaz B.* QCWAVE – A Mathematica quantum computer simulation update // Computer Physics Communications. – 2011. – V. 182. – P. 1693–1707.
8. *Панов А.Д.* Природа математики, космология и структура реальности: объективность мира математических форм // Космология, физика, культура / под ред. В.В. Казютинского. – М.: ИФ РАН, 2011. – С. 191–219.
9. *Панов А.Д.* Природа математики, космология и структура реальности: физические основания математики // Метавселенная, пространство, время / под ред. В.В. Казютинского. – М.: ИФ РАН. 2011. – С. 74–103
10. *Вигнер Е.* Непостижимая эффективность математики в естественных науках // УФН. – 1968. – Т. 94. – Вып. 3. – С. 535–546.
11. *Smolin L.* How far are we from the quantum theory of gravity? arXiv:hep-th/0303185. 2003.

BELL'S THEOREM, THE CALCULABILITY OF THE QUANTUM THEORY AND THE RELATIVITY OF LOCAL REALISM

A.D. Panov

It is shown with use of an explicit counterexample that, despite a formal correctness of the theorems of impossibility of hidden variables in quantum mechanics, dynamics of some classical substratum possessing properties of the local realism can be a basis of quantum behavior. The possibility of introduction of such classical substrate in the seeming contradiction with theorems is related to the simplified treatment of concept of locality in interpretations of the theorems of impossibility of the hidden variables. In these treatments the relativity of concept of locality in relation to division of physical reality into the layers related to each other by the relation a substrate-image is not considered. It is shown that the quantum mechanics can be obtained as an image in a local and classical substratum and some consequences of this opportunity are investigated.

Key words: hidden variables, Bell's theorem, local realism, computability, computer, substrate, image, virtual reality, reality layer, relativity.

МОДАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ В МЕТАФИЗИКЕ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

В.Э. Терехович

Санкт-Петербургское онтологическое общество

В нескольких интерпретациях квантовой механики используются понятия возможных состояний или возможных траекторий. Исследуется возможность сопоставления этих интерпретаций с метафизическими концепциями перехода от потенциального существования к актуальному. Анализ проводится на примере дискуссии в современной аналитической метафизике модальностей. Рассмотрены аналогии между концепцией Лейбница о стремлении к существованию соревнующихся возможностей, волновой механикой Шредингера и интегралом по траекториям Фейнмана.

Ключевые слова: метафизика модальностей, интерпретации квантовой механики, возможные квантовые состояния, возможное существование.

Введение

В ряде интерпретаций квантовой механики (далее КМ) состояния и истории частиц прямо сопоставляются с возможностями [8; 37; 47; 52; 56; 65; 75]. В других интерпретациях КМ модальные понятия возможного и актуального существования часто неявно подразумеваются, хотя авторы не уделяют им специального внимания. По словам Дж. Баба, задним числом большое количество традиционных интерпретаций квантовой теории можно охарактеризовать как модальные интерпретации, в частности, это относится к интерпретациям Дирака – фон Неймана, Бора и Бома [48]. Причина такой популярности метафизической модели разделения реальности на возможную и актуальную сферы заключается в том, что она существенно облегчает разговор о необычных квантовых явлениях. Например, квантовую вероятность удобнее относить не к множеству совершившихся актуальных событий, как в статистической физике, а к возможным исходам эволюции одиночного квантового объекта. При рассмотрении суперпозиции альтернативных, а значит, несовместимых в классическом мире состояний, гораздо удобнее называть их возможными состояниями. Соответственно, квантовый мир или миры можно представлять в разных интерпретациях или как наборы возможных состояний (историй) квантовых частиц (полей), или как возможные утверждения о них; тогда как мир классических объектов и однозначно необходимых законов удобно называть актуальным. Разведение реальности на две сферы позволяет ослабить остроту противоречий в квантовых явлениях с привычными представлениями о природе, подчиняющейся принципу причинности и принципу исключенного третьего. К примеру,

Гринштейн и Зайонц [10. С. 205] говорят о квантовой суперпозиции как о сосуществовании возможностей, при котором возможна интерференция, тогда классическая картина смешанных состояний представляется как совокупность действительных состояний, для которых интерференция невозможна.

Известно, что возможный и актуальный модусы реальности являются предметом изучения нескольких областей философии, однако для построения физических моделей современные специалисты часто используют понятия «возможное» и «актуальное» интуитивно, без должной критики, иногда даже в бытовом смысле. И действительно, мы редко задумываемся, что означает концепция перехода возможного существования в актуальное и на каком основании произошло ее заимствование из философии. Постепенно сложилась ситуация, когда использование достижений философии отдается на откуп личным пристрастиям конкретных специалистов, защищающих ту или иную интерпретацию КМ³⁰. Можно предположить, что это вполне закономерный результат, поскольку цель интерпретации любой научной теории состоит не только в том, чтобы придать физический смысл ее моделям, понятиям и математическим символам, но и объяснить, какие из ее объектов являются фундаментальными, а какие нет, и как все они связаны с реальностью и наблюдателями³¹.

Основные разделы философии, которые занимаются проблемами реальности, в том числе возможной реальности, это онтология и метафизика³². Метафизика в современной аналитической философии занимается вопросами бытия и небытия, существования и реальности, универсалий и индивидуальностей, возможности и актуальности, бытия Бога, причинности и свободы воли, материи и сознания, пространства и времени [67]. Первые четыре пары проблем часто объединяют в рамках онтологии. Области философии, изучающие возможный и актуальный модусы реальности, иногда называют модальной онтологией или метафизикой модальностей, где под модальностями понимают возможность (может быть), невозможность (не может быть), необходимость (не может не быть) и случайность (может быть или не быть).

Тема возможной реальности имеет богатую историю в философии [5; 16; 29]. Если онтология – это скорее наука о сущем как сущем, о самых общих и абстрактных принципах бытия, то современная метафизика, особенно в рамках аналитического подхода, больше интересуется проявлениями сущего в конкретных вещах и явлениях. Особую популярность метафизика

³⁰ Описание некоторых таких попыток см. в [22; 23; 9. С. 129; 80].

³¹ О роли моделей и интерпретаций в науке см.: [30; 59].

³² Эти понятия часто воспринимаются как синонимы. В российской и европейской континентальной философской традиции термин метафизика используется больше в историческом контексте. Англоязычная аналитическая философия первоначально отрицала метафизику, но, в конечном счете, вернулась в ней как области познания структуры и содержания реальности путем анализа того, как мы об этой реальности говорим (см. [20; 67]).

модальностей приобрела с начала 1970-х гг. прошлого века, когда была разработана семантика возможных миров для модальных логик [61; 62]. Одними из центральных тем в современной метафизике стали проблемы возможного и актуального существования вещей или событий, чистых возможностей (*possibilia*) и возможных миров [39; 43; 82]. В метафизике модальностей, кроме прочего, изучается разница между понятиями «быть», «существовать» и «быть актуальным»; выясняется, почему только некоторые возможные события становятся актуальными и что происходит с нереализованными возможностями. В теориях возможных миров исследуется вопрос, как миры связаны друг с другом и с актуальным миром или мирами [4; 41; 42; 54; 58; 64]. Отдельная дискуссия посвящена различению типов возможности и необходимости [58; 78]. Ряд авторов рассматривает связь вероятностной причинности с теорией пропензетивности как реализации предрасположенностей или диспозиций [11; 72; 75].

Существует несколько способов использования достижения современной метафизики в конкретных науках [70]. Согласно реалистическому подходу, метафизика говорит нам не о том, что существует на самом деле, а о том, что может существовать, но пока не обнаружено в наблюдениях (а возможно, и не может быть обнаружено), или о том, что может стоять за наблюдениями. С точки зрения прагматического подхода, специалист по метафизике изучает текущую ситуацию в физике, и на основе анализа прежних достижений философии выдвигает и сравнивает гипотезы, наиболее подходящие в данный момент, при этом он ни на чем не настаивает. В этой статье мы воспользуемся прагматическим подходом и попытаемся сравнить представления о возможностях в некоторых интерпретациях КМ с концепциями модальностей в метафизике.

Структура статьи следующая. В параграфе 2 дается краткая характеристика структуры теорий КМ: онтология теории, модель, математический формализм, эксперимент и их интерпретация. Подчеркиваются различия между физической и философской интерпретациями. В параграфе 3 перечислены исторические примеры метафизических концепций перехода от потенциально-возможного к актуальному, рассмотрены основные направления дискуссии в современной аналитической метафизике модальностей. Параграф 4 посвящен использованию модального подхода в КМ. Описана разница в понимании физического и эпистемологического типов возможностей при объяснении классических и квантовых явлений. Несколько интерпретаций КМ переформулированы с учетом основных концепций метафизики модальностей. В параграфе 5 рассмотрены некоторые аналогии между концепцией Лейбница о стремлении к существованию соревнующихся возможностей, волновой механикой Шредингера и интегралом по траекториям Фейнмана.

1. Модели и интерпретации в квантовой механике

Теория, описывающая поведение квантовых объектов, содержит в себе не только математический формализм, но и некую модель, построенную на небольшом количестве понятий и аксиом для идеализированных физических или абстрактных объектов. Предполагается, что эти объекты подчиняются определенной логике и взаимодействуют по неизменным правилам. Первоначально модель может строиться как гипотеза, затем на ее основе выписываются уравнения, математические объекты которых сопоставляются с объектами модели. На следующем этапе модель и ее уравнения испытываются на способность предсказывать наблюдения. Если предсказания ошибочны, тогда модель или уравнения (или и то и другое) корректируются.

Помимо предсказания у теории есть другая, не менее важная функция – объяснительная. Если опыт в большей части случаев соответствует предсказаниям, физикам зачастую хочется выяснить, почему именно эта модель и именно этот формализм оказались успешнее других. Первое и естественное желание – использовать для такого объяснения саму модель и ее уравнения. Однако такой прагматический подход помогает не всегда, несмотря на успешные предсказания. На это есть три причины.

Во-первых, модели и их формализмы часто заимствуются из других физических теорий, чьи абстрактные и физические объекты «не работают» в новой модели. Дело в том, что хорошая физическая теория кроме модели и уравнений включает в себя так называемую *онтологию теории*³³. В ней говорится, какие объекты следует полагать существующими, а также даются общие представления об окружающей реальности. Как известно, часть моделей КМ были заимствованы из волновой оптики, аналитической механики и теории электромагнитного поля. Заимствованию не помешало то, что представления о реальности в этих теориях существенно отличаются. Строго говоря, единственным аргументом была лишь метафизическая убежденность конкретных физиков в единстве и аналогии законов природы. Во-вторых, формализм новой теории часто использует новые абстрактные объекты, в том числе математические, которые хотя и имеют аналоги в уравнениях других теорий, но труднообъяснимы в рамках старых моделей. В КМ это относится к кванту действия, волновой функции, фазе амплитуды вероятности, квантовым операторам, Гильбертову пространству, квантовой суперпозиции или запутанности. В-третьих, у одной и той же теории может существовать несколько моделей, каждая со своим формализмом³⁴, а иногда и со своей онтологией.

³³ Первоначально это понятие было предложено Куайном [13] для полной замены онтологии как части философии, в том смысле, что без теории нет онтологии.

³⁴ Некоторые авторы [15; 81] считают, что если разные формализмы эквивалентны математическим, то они опираются на общую модель. Однако можно показать, что формализмы Ньютона, Гамильтона и Лагранжа в классической механике или формализмы Гейзенберга, Шредингера и Фейнмана в квантовой механике соответствуют разным моделям (см. [26; 33]).

Попытка приспособить старые модели с их абстрактными объектами, аксиомами и правилами к объяснению новой модели и нового формализма часто ведет к парадоксам. Несмотря на это, менять сами модели физикам нет необходимости, во всяком случае, до тех пор, пока они хорошо «работают». В теориях КМ модели принято формулировать в виде нескольких очень абстрактных постулатов (см. [9]), и рано или поздно возникает необходимость в их интерпретации. Основные задачи интерпретации можно сформулировать так: (а) выяснить, какие природные явления скрываются за уравнениями; (б) описать все части теории в категориях существования и реальности; (в) объяснить связь этих частей с экспериментом, включающим операции приготовления и измерения. Отсюда можно предположить, что полная теория – это совокупность теоретической части (онтология теории плюс модель), формализма (математическая модель), эксперимента и их интерпретации³⁵. И действительно, без адекватной интерпретации мы не можем быть до конца уверены, что наши уравнения не случайно совпали с наблюдениями или были подогнаны под них. Однако одной интерпретации недостаточно, она сама, как любая часть теории, нуждается в подтверждении опытом. Если же этого не происходит, физики или корректируют модели, или создают новые интерпретации. И чем труднее объяснить связь всех частей теории, тем больше возникает интерпретаций. Похоже, именно это происходит с КМ и квантовой теорией поля.

В интерпретации теории можно выделить два аспекта. Для моделей и уравнений достаточно интерпретации физической, основная задача которой – придать физический смысл понятиям и математическим символам. Для этого их соотносят с привычными физическими объектами, например, с частицами, полями, энергией или пространством. Онтология теории больше нуждается в философской интерпретации, задача которой – придать языку, объектам и уравнениям теории четких онтологических оснований, объясняющих, какие объекты являются фундаментальными, а какие нет, а еще – как все это связано с реальностью и наблюдателями. Пытаясь дать подобную интерпретацию теории, физики, часто неосознанно, обращаются к универсальным категориям, таким как существование, индивидуальность, отношение, состояние, необходимость, возможность, актуальность; а также к универсальным принципам, например, единства, симметрии, причинности, непротиворечивости и др. Но как известно, все перечисленное является предметом изучения метафизики или онтологии.

Не все физики считают полезным обращение к философии. Для многих из них физика – единственный надежный источник знаний о природе, а значит, онтология физики эквивалентна всей онтологии и всей метафизике. В отличие от наивного реализма, согласно которому большинство наблюдаемых объектов существует реально, сторонники подобного научного реализма [49] считают, что теория говорит о вещах и явлениях, которые суще-

³⁵ Подробнее об особенностях использования моделей в квантовой механике (см. [30. С. 248–330]).

ствуют и происходят на самом деле, и именно поэтому мы должны верить в истинность теории. Против такого взгляда есть ряд серьезных возражений [51]: (а) в прошлом многие хорошие теории оказывались ошибочными; (б) эксперименты всегда имеют ограниченный характер; (в) в основе каждой теории лежат идеализации и абстракции, в том числе метафизические, а значит, законы теории верны только для ее моделей³⁶.

Как показала история КМ, одна и та же работающая теория одновременно может иметь не только несколько моделей со своими формализмами, но и несколько интерпретаций. Возьмем, к примеру, три математически эквивалентных формализма, в основе каждого из которых лежит своя абстрактная модель. Уравнения Гейзенберга опираются на модель, согласно которой физические характеристики частиц описываются матрицами операторов координат и импульсов, изменяющимися во времени. Соглашаясь в целом с Копенгагенской интерпретацией, Гейзенберг [8. С. 222–223] добавил к ней метафизическую идею Аристотеля о переходе из возможного состояния в актуальное. Создатель волновой механики, Шредингер соглашался с моделью Де Бройля, говорящей о волновой природе всех объектов. Опираясь на аналогию с уравнением Гамильтона–Якоби из аналитической механики, Шредингер связал волновую функцию с классическим действием. Эта аналогия не была угадана, поскольку он был твердо убежден, что волновая функция связана с реальными волнами, несущими электрический заряд, и однозначно описывает эволюцию квантовой системы [26. С. 564; 40. С. 229–238]. В основе интеграла по траекториям Фейнмана лежит геометрическая модель сложения вращающихся стрелок, символизирующих амплитуду вероятности отдельных возможных траекторий квантовой частицы. Оказалось, что вероятности квантовых событий можно найти не только решая уравнение Шредингера, но и суммируя (интегрируя) вклады всех возможных в данных условиях амплитуд вероятностей, а потом возводя их в квадрат [33. С. 41]. Пытаясь как-то интерпретировать свою модель, Фейнман использовал аналогию с вариационными принципами механики, представляя частицу, одновременно перемещающуюся вдоль всех альтернативных виртуальных траекторий.

Несмотря на то, что все три формализма хорошо согласуются с опытом, модели и интерпретации, использованные их создателями, явно недостаточны для объяснения природы квантовой вероятности, смысла волновой функции и ее «скачка» в момент измерения. Безусловно, волновая интерпретация Шредингера очень наглядна, но она не объясняет наблюдаемый путь отдельной частицы, ведь волны должны рассеиваться, что противоречит

³⁶ Ван Фраасен [77] утверждает, что далеко не каждая теория, хорошо согласованная с экспериментом (эмпирически адекватная), описывает истину. Например, понятия электрона или гравитационного поля очень удобны, но это не значит, что они существуют в реальности. Дирак [50] считал, что хорошая физическая модель подтверждается нашей способностью использовать ее для расчетов, которые мы можем проверить экспериментально, но одновременно признавал, что реальное основание нашей веры в теорию не лежит только в экспериментальных доказательствах, скорее, красота теории заставляет верить в нее.

эксперименту. Еще труднее обнаружить какой-то смысл в сложении стрелок по методу Фейнмана.

2. Модальности в онтологии и аналитической метафизике

Тему перехода от потенциального – возможного существования в актуальную реальность исследовали многие известные философы. Аристотель [2. V. 12. XII. 2] считал, что все изменяется из существующего в возможности в существующее в действительности. В его конструкции возможность или способность (динамис) посредством деятельности (энергея) переходит в действительность-осуществленность (энтелехия)³⁷. В средневековой схоластике динамис и энергея были переведены на латынь как потенция и акт. Согласно Аквинскому (Сумма против язычников, I, 16, цит. по: [1]), все, что есть в мире, переходит из потенции в акт, но того, что есть в потенции, еще нет, и потому оно не может действовать. Отсюда, кстати, Аквинский выводил необходимость существования Бога. Кузанский [14. С. 167] писал, что из возможности происходит действительность, а из того и другого появляется движение, являющееся связью возможности и действительности.

Лейбниц объединил сразу две концепции возможностей. Согласно первой, для Бога есть бесконечное множество возможных миров, и мы можем их осознавать, поскольку бытие, по Лейбницу, присуще всему, что можно помыслить, однако существует далеко не все. По воле Бога актуализируются только один мир – наиболее совершенный. Другая его концепция посвящена соревнующимся возможностям [17. С. 234–235], в дальнейшем мы рассмотрим ее подробнее. Кант [12. С. 170] трактовал возможность и действительность в качестве априорных категорий модальности: что согласуется с формальными условиями опыта, то возможно; что согласно с материальными условиями опыта, то действительно; то, связь чего с действительным определена согласно общим условиям опыта, существует необходимо. Гегель [7. С. 318] говорил о возможности и случайности как о моментах действительности, причем возможность – это внутреннее, а случайность – внешнее действительности. Только реализованная возможность, по Гегелю, обретает все параметры существования в качестве действительности. Гартман [6. С. 322] называл центральным модусом идеального бытия не действительность, а возможность. Причем каждая из многих возможностей сама по себе является совершенно определенной. Неопределенной является лишь судьба отдельной возможности, ее реализация. Основоположник философии процесса Уайтхед [79] утверждал, что «действительные происшествия, из которых складывается мировой процесс, представлены как воплощения других вещей, образующих потенциальные формы определенности для каждого действительного существования».

³⁷ Данная схема условна, поскольку в V и IX книгах Метафизики Аристотель [2] использует одни и те же термины в разных смыслах.

Продолжая традицию немецких философов, советская диалектическая школа рассматривала действительность отдельного объекта как его актуальное бытие в конкретных качественных и количественных пространственных и временных характеристиках. Предполагалось, что каждая конкретная возможность может быть вполне определена, но в силу того, что материальный объект имеет множество конкурирующих возможностей, изменению объекта присуща некоторая неопределенность. В качестве меры осуществимости отдельной возможности предлагалось использовать категорию вероятности [3].

Вопрос природы возможностей и возможных миров приобрел особую научную и философскую популярность после разработки семантики возможных миров для модальных логик, где в качестве значений предложений принималась их истинность или ложность не только в действительном, но и во всех возможных мирах [61; 62]. Под возможными мирами стали понимать любые непротиворечивые совокупности возможностей, возможных объектов или состояний дел. Философы аналитической традиции стали уделять особое внимание соотношению бытия, существования и реальности возможных состояний в различных возможных мирах [41; 42; 54; 57; 63; 67]. Чтобы подчеркнуть разницу между логикой и метафизикой, модальности часто делят на два типа: *de Dicto* и *de Re*. Первый тип – это модальности, выраженные в языке и логике, как характеристики суждения по степени фиксируемой в нем достоверности описываемых положений дел и событий. Второй тип модальностей присущ самим вещам и явлениям независимо от нашего языка. В этой статье нас больше интересует не язык, а непосредственно квантовые объекты, поэтому мы сосредоточимся на модальностях второго типа.

Один из важных результатов дискуссии в метафизике модальностей заключается в различении типов возможности и необходимости [58; 78]. Когда говорят об эпистемологической возможности, обычно подразумевают, что какое-то событие или состояние объекта не противоречит знанию конкретного субъекта (человек предполагает их возможность). Эпистемологическая необходимость означает, что противоположное событие или состояние объекта противоречит знанию субъекту (человек уверен). Логическая возможность состояния означает, что оно не противоречит аксиомам некоторой системы утверждений. Логическая необходимость прямо следует из аксиом этой системы в соответствии с ее правилами, которые, кстати, могут быть не только правилами классической логики. Метафизически возможное состояние возможно по своей сущности или истинно в одном из метафизически возможных миров. Метафизическая необходимость говорит о сущности или истинности во всех метафизически возможных мирах. Для номологически возможных состояний достаточно не противоречить общим законам природы, например, тому, что причина предшествует следствию. Номологически необходимые состояния прямо следуют из таких законов, а противоположные состояния противоречат им. Физически возможное состояние не

противоречит общим физическим законам, например, специальной теории относительности или второму началу термодинамики, соответственно, физическая необходимость прямо из них следует.

Считается [78], что физическая область возможных событий и состояний уже, чем метафизическая и логическая области. Например, путешествие во времени возможно логически и даже возможно в некоторых метафизических концепциях, но невозможно физически. Уравнения КМ допускают одновременное существование частицы в альтернативных состояниях, но это невозможно в классической логике. Соотношение области эпистемологических возможностей с другими областями зависит от ответа на вопрос, что описывает научная теория и ее уравнения: только наше знание или же саму реальность. Научный реалист ответит на это, что теория описывает реальность, а значит, эпистемологическая возможность есть отражение физической и метафизической возможностей. Сторонники конструктивного эмпиризма [76] допускают, что реальность может сильно отличаться от самой хорошей теории, а значит, область эпистемологической возможности может быть как уже, так и шире областей физической и метафизической возможностей, поскольку, с одной стороны, наше знание всегда неполно, с другой – наши фантазии безграничны.

Согласно широко распространенному мнению, любой объект является актуальным. Отсюда часто делается вывод, что неактуальных или возможных объектов просто не существует. Согласно другому консервативному взгляду, любой объект по определению является существующим объектом. В метафизике модальностей рассматриваются более сложные концепции [54; 69; 73], которые можно разделить на две большие группы: реализм и анти-реализм или номинализм. В реалистическом подходе каждая возможность рассматривается как нечто, существующее в реальности; она представляется категорией онтологической и космологической. Анти-реализм, наоборот, отрицает существование и реальность возможностей и возможных миров. И те и другие объявляются созданием нашего ума и существуют только как имена, фикции или теоретические построения. В частности, Крипке [62] утверждал, что термин «возможный мир» является лишь инструментом языка, полезным для визуализации концепции возможности.

Обычно в аналитической философии термины *бытие* и *существование* употребляются как синонимы, но когда необходимо провести между ними различие, то существование трактуется как один из способов или *модусов бытия* [20]. Один из критериев, по которому можно классифицировать современные концепции модальностей и возможных миров, это соотношение понятий *бытие*, *существование* и *актуальность*. Дадим их краткую характеристику.

Модальные реалисты [63] утверждают, что бесконечное число возможных миров существуют в реальности, и они так же актуальны, как наш мир. Наш мир – один из многих, а значит, возможные события и объекты существуют не менее, чем актуальные. Для удобства вводится принцип относи-

тельности: объекты других возможных миров для нас, жителей этого мира, являются возможными, хотя для жителей своего мира они вполне актуальны.

В концепции *поссибилизма* возможные объекты и возможные миры обладают бытием, поэтому некоторые из них могли бы существовать в физическом мире. Однако только один физический мир существует как актуальный, и только он состоит из актуальных объектов, которые существуют в этом мире.

Для *диспозициональных эссенциалистов* [43; 55] мир это что-то вроде конгломерата объектов и их диспозиций. Диспозиция – это объективная потенция или предрасположенность к определенному исходу, которая существует для всех или для некоторых фундаментальных свойств объектов. В отличие от категориальных свойств объектов диспозициональные свойства неполностью проявляются в настоящем. Любой объект, обладающий диспозиционной сущностью, при определенных условиях предрасположен проявить свою потенцию в каком-нибудь возможном мире.

Актуалисты [41] отрицают реальность возможных объектов и заявляют, что все, что обладает бытием, существует как актуальные вещи. Нет ничего, что не было бы актуальной вещью, а физическое существование равно бытию. Возможные миры являются не более чем лингвистическими конструкциями или абстрактными состояниями, в которых может находиться единственный актуальный мир. Некоторые приверженцы актуализма [71] говорят о еще неактуализированных индивидуальных сущностях. Это означает, что каждый объект имеет некую индивидуальную сущность, независимую от самого объекта, как актуального, так и возможного. Другая версия актуализма – *комбинаторизм* [42] – рассматривает возможные миры как комбинации свойств и отношений объектов или состояний дел одного актуального мира.

Каждая из перечисленных концепций сталкивается с трудностями. Реалисты, например, не могут объяснить, как возможные миры связаны друг с другом, как они возникают и становятся актуальными. Антиреалисты решают проблему того, как конкретные возможности переходят в актуальный мир или что происходит с возможными объектами и мирами, которые не смогли стать актуальными. Но, несмотря на все трудности, нет сомнения, что многочисленные результаты исследований в метафизике модальностей можно с успехом использовать при анализе интерпретаций КМ. Примеры такого использования будут даны ниже.

3. Модальности в интерпретациях квантовой механики

Один из уроков исследования модальностей состоит в том, что, говоря о возможностях применительно к квантовым явлениям, мы всегда должны уточнять, какой тип возможности имеется в виду. Для примера рассмотрим три варианта соотношения эпистемологической и физической возможно-

стей. Когда мы говорим, что, возможно, в соседней комнате находится десять стульев и вероятность этого составляет 70 %, мы оцениваем степень нашего знания или, наоборот, степень незнания. Такая оценка основана не только на жизненном опыте, но и на знании физической возможности данного факта. С физической точки зрения в конкретный момент времени эти стулья там уже или есть, или нет, и это необходимый факт, независимый от нашего знания. Войдя в комнату и увидев стулья, мы изменим степень эпистемологической возможности, но на физическую возможность и необходимость это не повлияет.

Когда синоптики используют ансамблевый прогноз и говорят, что вероятность дождя завтра 70 %, это означает, что из всех рассчитанных компьютером сценариев только 70 % заканчиваются дождем. В отличие от случая со стульями, мы оцениваем будущее событие, и эта оценка основана на статистике дождей в предшествовавшие дни. С эпистемологической и физической точек зрения дождь возможен, но вероятность этих возможностей разная, поскольку при расчете сценариев погоды мы не могли учесть все факторы. В этом случае эпистемологическую возможность уже нельзя соотносить только с мерой незнания, так как физически дождь завтра не является необходимым.

Если мы говорим, что вероятность зарегистрировать фотон в конкретной точке экрана равна 70%, это значит, что расчет уравнений КМ для одиночного фотона дал такую величину. Если уравнения адекватны опыту, то эпистемологическую возможность в какой-то степени можно считать равной физической. Но между ними есть принципиальная разница. Для проверки эпистемологической возможности необходимо измерить распределение вероятностей путем регистрации большого числа фотонов в серии опытов. Физическая же возможность и ее мера – амплитуда вероятности – существуют даже для одиночного фотона, независимо от поведения других фотонов и нашего знания об этой возможности. Как и в случае с дождем, эпистемологическую возможность обнаружения фотона нельзя соотносить только с мерой незнания. Но в отличие от физической возможности дождя, которая определяется цепью будущих случайных событий, для фотона физическая возможность определяется его текущим состоянием, точнее, суперпозицией множества возможных состояний.

В разных интерпретациях КМ используются разные типы возможностей. Например, в Копенгагенской интерпретации Бора рассматривалась эпистемологическая возможность и физическая необходимость; Фок рассматривал скорее физическую возможность и необходимость; многомировая интерпретация пытается объединить физическую возможность с метафизической необходимостью; большинство модальных интерпретаций тяготеет к метафизическим возможности и необходимости.

Чтобы внести больше ясности в наши рассуждения, введем понятие квантовой возможности по аналогии с физической возможностью, рассмотренной выше. Пусть квантовое событие, состояние или история являются

возможными, если они не противоречат законам КМ. Соответственно квантовыми возможными мирами будем называть совокупности возможных состояний или историй квантовых частиц (полей), обладающих некоторыми общими свойствами.

Чтобы продемонстрировать, как достижения метафизики модальностей можно использовать для анализа интерпретаций КМ, переформулируем основные концепции возможностей и возможных миров применительно к квантовым объектам и их состояниям. Затем переформулируем некоторые интерпретации в модальных терминах.

С точки зрения антиреалистического или номиналистского подхода, возможные состояния и истории квантовых частиц (полей) существуют только в моделях и формулах, которые выведены из опыта как инструменты теоретического изучения актуального мира, а значит, не имеют независимой жизни. В анализе возможных миров такой подход сочетается с *актуализмом*: существует только один актуальный классический мир; квантовый возможный мир не существует никак – это просто совокупность возможных состояний (историй) квантовых частиц (полей) как возможных сценариев или состояний дел, которые потенциально содержатся в актуальных состояниях классических объектов.

Интересно, что по отношению к возможностям полностью антиреалистических интерпретаций не так много. В первую очередь к ним можно отнести Копенгагенскую интерпретацию в версии Бора, согласно которой говорить о реальности возможных состояний квантовых частиц до измерения бессмысленно, поскольку они существуют только в формулах³⁸. Единственный актуальный мир создается в результате измерения, а «коллапс волновой функции» описывает не изменение реальности, а изменение нашего знания о ней. Поэтому квантовые и макрообъекты описываются принципиально разным языком (принцип дополнительности). Квадрат волновой функции интерпретируется как вероятность обнаружения объекта в конкретном месте пространства. В отличие от классической, квантовая вероятность не является следствием неполноты нашего знания, а описывает объективную характеристику квантовых объектов, пусть даже в экспериментах эта характеристика проявляется как частота или распределение вероятностей событий в многократных опытах.

В многочисленных версиях статистической или ансамблевой интерпретации КМ [25] предполагается, что вероятностные законы КМ лишь удобное средство для описания единственной и однозначной актуальной реальности. В момент измерения фиксируются не индивидуальные характеристики отдельных частиц, а статистические характеристики их совокупности. Интересно, что, несмотря на принципиально разные взгляды на природу кванто-

³⁸ В некоторых высказываниях Бор все-таки признавал объективное существование частиц (см. [21]).

вой вероятности, и Копенгагенская, и статистическая интерпретации близки к метафизической концепции актуализма.

Если в рамках метафизики модальностей встать на противоположную – реалистическую позицию, то следует признать, что возможные состояния (истории) квантовых частиц (полей) существуют независимо от нашего разума. Например, с точки зрения эссенциального диспозиционализма возможные состояния квантовых частиц (полей) будут являться манифестацией их объективных предрасположенностей или потенций. В анализе возможных миров такой подход сочетается с двумя концепциями. Для модальных реалистов квантовый возможный мир предстает совокупностью возможных состояний (историй) квантовых частиц (полей), существующих так же актуально, как наш мир для нас. Для сторонников пессимизма квантовый возможный мир онтологически есть совокупность потенциальных состояний (историй) квантовых частиц (полей), которые еще не реализовались и не существуют актуально в нашем единственном мире.

Интерпретаций, где подразумевается та или иная степень существования квантовых возможностей, довольно много. Перечислим только некоторые из них. Интерпретации Гейзенберга и Фока близки к точке зрения Бора, но отличаются отношением к возможным квантовым состояниям. Гейзенберг считал, что математические законы квантовой теории вполне можно считать количественной формулировкой аристотелевского понятия «динамика» или «потенция», а понятие «возможность» занимает промежуточное положение между понятиями объективной материальной реальности и субъективной реальности. Он признавал, что квантотеоретическая вероятность обладает частичной объективностью, но, если ее истолковать как меру частоты, она будет иметь значение только по отношению к совокупности мысленно представимых событий [8. С. 223]. В отличие от Гейзенберга, Фок считал, что «описываемое волновой функцией состояние объекта является объективным в том смысле, что оно представляет объективную (независящую от наблюдателя) характеристику потенциальных возможностей того или иного результата взаимодействия атомного объекта с прибором» [37]. По словам Фока [38. С. 179], в опыте осуществляется один из потенциально возможных результатов, предусмотренных первоначальной волновой функцией, и этому результату соответствует новая волновая функция, а вероятность того или иного поведения объекта в данных условиях есть численная оценка потенциальных возможностей этого поведения³⁹. Такой взгляд вполне согласуется с концепцией пессимизма.

Похожую идею развивает Севальников [28] в полионтичной или многомодусной модели КМ. Он рассматривает понятие «сосуществующих возможностей», означающее, что одна возможность может пересекаться с другой или включать ее в себя [Там же. С. 98]. Динамическое, непрерывное изменение волновой функции в уравнении Шредингера, согласно Севальнико-

³⁹ Подробнее о разнице взглядов Гейзенберга и Фока (см. [28. С. 120–127]).

ву, описывает происходящее на уровне «потенциальных возможностей», или то, что еще действительно не существует, не актуализировалось. Только во время измерения, когда вмешивается «иное», скажем прибор, происходит осуществление, актуализация возможного. Таким образом, уравнение Шредингера описывает грань между уровнем бытия возможного и бытия действительного. Аппарат классической физики описывает классический мир, то есть мир актуальный, явленный, в то время как математический формализм квантовой механики описывает становление [28. С. 143].

В свое время, при создании волновой механики, Шредингер не согласился с Гейзенбергом в том, что наблюдаемый путь отдельной частицы есть результат превращения одной из возможных траекторий в действительную. Шредингер объяснял действительную траекторию совокупностью или полем всех возможных траекторий. По его мнению [40. С. 229–238] в бесконечном множестве возможных траекторий ни одна не имеет преимущества быть осуществленной в конкретном случае, все они равнореальны. Такой взгляд тоже близок к POSSIBILИЗМУ, но вместо реализации одного суммируются все перепутанные возможные состояния, и происходит это благодаря резонансу или интерференции [Там же. С. 261–284].

В своей пропензитивной интерпретации Поппер исходил из объективного понятия вероятности как возможности или потенции в смысле философии Аристотеля [24]. По Попперу [27. С. 17], квантовая реальность – это реальность не актуальных, всегда имеющихся свойств объектов, а реальность их предрасположенностей к некоторому поведению, причем предрасположенности так же реальны, как силы или силовые поля. Такой взгляд близок к современной концепции эссенциального диспозиционализма.

В теории Бома (1952) предполагается объективно существующее скрытое и нелокальное в пространстве-времени поле квантовых потенциалов. Оно зависит от положения всех частиц сразу и влияет на актуальную траекторию частиц. Согласно концепции «голодвижения» [47], любое измерение или взаимодействие извлекает объекты из непроявленного и запутанного состояния целостного единства. Именно в этот момент мы воспринимаем объект как реальный, хотя он существовал и до измерения. Как только взаимодействие прекращается, объект возвращается в имплицативное состояние мирового целого. Если нелокальное поле потенциалов и непроявленное имплицативное целое рассматривать как аналог сферы возможного, тогда идеи Бома во многом соответствуют положениям POSSIBILИЗМА.

Считается, что Фейнман не формулировал отдельной интерпретации КМ, он даже подчеркивал, что никому не удалось отыскать механизма, который прячется за ее законами [34. С. 207]. Одновременно в ряде работ он все-таки давал объяснения своего формализма интеграла по траекториям. По его словам, фотоны действительно следуют по всем возможным взаимоисключающим траекториям, а сложение их амплитуд вероятностей вовсе не пустая игра в математику [36. С. 49, 54]. Кроме опытов со светом, такому взгляду на реальность возможных траекторий способствовала аналогия

с принципом наименьшего действия классической механики. По Фейнману, в этом принципе частица «чувствует» все соседние пути и выбирает тот, вдоль которого действие S минимально. И если забыть обо всех этих амплитудах вероятностей, «частица и впрямь движется по особому пути – именно по тому, по которому S в первом приближении не меняется. Такова связь между принципом наименьшего действия и квантовой механикой» [35. С. 111–112]. Если то, что Фейнман называл альтернативными траекториями, рассматривать как возможные траектории, вдоль которых «перемещается» (никакой классической траектории, конечно, нет) квантовый объект, тогда актуальная траектория является их суммой, а точнее, суммируются амплитуды вероятностей возможных траекторий и их комплексные фазы.

В интерпретации КМ через согласованные или декогерентные истории [60] из всех альтернативных квантовых историй (аналог траекторий Фейнмана) выделяется некоторый пучок крупномасштабных согласованных историй, которые из-за декогеренции или «запутывания с окружением» почти не интерферируют, поэтому их вероятности можно складывать по классическим правилам. Эти истории ведут себя как квазиклассические в пространстве-времени, таким образом, классические уравнения движения рассматриваются как предельный случай квантовых законов. Реальность квантовых историй до их декогеренции не зависит от измерения или наблюдателя, а значит, они могут рассматриваться как возможные истории, при определенных условиях переходящие в актуальные. Сторонники этой интерпретации не используют модальных терминов, однако подобный взгляд близок к possibiliзму, при условии, что вместо реализации одной из множества историй рассматривается механизм декогеренции целого пучка возможных историй.

Цурек [83], изучая механизм декогеренции с окружением, предложил свою интерпретацию КМ, назвав экзистенциальной. В ней он попытался объединить две, казалось бы, противоположных точки зрения: (а) реальность – это только наше знание, как в Копенгагенской интерпретации, и (б) реальность – это онтологическая сущность. Цурек предположил, что возможные состояния или истории квантовых объектов отбираются и получают актуальное существование с помощью декогеренции через обмен информацией с окружением. Этот обмен информацией существует объективно, именно он является причиной любых изменений и взаимодействий. Сама информация – это первичная сущность, а не только знания человека, а значит, для выхода одного из альтернативных состояний из квантовой суперпозиции важен не факт получения информации наблюдателем, а само наличие такой возможности.

В многомировой интерпретации КМ [74] предполагается, что любое измерение частиц расслаивает их на копии, каждая из которых реально существует в своем параллельном мире или проекции Вселенной. На первый взгляд, эта интерпретация напоминает концепцию модального реализма в метафизике возможных миров [63], где все возможные миры существуют и

являются относительно актуальными. Однако сходство обманчиво, и об этом писал сам Льюис [64]. В модальном реализме возможные миры (всеенные) развиваются независимо друг от друга, в них даже возможны разные законы. В многомировой интерпретации возможный мир – это одна из ветвей эволюции событий внутри единственной Мультивселенной, все ветви которой имеют общий источник и общие законы, но разделены из-за декогеренции с окружением. Мультивселенная представляется в виде квантовой суперпозиции всех своих ветвей или миров. Интересно, что создатель этой интерпретации Эверетт [56] прямо отрицал любую аналогию с переходом возможности в актуальность, принятую в POSSIBILISME.

В последние десятилетия возникло целое семейство интерпретаций, которые их авторы прямо называли модальными. Квантовое состояние системы в них понимается как описание коллекции возможностей, представленных компонентами в смешанном квантовом состоянии. Несмотря на различия, все модальные интерпретации основаны на стандартном формализме КМ, за исключением проекционного постулата, предусматривающего «коллапс волновой функции» [23; 66]. Ван Фраассен [77] первым предположил, что у квантовой системы есть два состояния – динамическое и состояние-свойство. Динамическое состояние определяет то, какими физическими свойствами может обладать система и каковы соответствующие им вероятности. Для изолированной системы это состояние развивается по уравнению Шредингера (в нерелятивистском случае) и не разрушается в процессе эволюции, поэтому модальную интерпретацию иногда называют одномировой версией многомировой интерпретации. Состояние-свойство характеризует актуально существующие физические свойства системы, которые точно определены в любой момент времени. Процесс измерения, как и любое физическое взаимодействие, случайным образом обнаруживает (но не создает, как у Гейзенберга) одно из возможных состояний-свойств и тем самым делает его актуальным. Модальность не рассматривается как результат неполноты описания, наблюдатель не играет особой роли, а квантовая теория считается фундаментальной не только для частиц, но и для макрообъектов. Таким образом, квантовый формализм не говорит, что актуально происходит в физическом мире, а только дает нам перечень возможностей и их вероятностей [52].

С точки зрения Бене и Дикса [44; 53], свойства физической системы определяются по отношению к другим физическим системам. Подобные реляционные описания, произведенные с разных точек зрения, в равной степени объективны и все соответствуют физической реальности, которая и сама имеет реляционный характер. Модальности в такой интерпретации становятся лишь удобным инструментом описания актуального мира и не имеют собственного существования. Такой взгляд ближе к актуализму, поскольку возможные состояния-свойства существуют в рамках актуального мира и случайно нами обнаруживаются.

В другой версии модальной интерпретации [65] определяющую роль в том, какое состояние-свойство станет актуальным, играет гамильтониан системы. Вводится онтология с двумя несводимыми друг к другу сферой возможности и сферой действительности. Квантовые системы относятся к сфере возможного, которая не менее реальна, чем сфера актуальности. Вероятность рассматривается как представление онтологической предрасположенности возможного квантового события стать актуальным. Такой взгляд ближе всего к концепции POSSIBILITISM, поскольку возможные состояния-свойства реализуются в актуальный мир.

4. Соревнующиеся возможности Лейбница и интеграл по траекториям Фейнмана

В качестве еще одного примера использования метафизики модальностей для интерпретации теорий КМ рассмотрим ряд интересных аналогий между концепцией Лейбница о стремлении к существованию соревнующихся возможностей, волновой механикой Шредингера и методом интеграла по траекториям. Если альтернативные виртуальные траектории в формализме Фейнмана рассматривать как возможные пути, то с точки зрения метафизики они могут иметь разное отношение к реальности. Например, с точки зрения модального реализма, эти траектории могут существовать в других возможных мирах, таких же актуальных, как наш мир. Для POSSIBILITIST и диспозициональных ЭССЕНЦИАЛИСТОВ траектории Фейнмана обладают некоторой степенью бытия в нашем мире, но еще не существуют в нем актуально. Актуалисты сказали бы, что траектории Фейнмана – это фикция, не имеющая ни бытия, ни существования.

Несмотря на то, что большинство теорий возможных миров основано на идеях Лейбница, в целом его метафизическая система существенно отличается от современных модальных теорий и, по нашему мнению, заслуживает отдельного изучения. В своих многочисленных работах Лейбниц развил понимание возможности Аристотелем как потенциальности, одновременно отождествляя возможность с идеальностью, что сближало его с Платоном [19]. Для Лейбница [18. С. 124] актуальное – это то, что выражает существование, а потенциальное выражает только сущность. Поскольку Лейбниц был ученым не меньше, чем философом, его не удовлетворяла слишком абстрактная аристотелевская модель об осуществлении потенции через действие. Лейбниц [17. С. 234–235] попытался представить, как этот метафизический процесс осуществления проявляется в физических процессах. Он предположил, что всякая возможная вещь или сущность [Там же. С. 283], стремится к существованию. Но не к любому существованию, а к такому, которое пропорционально количеству реальной сущности или степени совершенства вещи. Чем больше совершенства, тем больше существования. А поскольку, по словам Лейбница, «иное с иным бывает несовместимо, то иное возможное не доходит до осуществления». Таким образом, из столкновения всех

возможностей осуществляется тот ряд вещей, который содержит наибольший ряд возможностей. Другими словами, возможности соревнуются друг с другом за существование, объединяясь с как можно большим количеством других сущностей, с которыми они совместимы, согласованы или совозможны [45]. Так «является мир, в котором осуществлена наибольшая часть возможных вещей» [Там же. С. 285]. Лейбниц приводит пример такого ряда вещей: «...этот ряд единственный определенный, как среди линий прямая, среди углов прямой, среди фигур наиболее вместительная, а именно окружность или шар». Следующий вывод таков: поскольку возможности соревнуются друг с другом, количество существования должно быть наивозможно большим при данной вместимости пространства и времени [17. С. 284].

Вернемся к квантовым явлениям. Как уже было отмечено, Шредингер [40. С. 229–238] пытался объяснять наблюдаемые траектории частиц всей совокупностью возможных траекторий, а не превращением одной из них в действительную. Если же перефразировать приведенные выше высказывания Фейнмана, его формализм интеграла по траекториям упрощенно можно описать так: в результате суммирования амплитуд вероятностей всех возможных траекторий осуществляется та, которая объединяет наибольшее число амплитуд вероятностей с близкими фазами. Единственная наблюдаемая траектория отличается от всех возможных максимумом вероятности.

Теперь сравним концепцию Лейбница с моделями Шредингера и Фейнмана, составив таблицу соответствия некоторых понятий.

Таблица

Метафизика Лейбница	Квантовая механика
количество существования; мера необходимости отдельной возможности	квадрат амплитуды вероятности; вероятность
столкновение или соревнование возможностей	интерференция или сложение амплитуд вероятности
совозможные или совместимые сущности	суперпозиция согласованных траекторий
максимальное существование	наблюдаемая уникальная траектория

Интересно, что, используя данную таблицу соответствий, некоторые положения концепции Лейбница можно перевести на язык КМ. Например, метафизический вывод о том, что еще не проявленные возможности всегда соревнуются и объединяются с другими сущностями, с которыми они совместимы, окажется очень похожим на утверждение: «альтернативы, которые нельзя обнаружить в опыте, всегда интерферируют» [33. С. 26]. Приведем другие примеры соответствия утверждений на языке, основанном на метафизике Лейбница, и на языке современной КМ.

Метафизика: возможные истории имеют сущность, а значит, бытие в возможном модусе, но еще не обладают существованием в актуальном мо-

душе нашего мира, в котором они несовместимы. *КМ*: до взаимодействия эволюции альтернативных траекторий частицы описываются однозначными волновыми функциями, но ни одна из этих траекторий не существует как действительная.

Метафизика: каждая возможная история обладает собственной мерой необходимости, с которой эта история переходит в актуальность. *КМ*: амплитуда вероятности (и ее комплексная фаза) конкретной альтернативной траектории частицы связана с вероятностью обнаружения частицы на этой траектории.

Метафизика: в возможном модусе объект перемещается сразу⁴⁰ по бесконечному множеству всех возможных историй, совместимых в пространстве возможных событий. Возможные истории конкретного объекта совместимы друг с другом и поэтому объединяются. *КМ*: частица перемещается в Гильбертовом пространстве сразу по всем альтернативным траекториям, которые находятся в когерентной суперпозиции, поэтому их амплитуды вероятности суммируются, в волновом представлении это выглядит как интерференция.

Метафизика: результат объединения возможных историй отличается максимумом сущности и проявляется в актуальном существовании в качестве уникальной истории. Остальные возможности остаются в возможном модусе. *КМ*: результирующая траектория частицы с максимумом вероятности является уникальной в гладком 4-мерном пространстве-времени. Остальные альтернативные траектории продолжают участвовать в суперпозиции, но, поскольку их вклад в результирующую траекторию относительно мал, они не наблюдаемы.

Предложенные аналогии можно применить не только к траекториям, но и к состояниям, тогда каждый квантовый объект можно представить как суперпозицию всех его возможных альтернативных состояний. Причем переход от множества возможных состояний к одному актуальному состоянию должен происходить при каждом взаимодействии объекта со своим окружением, которое включает как квантовые, так и макроскопические объекты. Обобщая и продолжая аналогию, можно предположить, что именно совокупность возможных движений и состояний квантовых объектов образует реальность возможную, а совокупность действительных движений и состояний образует реальность актуальную. Обе реальности существуют «параллельно», непрерывно переходя друг в друга. Такой вывод вполне соответствует общей метафизической гипотезе о том, что квантовые системы принадлежат к области возможного или потенциального бытия, а классические — к области актуального существования.

⁴⁰ Слово «одновременно» в данном контексте не подходит, поскольку понятие времени относится скорее к актуальному существованию.

Заключение

Интерпретации КМ, в которых предполагается, что квантовые состояния описывают возможности, можно разделить на четыре группы. В первой группе интерпретаций одна возможность становится актуальной благодаря наблюдению, иначе говоря, факт наблюдения создает реальность из возможности. Это подход Копенгагенской интерпретации, особенно явно сформулированный Гейзенбергом и Фоком и, по сути, является развитием идей Аристотеля.

Во второй группе интерпретаций считается, что каждое возможное состояние реализуется как актуальное, а факт наблюдения или сознание выбирает одно из них в одном из миров или в одной из ветвей эволюции Мультивселенной. Это точка зрения отстаивается в многомировой интерпретации.

Третья группа, объединяющая различные модальные интерпретации КМ, утверждает, что одно из многих возможных состояний лишь обнаруживается при наблюдении, но при этом никак не изменяется. В одних версиях модальной интерпретации [53] возможность сводится к действительности, что соответствует актуализму в метафизике. В других версиях [65] принята possibiliстская концепция, согласно которой возможные события составляют фундаментальную онтологическую категорию. Вероятность рассматривается как объективная мера склонности возможного квантового события к тому, чтобы стать актуальным. При этом вторая версия не отрицает первой.

Согласно четвертой группе, вся совокупность возможных состояний системы наблюдатель-прибор-объект реализуется, а мы лишь наблюдаем совокупный результат их сложения. Упрощенно говоря, актуальная действительность есть сумма всех возможностей, сосуществующих в потенциальном модусе бытия в виде квантовых объектов. Похожие идеи высказывали Де Бройль и Шредингер, к такому выводу можно прийти, рассматривая аналогию между метафизической концепцией Лейбница о соревнующихся возможностях и формализмом Фейнмана через интеграл по траекториям. В концепции «суммирования сосуществующих возможностей» [31] делается попытка применить аналогичный подход не только к квантовым, но и к классическим объектам.

Подобное разнообразие во взглядах на возможные квантовые состояния демонстрирует, насколько продуктивным может быть сопоставление модальных подходов в интерпретациях КМ с анализом возможностей в метафизике. Выскажем предположение, что использование достижений метафизики будет полезным и в исследовании внутренней согласованности конкретных интерпретаций КМ, а также при сравнении их эвристической ценности. Кроме того, подобная работа позволит по-новому взглянуть на старые проблемы как физики, так и метафизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антология мировой философии: в 4 т. – М.: Мысль, 1969. – Т. 1. – Ч. 2.
2. *Аристотель*. Метафизика // Аристотель. Сочинения. – Калининград, 2002.
3. *Бранский В.П., Ильин В.В.* Возможность и действительность // Диалектика материального мира. Онтологическая функция материалистической диалектики. Л.: изд-во ЛГУ, 1985.
4. Возможные миры. Семантика, онтология, метафизика. – М.: Канон+, 2011.
5. *Гайденок П.П.* Эволюция понятия науки: Становление и развитие первых научных программ. – Наука, 1980.
6. *Гартман Н.* Старая и новая онтология // Историко-философский ежегодник. – М.: Наука, 1988.
7. *Гегель Г.В.Ф.* Наука логики // Энциклопедия философских наук: в 3 т. – М.: Мысль, 1975. – Т. 1.
8. *Гейзенберг В.* Шаги за горизонт. – М.: Прогресс, 1987.
9. *Гриб А.А.* К вопросу об интерпретации квантовой физики // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183. – Вып. 12. – С. 1337–1352.
10. *Гринштейн Дж., Зайонц А.* Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. – Долгопрудный: ИД Интеллект, 2008.
11. *Казютинский В.В. и др.* Спонтанность и детерминизм. – М.: Наука, 2006.
12. *Кант И.* Критика чистого разума. – М.: Мысль, 1994.
13. *Куайн У.В.О.* Слово и объект. – М.: Логос, Праксис, 2000.
14. *Кузанский Н.* Соч.: в 2 т. – М.: Мысль, 1980. – Т. 2.
15. *Липкин А.И.* Место понятий и принципов «парящих над» отдельными разделами физики // Актуальные вопросы современного естествознания. – 2010. – Вып. 8. – С. 51–58.
16. *Лосев А.Ф.* Античный космос и современная наука // Бытие. Имя. Космос. – 1993.
17. *Лейбниц Г.В.* Сочинения: в 4 т. – М., 1982. – Т. 1.
18. *Лейбниц Г.В.* Сочинения: в 4 т. – М., 1984. – Т. 3.
19. *Майоров Г.Г.* Теоретическая философия Готфрида В. Лейбница. – М.: МГУ, 1973.
20. *Макеева Л.Б.* Проблема реализма и основные концепции соотношения языка и реальности в аналитической философии XX века: дис. ... д-ра филос. наук. – НИУ ВШЭ, 2011, Москва.
21. *Мамчур Е.А.* Информационно-теоретический поворот в интерпретации квантовой механики: философско-методологический анализ // Вопросы философии. – 2014. – Вып. 1. – С. 57–71.
22. *Печенкин А.А.* Три классификации интерпретаций квантовой механики // Философия науки. – Вып. 5: Философия науки в поисках новых путей. – М., 1999.
23. *Печенкин А.А.* Модальная интерпретация квантовой механики как «антиколлапсовская» интерпретация // Философия науки. – 2000. – Вып. 6. – С. 31.
24. *Печенкин А.А.* Удалось ли реабилитировать причинность: Карл Поппер против «редукции волнового пакета» // Мамчур Е.А., Сачков Ю.В. Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме. – М.: Наука, 2002.
25. *Печенкин А.А.* Ансамблевые интерпретации квантовой механики в США и СССР // Вестник Московского университета. – Сер. 7: Философия. – 2004. – Вып. 6. – С. 103–121.
26. *Полак Л.С.* Вариационные принципы механики: их развитие и применения в физике. – М.: Либроком, 2010.
27. *Поппер К.Р.* Квантовая теория и раскол в физике. – М.: Логос, 1998.

28. *Севальников А.Ю.* Интерпретации квантовой механики: в поисках новой онтологии. – М.: Либроком, 2009.
29. *Семенюк А.П.* Тема потенциальности в учениях русских религиозных философов конца XIX – начала XX века // *Метапарадигма: богословие, философия, естествознание: альманах.* – СПб.: Изд-во НП-Принт, 2014. – Вып. 2/3.
30. *Стёпин В.С.* Теоретическое знание. – М., 1999.
31. *Терехович В.Э.* Философско-методологические проблемы принципа наименьшего действия: дис. ... канд. филос. наук. – СПбГУ, СПб. 2013.
32. *Фейнман Р.* Характер физических законов. – М.: Мир, 1968.
33. *Фейнман Р., Хибс А.* Квантовые интегралы по траекториям. – М., 1968.
34. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. – Вып. 3: Излучения. Волны. Кванты. – М.: Эдиториал УРСС, 2004.
35. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. – Вып. 6: Электродинамика. – М.: Эдиториал УРСС, 2004.
36. *Фейнман Р.* КЭД – странная теория света и вещества. – М.: АСТ, 2014.
37. *Фок В.А.* Об интерпретации квантовой механики // *Успехи физических наук.* – 1957. – Т. LXII. – Вып. 4.
38. *Фок В.А.* Квантовая физика и строение материи // *Структура и формы материи.* – М., 1967.
39. *Хоружий С.С.* Род или недород? Заметки к онтологии виртуальности // *Вопросы философии.* – 1997. – Вып. 6. – С. 53–68.
40. *Шредингер Э.* Избранные труды по квантовой механике. – М.: Наука, 1976.
41. *Adams R.M.* Theories of Actuality. *Noûs.* – 1974. – 8 (3). – P. 211–231.
42. *Armstrong D.M.* A World of States of Affairs. New York: Cambridge University Press, 1997.
43. *Bird A.* Potency and Modality. *Synthese.* – 2006, 149: 491–508.
44. *Bene G., Dieks D.* A perspectival version of the modal interpretation of quantum mechanics and the origin of macroscopic behavior // *Foundations of Physics.* – 2002. – 32: 645–671.
45. *Blumenfeld D.* Leibniz's Theory of the Striving Possibles // *Studia Leibniziana*, 1973. Jahrgang V. S. 163–177.
46. *Bohm D.* A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables, I and II // *Physical Review.* – 1952. – 85: 166–193.
47. *Bohm D.* Wholeness and the Implicate Order. – London: Routledge. 1980.
48. *Bub J.* Interpreting the Quantum World. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
49. *Chakravartty A.* Scientific Realism. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2014 Edition) / Edward N. Zalta (ed.). URL: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/scientific-realism/>.
50. *Dirac P.A.M.* Why we believe in the Einstein theory // *Symmetries in Science*, B. Gruber and R.S. Millman (eds.). – New York: Plenum Press, 1980.
51. *Dewitt M.* Realism/anti-realism // *The Routledge Companion to Philosophy of Science* / M. Curd and S. Psillos (ed.). Routledge. – 2013.
52. *Dieks D.* Probability in modal interpretations of quantum mechanics // *Studies in History and Philosophy of Science. Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics.* – 2007. – 38(2). – 292–310.
53. *Dieks D.* Quantum mechanics, chance and modality // *Philosophica.* – 2010. – 83 (1). – P. 117–137.
54. *Divers J.* Possible Worlds. – London: Routledge, 2002.
55. *Ellis B.* Scientific Essentialism. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

56. *Everett III H.* "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of modern physics*. – 1957. – 29 (3). – 454.
57. *Fine K.* Essence and Modality // *Philosophical Perspectives* 8 / J. Tomberlin (ed.). – 1994. – 1-16.
58. *Fine K.* Varieties of Necessity // *Conceivability and Possibility* / T. Gendler and J. Hawthorne (eds.). Oxford Up. – 2002. – 253–281.
59. *Frigg R., Hartmann S.* Models in Science // *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2012 Edition) / Edward N. Zalta (ed.). URL: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>.
60. *Gell-Mann M., Hartle J.B.* Decoherent histories quantum mechanics with one real fine-grained history // *Physical Review A*. 2012, 85 (6), 062120.
61. *Hintikka J.* The Semantics of Modal Notions and the Indeterminacy of Ontology // *Synthese*. – 1970. – 21. – 408-424.
62. *Kripke S.A.* Naming and Necessity. – Harvard University Press, 1980.
63. *Lewis D.* On the Plurality of Worlds. – Oxford: Blackwell, 1986.
64. *Lewis D.* How many lives has schrödinger's cat? // *Australasian Journal of Philosophy*. – 2004. – 82 (1).
65. *Lombardi O., Castagnino M.* A modal-Hamiltonian interpretation of quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. – 2008. – 39 (2). – 380–443.
66. *Lombardi O., Dieks D.* Modal Interpretations of Quantum Mechanics. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2014 Edition) / Edward N. Zalta (ed.). URL: <http://plato.stanford.edu/archives/spr2014/entries/qm-modal/>.
67. *Loux M., Zimmerman D.* Introduction // *The Oxford Handbook of Metaphysics* / M.J. Loux, D.W. Zimmerman (ed.). – 1979.
68. *Loux M.J., Zimmerman D.W. (ed.)*. *The Oxford Handbook of Metaphysics*. – 2005.
69. *Lowe J.* The Possibility of Metaphysics: substance, identity and time. – Oxford: Clarendon Press, 1998.
70. *Mumford S.* Metaphysics // *The Routledge Companion to Philosophy of Science*, M. Curd and S. Psillos (ed.). – Routledge, 2013.
71. *Plantinga A.* The Nature of Necessity. – Oxford: Clarendon Press, 1974.
72. *Popper K.R.* A World of Propensities. – Bristol: Thoemmes Press, 1990.
73. *Rescher N.A.* Theory of Possibility: A Constructivistic and Conceptualistic Account of Possible Individuals and Possible Worlds. University of Pittsburgh Press, 1975.
74. *Saunders S. et al. (ed.)*. Many Worlds?: Everett, Quantum Theory, & Reality. – Oxford University Press, 2010.
75. *Suárez M. (ed.)*. Probabilities, Causes and Propensities in Physics. – Dordrecht: Springer, 2011.
76. *Fraassen Van B.C.* The Scientific Image. – Oxford: Oxford University Press, 1980.
77. *Fraassen Van B.C.* Quantum Mechanics. – Oxford: Clarendon Press, 1991.
78. *Vaidya A.* The Epistemology of Modality // *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2011 Edition) / Edward N. Zalta (ed.). URL: <http://plato.stanford.edu/archives/win2011/entries/modality-epistemology/>.
79. *Whitehead A.N.* Process and Reality. – New York, 1969.
80. *Wilson A.* Modal Metaphysics and the Everett Interpretation, 2006. URL: <http://philsci-archive.pitt.edu/2635/1/modalmetaphysicsandeverett.pdf>.
81. *Yourgrau W., Mandelstam S.* Variational principles in dynamics and quantum theory. – London: Pitman, 2000.

82. *Yagisawa T.* Possible Objects // The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Fall 2014 Edition) / Edward N. Zalta (ed.). URL: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2014/entries/possible-objects/>.
83. *Zurek W.H.* Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical // *Reviews of Modern Physics*. – 2003. – 75 (3). – 715.

MODAL APPROACHES IN METAPHYSICS AND QUANTUM MECHANICS

V.E. Terekhovich

Some interpretations of quantum mechanics use the notions of possible states or possible trajectories. We investigate how these interpretations correlate to metaphysical conceptions of the transition from potential to actual existence. The comparison is based on the discussion in contemporary analytic metaphysics of modality. We also consider an analogy between Leibniz's theory of the striving possibilities that tend towards existence, wave mechanics of Schrödinger and Feynman path integrals.

Key words: modal metaphysics, interpretation of quantum mechanics, possible quantum states, possible existence.

ИЗ НАСЛЕДИЯ ПРОШЛОГО

ЛЕКЦИИ ПО ОСНОВАМ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ (ТЕОРИЯ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, 1939 г.)

*(Фрагменты из лекций, опубликованных в книге Л.И. Мандельштама
«Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике». –
М.: Наука, 1972. – С. 331–337, 377–383)*

Академик Л.И. Мандельштам

Нас будут интересовать не математическая сторона дела, не решение конкретных задач. Мне кажется, что желательнее обсудить некоторые принципиальные вопросы, касающиеся основ волновой механики. Дело это благодарное, но нелегкое. Разумеется, я не могу взять на себя задачу систематического исчерпывающего изложения. Это было бы чрезвычайно трудно, и мое изложение, по необходимости, будет фрагментарным.

Ключевые слова: квантовая механика, волновая функция, вероятность, измеримость, макроскопические параметры.

Часто делают упрек волновой механике, говоря, что это чистая математика. Это не совсем справедливо. Путь волновой механики действительно был таким, что сначала шла математика. Но я не вижу, чем этот путь хуже классического, *если в дальнейшем связь с природой найдена*. Во всяком случае, *до или после установления уравнений установление такой связи необходимо*, без этой связи само уравнение не может претендовать на название физической теории. И здесь действительно лежит корень того, что, я считаю, недостаточно ясно излагается в учебниках и в литературе и что повело к очень многим неясностям.

Начнем со следующего.

В настоящее время установили (или думают, что установили), что $|\psi|^2 dx$ – вероятность нахождения частицы в интервале $(x, x + dx)$. А что такое x ? x – координата. Так вот, и в первом утверждении, и во втором есть некоторый самообман.

Можно, по-видимому, сказать следующее. Квантовая механика совершенно правильно рвет с предрассудком, что законы макромира действи-

тельны и в микромире. Но последовательно она проводит эту точку зрения (во всяком случае, в явном виде, в учебниках) только для второй части теории (математической) и не учитывает в достаточной мере, что и рецепты перехода тоже должны быть даны иными, чем в классике. Наша задача и будет состоять в том, чтобы выяснить, что имеют в виду в квантовой механике, когда говорят об измерении той или иной величины.

Если я в классике говорю, что x есть координата данной материальной точки, то за этим определением стоит вполне ясный, конкретный рецепт: если я установлю соответствующим образом твердый масштаб с нанесенными по определенному рецепту делениями, то x – это число на том делении, с которым в данный момент совпадает моя точка. Понятие «совпадает» для макромира считается известным. И поскольку это так, мы действительно установили рецепт для перехода от символа x к реальным объектам (материальная точка, твердое тело – масштаб и т. д.). Такого рода рецепты мы называем измерениями.

Поскольку, однако, речь идет о молекулярных вопросах, такие рецепты не выполнимы принципиально, а не только практически (*элементарность* понятия «совпадение» стоит под вопросом из-за воздействия прибора). Поэтому, назвав x координатой, я не установил связи x с природой, я только сделал вид, что установил эту связь, сославшись на макромир. С такими «определениями» теория еще висит в воздухе. Правильнее было бы даже и называть x не координатой, а, например, квазикоординатой.

Далее, говорят, что $|\psi|^2$ – вероятность. Допустим, что мы знаем, как измерить x (в действительности, на нашей стадии рассмотрения, – не знаем). Тогда создается впечатление, что смысл $|\psi|^2$ уже вполне ясен. Однако здесь имеется недоговоренность, и, прежде чем перейти к рассмотрению всех этих вопросов, нужно остановиться еще на одной стороне дела.

Волновая механика – статистическая теория. Но говорить о статистике и о вероятности можно, только имея определенную совокупность элементов, к которой эта статистика относится. В волновой механике такой совокупностью является совокупность повторных опытов (каждый индивидуальный опыт есть ее элемент), причем повторение должно происходить при одних и тех же условиях. Именно к такой совокупности относятся вероятностные высказывания, о которых говорилось выше. Необходимо подчеркнуть, что и всякая классическая теория по существу также является статистической, и в этом пункте нет принципиального отличия волновой механики. Если бы теория давала высказывания только для одного опыта, она не имела бы ценности. Но классика, например классическая механика, утверждала, что возможны сколь угодно узкие распределения для всех исследуемых величин. Таким образом, разница – в *time* статистики, а не в самой статистичности.

В обоих случаях, и в классической теории, и в волновой механике, мы имеем дело с большой совокупностью элементов и некоторым признаком. Назовем эту совокупность, над которой продельвается статистическая обработка, коллективом. Коллектив должен быть как-то выделен, иначе теряет

смысл постановка любого вопроса о нем. Так вот, говорят, что $|\psi|^2$ – вероятность. Но в каком коллективе? Если это не указать, то возможны всякие неясности и парадоксы. «Средний рост человека такой-то», – без указания коллектива это утверждение вообще не имеет смысла. Рассказывают, что однажды захотели определить среднюю величину семьи по результатам ответа на вопрос, сколько детей у ваших родителей. Очевидно, это не может дать средней общей величины, так как семья без детей автоматически не учитывается. Замечу, что полемика Эйнштейна и Бора вызвана именно грубой ошибкой в вопросе о коллективе. Я не встречал достаточно четкого определения коллектива, в котором берется ψ -функция. Уточнить этот коллектив – первое, что нам нужно сделать.

Разумеется, и в классике мы сталкиваемся с тем же вопросом. Мы можем говорить о максвелловском распределении скоростей только при постоянной температуре. Если температура изменяется, то распределение будет совсем другое. То же самое имеет место и в тех классических задачах, в которых не говорят о коллективе. Я уже сказал, что любой опыт классики есть тоже статистический опыт, ибо только он имеет смысл. Пусть, например, мы наблюдаем движение маятника и ставим задачу уравнением $m\ddot{x} + \alpha x = 0$. При этом мы фиксируем α , то есть предполагаем, например, что температура и ускорение силы тяжести не меняются. Таким образом, при всяком теоретическом рассмотрении *условия опыта* надо определить, и это определение всегда может быть сведено к фиксации некоторых параметров.

Мы подошли к тому, что я считаю наиболее существенным и важным. А именно волновая механика утверждает, что для *определения микромеханического коллектива, к которому и относится ψ -функция, достаточно указать (фиксировать) макроскопические параметры.*

Если, например, в эвакуированной трубке из накаленной нити, к которой приложено известное напряжение, летят электроны, то их поведение подчиняется волновой механике. Элементом совокупности, о которой здесь идет речь, является поведение отдельного электрона, например его попадание в ту или иную точку анода или экрана. К этим элементам относится определенная функция ψ , то есть этой функцией и задается статистика вылетающих электронов. Но для того, чтобы электронный коллектив был выделен, должны быть фиксированы напряжение, температура нити, ее конфигурация и т. д., то есть определенные *макроскопические* параметры. Если вы нарушите один из параметров, то вы получите другое значение ψ или, может быть, вообще никакого ψ не получите.

Таким образом, предпосылкой применения волновой механики является экспериментальная установка, *контролируемая классическими измерениями.*

Теперь, после того как мы определили свою микростатистику макроскопическими условиями, мы должны обратиться к вопросу о том, что же мы называем в квантовой механике координатой, а также импульсом, скоростью и т.д. Здесь волновая механика идет не обычным путем, но путем, чрезвычайно для нее характерным.

Из математических величин, входящих в уравнение Шрёдингера, она строит другие величины и утверждает, что именно для этих последних должны быть даны рецепты, устанавливающие связь с реальными вещами. Путь построения этих новых величин состоит в том, что каждой физической величине сопрягается соответствующий ей эрмитов оператор; операторы имеют свои собственные значения, и вот для этих-то собственных значений и должны быть даны измерительные рецепты.

Собственным значениям отвечают собственные функции оператора. Утверждается: если у вас есть некоторая функция ψ , которая не является собственной функцией оператора, то ее следует разложить по собственным функциям, и тогда, как утверждает волновая механика, квадраты модулей коэффициентов такого разложения дают вероятности того, что рассматриваемая величина даст при измерении соответствующие собственные значения.

Все это – общеизвестные математические правила. С их помощью образуются новые величины, которые и надлежит связать потом с объектами природы. Вот этого-то и не делают в обычных изложениях, то есть не дают рецептов связи – не осуществляют второй части всей программы. Отсюда сразу же возникают все неприятности и неясности.

Для импульса p мы имеем оператор $\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}$. Следовательно, для определения собственных значений p' оператора p мы имеем уравнение

$$\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} = p' \varphi. \quad (4)$$

Это уравнение решается для любого p' , так что собственными функциями будут функции

$$\varphi = e^{\frac{i}{\hbar} p' x}. \quad (5)$$

По только что высказанному постулату волновой механики это означает, что измерение может привести к любому значению p' . Вообще говоря, если волновая функция не совпадает с какой-либо из собственных функций, $\psi \neq \varphi$, то определенного импульса нет. Лишь в том случае, когда ψ – собственная функция p , система обладает определенным импульсом, а именно p' . Однако всякая функция ψ может быть разложена в интеграл Фурье, а тогда квадрат модуля коэффициента Фурье дает плотность вероятности каждого значения p' ⁴¹. Заметим, что таким образом между p и x устанавливается точ-

⁴¹ На первый взгляд может показаться, что x является исключением из описанной процедуры. Но это не так, x тоже является оператором. Им служит умножение на x . Таким образом, уравнение для определения собственных функций здесь имеем вид $x\psi(x) = x'\psi(x)$. Если ввести функцию Дирака $\delta(x - x')$, то она и будет собственной функцией x при собственном значении x' . Для любой $\psi(x)$ имеем тогда разложение по собственным функциям, в котором коэффициенты разложения из-за особых свойств собственных функций будут опять $\psi(x)$:

но такая же связь, как между v и t в классике. Там мы уже видели, как связаны функция $f(t)$ и ее спектр $g(v)$, и здесь мы получаем то же самое: если ψ такова, что $|\psi(x)|^2$ дает очень острое распределение, скажем, около значения x' , то уже невозможно, чтобы значение p' было каким-то определенным.

Значит, если мы так постулируем вид операторов, то еще до всяких уравнений Шрёдингера в самом определении величин, с которыми оперирует теория, исключается возможность одновременных точных значений x и p . Положение совершенно такое же, как в классике: «частота в данный момент» – это абсурд, независимо от того, справедливы ли максвелловы уравнения или какие-нибудь другие. Дело в определении самих величин. Обычно говорят, что соотношение неопределенностей возникает из-за взаимодействий измерителя и измеряемого объекта. Вы видите, что это соотношение возникает с самого начала, еще до вопроса об измерении. Однако взаимодействие измерителя и измеряемого объекта играет решающую роль в вопросе об адекватности величин, с которыми оперирует теория, реальным объектам. К этой стороне дела мы и перейдем, но в заключение – еще одно замечание по поводу предшествующего.

Почему мы называем p импульсом? Здесь ведь опять самообман: берется прежнее слово, и это создает видимость какого-то содержания, то есть невольно, как и в случае координаты, подразумеваются прежние измерительные рецепты. Но пока у нас нет этих рецептов, и потому лучше всего было бы не пользоваться старыми терминами.

Соотношение неопределенностей нас потому и смущает, что мы называем x и p координатой и импульсом и думаем, что речь идет о соответствующих классических величинах. Называйте x и p квазикоординатой и квазиимпульсом. Тогда имеющееся между ними соотношение будет так же мало смущать, как соотношение между v и t .

Итак, нам нужно теперь установить связь между этими математическими символами, входящими в уравнение Шрёдингера, и объектами природы. Для физика установить такую связь – это означает измерить, дать те конкретные рецепты, согласно которым из реальных вещей извлекаются численные значения теоретических величин. Эти рецепты могут быть сложными, состоящими из многих звеньев. В конечном счете это сводится к тому, чтобы дать эталон (например, масштаб) и способ его употребления (например, последовательное прикладывание). И то и другое нам понятно и близко лишь в макромире. Даже мысленно мы можем проделывать измерительные манипуляции только с макротелами. Я думаю поэтому, что *последнее звено необходимых нам измерительных рецептов обязательно макроскопическое*. Это мне кажется основным положением теории. Если бы дело обстояло не так, то я просто не вижу, как связать математические символы волновой механики с реальными объектами, а ведь без такой связи вообще нет физиче-

$\psi(x) = \int \psi(x')\delta(x - x')dx'$, и по общему правилу получаем, что $|\psi(x)|^2$ есть вероятность того, что $x = x'$.

ской теории. Поэтому, по крайней мере в настоящее время, мне кажется необходимым принять это положение.

Может случиться, что уже в первом звене мы имеем сведение микровеличин на макрообъекты. Пусть, например, от нагретого катода летят электроны. Допустим, что состояние этих электронов описывается некоторой функцией ψ . Если электроны падают на пластинку и оставляют на ней пятна, то координату пятна я могу, по определению, считать координатой электрона. Статистика пятен должна описываться тогда функцией $\psi(x)$. И мое утверждение, что $|\psi(x)|^2$ есть вероятность нахождения электрона в точке x , приобретает теперь вполне конкретный смысл, так как величина x мною определена при помощи классических объектов. Такого рода случаи, когда измерение происходит в первом же звене, можно назвать *прямыми измерениями*. Но таких прямых опытов очень мало, и мне кажется, что это принципиальный и глубокий момент. Я думаю, что прямые измерения вообще возможны лишь для *свободных* или почти свободных частиц в слабых полях.

Но мы хотим толковать символы x и ψ также и в случае водородного атома. В нем не поставить фотопластинку, да и не в том дело, что это практически неосуществимо. Я думаю, что в нем она могла бы и не почернеть. Поэтому я здесь лишен возможности дать определение координаты частицы на основании классических измерений. В таких случаях мы можем производить *косвенные* измерения, применяя некоторые посторонние частицы. Поэтому в рецепт войдут промежуточные звенья, которые, разумеется, могут быть не макроскопическими. Я должен, как будет видно ниже, идти по этому пути, пока не дойду до такого этапа, где стык с классикой несомненен. Но в конечном этапе вспомогательные частицы должны оказаться свободными.

Конечное звено всякого измерения есть классическое измерение потому, что оно должно сводиться к констатации совпадения «материальных точек» (деления на масштабе, стрелки и т. п.). Неудовлетворительность такого положения вещей заключается в том, что общего рецепта для указанного перехода я дать не могу. Отсюда видно, насколько существенно изучить косвенные измерения.

Итак, поставив вопрос о том, как же волновая механика устанавливает связь математических символов с реальными объектами, мы пришли к задаче – дать теорию косвенных измерений. Это необходимо, так как мы уверены, что прямые измерения являются исключением и что их исключительность не случайна, а имеет глубокий принципиальный характер.

Дополнение

Ряд положений квантовой механики чрезвычайно сильно отличаются от того типа положений, к которым мы привыкли в классике. Это отличие настолько велико, что часто говорят о новом физическом мировоззрении. Я хотел бы уже сейчас отметить (к этому я вернусь ниже), что, по моему

мнению, *принципы* построения квантовой теории, или, если так можно выразиться, структура той рамы, которой квантовая теория обрамляется, та же, что и в любой другой физической теории. Но нельзя отрицать, что структура самой картины весьма отлична от классики, и утверждение, что мы здесь имеем дело с новым физическим мировоззрением, вряд ли можно считать преувеличением. Именно поэтому небезынтересно постараться, во-первых, проанализировать те моменты, которые определяют новизну квантовой концепции, и, во-вторых, уяснить себе связь между отдельными ее положениями. Такой анализ, мне кажется, не лишен интереса и сам по себе. Но, кроме того, он дает ответ на следующий вопрос, который всегда возникает и, естественно, должен возникать. Это вопрос относительно того, насколько тесно связаны те стороны теперешней, фактически построенной квантовой теории – я имею в виду в основном нерелятивистскую теорию, – которые обуславливают ее бесспорную силу и громадное значение для решения конкретных проблем, с теми ее общими положениями, которые придают ей ее революционный характер. Среди физиков встречается мнение, что эти последние лишь провизорны и что в будущем удастся, не нарушая действительности квантовой теории, свести ее общие положения к положениям классического типа. Ответ на поставленный выше вопрос должен внести здесь ясность.

Я хотел бы указать, что этот вопрос по существу был поставлен и разрешен Нейманом. Результаты его работы обычно приводят без доказательства и в чрезвычайно схематичной форме. Например, говорят, что Нейман *доказал* невозможность построения физической теории на детерминистической основе. По моему мнению, такая и ей подобные формулировки мало что говорят. Так как, насколько я могу судить, исследования Неймана мало известны, то я считал бы не бесполезным вернуться к этому и аналогичным вопросам. Базируясь в основном на работах Неймана, я, однако, в ряде доказательств, а также в выборе для рассмотрения тех или иных вопросов не всегда буду придерживаться его изложения.

Но предварительно я хотел бы сделать следующее замечание. Квантовая теория, во всяком случае в ее современном виде, по существу теория атомистическая в том смысле, что она относится к явлениям в микромире, которые, согласно атомистической гипотезе, лежат в основе явлений макромира. Здесь не место останавливаться на вопросе о том, почему мы кладем в основу физического мирозерцания именно атомистическую теорию. Несомненно, что в настоящее время атомизм считается обоснованным больше, чем когда бы то ни было прежде, и по этому поводу никаких вопросов, вообще говоря, не возникает. Возражение вызывает лишь отсутствие в отношении к микромиру квантовой теории того, что называется наглядностью. Это отсутствие наглядности есть одна из причин, заставляющих иногда считать всю квантовую концепцию, как это уже указывалось выше, провизорной. Однако, на мой взгляд, эта точка зрения весьма поверхностна и основана на недоразумении. Не «ненаглядность» сама по себе придает квантовой

теории ту новизну, специфичность и то отличие от классики, о которых идет речь в дальнейшем.

По поводу отсутствия наглядности я хочу все же заметить следующее. Понятие наглядности вообще чрезвычайно условно. В него входят, по существу, два элемента. Во-первых, чтобы что-нибудь было наглядно, оно должно быть привычно; в этом и лежит условность этого понятия. Затем необходимо, чтобы наглядная концепция связывалась с вещами, могущими быть непосредственно чувственно воспринятыми.

Вообще говоря, нет никакого основания требовать от новой теории, чтобы она удовлетворяла этим двум условиям. Насколько такого рода требование не обоснованно, с одной стороны, и подвержено эволюции – с другой, хорошо видно на известном примере развития классических теорий. Здесь механические явления были прежде других изучены, сделались привычными. Эти же явления легко воспринимаются зрением, осязанием и т. д. И вот, начиная примерно со времен Ньютона, ко всякой теории, хотя бы она относилась уже явно к немеханическим явлениям, как-то: к оптической теории, теории тепла и т. д., – предъяснялось требование наглядности, выражавшееся в конечном счете в требовании сведения оптических, тепловых и т. д. явлений к явлениям механическим. В своем знаменитом «Traite de la lumiere» Гюйгенс, например, писал: «...au moins dans la vraie philosophie, dans la-quelle on concoit la cause de tous les effets naturels par des raisons de mecanique. Ce qu'il faut faire a mon avis, ou bien renoncer a toute esperance de ne jamais rien comprendre dans la physique». (Изд. Gautier-Villars, 1920, стр. 3)⁴².

Ньютон в предисловии к первому изданию «Principia» говорит (перевод А.Н. Крылова, стр. 3): «Было бы желательнее вывести из начал механики и остальные явления природы, рассуждая подобным же образом, ибо многое заставляет меня предполагать, что все эти явления обуславливаются некоторыми силами, с которыми частицы тел вследствие причин, покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга. Так как эти силы не известны, то до сих пор попытки философов объяснить явления природы и остались бесплодными». То, что Ньютон имеет здесь в виду и световые явления, становится ясным в отделе XIV первой книги «Principia», где он подробно излагает с этой точки зрения отражение и преломление света, а в отделе VIII второй книги опять упоминает о свете в связи с теорией распространения волн.

И в XX в. лорд Кельвин говорил, что для него понять физическое явление – значит построить механическую его модель.

Если вдуматься в это требование, которое казалось естественным в течение ряда веков, то трудно найти для него какое бы то ни было обоснование. Действительно, теоретическая механика – по существу это механика

⁴² [«...По крайней мере в истинной философии, в которой источник всех явлений природы усматривают в механических причинах. На мой взгляд, это и нужно делать или же отказаться от всякой надежды когда-либо понять что-нибудь в физике».]

Ньютона – это система некоторых определенных дифференциальных уравнений второго порядка между математическими величинами (x, y, z, t) в связи с рецептами для сопоставления этих величин с физическими объектами.

И то и другое, то есть и указанные выше специальные дифференциальные уравнения, и специальные рецепты, приурочено к определенному классу явлений, именно к тем, которые мы называем механическими, то есть к явлениям, связанным с перемещениями, скоростями и т. д. макроскопических тел.

Оптические, тепловые и другие явления заведомо в этот класс не входят. Весьма естественно, что и для этих явлений могут быть построены теории по такому же принципу, как и в механике, то есть могут быть найдены математические соотношения между некоторыми величинами в связи с рецептами измерений соответственных величин. Но совершенно не очевидно, и более того – маловероятно, чтобы эти соотношения, например дифференциальные уравнения, регулирующие оптические явления, были тождественны с механическими уравнениями Ньютона. А ведь именно на это сводится требование «наглядности», то есть механического объяснения оптических и других явлений⁴³.

И действительно, как известно, в классике от такого требования, которое является чистым предрассудком, отказались совершенно. Пример – максвелловская теория электромагнитных и оптических явлений.

Я думаю, всякий физик теперь согласится с тем, что максвелловская теория автономна (она вполне удовлетворяет тем требованиям, которые мы разумным образом к теории можем предъявлять), мы к ней привыкли и никакой дальнейшей дополнительной наглядности, как-то: сведения на механику, которое оказалось невозможным, – не требуем; в этом смысле мы считаем ее совершенно равноценной механике Ньютона.

Возвращаясь к квантовой механике, мы видим, что здесь повторяется *mutatis mutandis*, аналогичная ситуация. Прежняя, доквантовая, классическая атомистика молчаливо всегда предполагала (по-видимому, в угоду наглядности), что в микромире справедливы те же соотношения, какие воспринимаются нами в макромире. Те, кто жалуется на «ненаглядность» квантовой механики, полагают, по-видимому, справедливым требование, чтобы этому пути следовала атомистическая теория, и считают недостатком квантовой теории то, что она по этому пути не идет. Я думаю, это неправильно. Не недостатком, а достоинством квантовой механики следует считать то, что она порвала с предрассудком о тождественности закономерностей в микромире и закономерностей в макромире и тем самым и с предрассудком о желательности «наглядности» в описании явлений в микромире.

Всякая атомистическая теория, в том числе и квантовая, ставит себе в основном задачу объяснить наблюдаемые закономерности в макромире ис-

⁴³ Известное замечание, что в конце концов все наши измерения сводятся на констатацию пространственных и временных совпадений, к этим вопросам непосредственного отношения не имеет.

комыми закономерностями в микромире. Почему такое сведение нас удовлетворяет, почему мы его называем объяснением процессов макромира, – это другой вопрос. На нем я останавливаться здесь не могу. Скажу только, что, по моему мнению, для такой точки зрения веские основания привести можно. Но как бы там ни было, а из этой формулировки задачи мы должны исходить. Нельзя отрицать, что атомная теория может в известном смысле, по крайней мере частично, решать эту задачу и в том случае, если эта теория исходит из положения, что атомы и молекулы подчиняются тем же законам, как и макротела, то есть, например, что они упруги, что для них справедливы законы движения Ньютона и т.д. На этой основе строилась, например, классическая кинетическая теория газов. Правда, нужно оговориться, что кинетическая теория газов вводит существенные статистические *добавочные* предположения, которые чужды механике Ньютона (но и на этом вопросе я сейчас останавливаться не буду). Как бы там ни было, *предполагалось*, что для молекул справедлива механика Ньютона и что в основном она определяет явления.

Нельзя, конечно, отрицать, что классическая кинетическая теория дала много интересных результатов. Но, с другой стороны, нужно признать, что всякая атомистическая теория, оперирующая в качестве молекул или атомов объектами, которым приписываются свойства и поведение макротел, не может быть признана удовлетворительной. Мы ведь ставим себе в этих теориях задачу – объяснить свойства и поведение макротел поведением и свойствами конституирующих их микротел. Но тогда непоследовательно этим последним приписывать свойства, которые мы намереемся объяснить.

Если же – и это делает квантовая теория – признать, что микротела подчиняются другим законам, чем макротела, для объяснения свойств которых эти микротела вводятся, такой regressus⁴⁴ по существу ad infinitum⁴⁵ отпадает. Конечно, можно и здесь спросить себя, нельзя ли ввести в рассмотрение дальнейшие микро-микротела. Однако никакой необходимости в такой постановке вопроса здесь уже нет, в то время как при доквантовой постановке она неизбежно возникает.

Резюмируя, можно сказать следующее.

Уже в классике долго держался предрассудок, что задача теоретической физики заключается в сведении всех явлений к механическим. Мы видели, что это действительно не что иное, как предрассудок, возникший благодаря тому, что механические явления были раньше других изучены и поэтому более привычны.

Как и следовало ожидать, механическая интерпретация оптических, электромагнитных и других явлений фактически оказалась невыполнимой. Мы привыкли, например, к максвелловской теории и уже никакой потребности в таком сведении не ощущаем.

⁴⁴ [Процесс сведения.]

⁴⁵ [Продолжающийся до бесконечности.]

По отношению к квантовой теории ситуация аналогична. Выставляется требование свести законы микромира на привычные классические законы, относящиеся к макромиру. Это требование, переходящее в конечном счете в требование, чтобы здесь были справедливы те же дифференциальные уравнения и те же рецепты перехода к физическим объектам, как в классике, так же беспочвенно, как было беспочвенно требование свести оптику на механику. Более того, не только нет оснований считать такое сведение возможным, но, наоборот, есть основание считать его, если бы оно даже было возможным, неудовлетворительным.

Итак, сам факт отличия квантовых законов от классических не требует оправдания. Отличие естественно и ни в коем случае не есть минус теории.

Совершенно другой вопрос: насколько отличаются и отличаются ли вообще общие принципы построения квантовой теории от тех принципов теоретико-познавательного характера, которые лежали в основе физических теорий классического периода? На этот вопрос, о котором я упомянул в самом начале, мне кажется, нужно ответить отрицательно.

Всякая физическая теория может быть расчленена на следующие этапы.

Прежде всего теория вводит, в зависимости от той или иной области физических явлений, к которым она относится, те или иные математические величины. Например, в механике такими величинами являются координаты, скорость, время и т.д.; в учении о теплоте – температура, количество тепла, энтропия и пр.; в электродинамике – электрическое и магнитное поля. Между этими величинами устанавливаются математические соотношения, например, в виде дифференциальных уравнений: механические уравнения Ньютона, электродинамические – Максвелла. Этот этап, который иногда сам по себе носит название физической теории, ею ни в коем случае не является, так как вообще не содержит никаких высказываний, относящихся к физическим явлениям. Второй этап состоит в сопоставлении математических величин с физическими объектами. Это достигается тем, что для каждой величины дается определенный рецепт, указывающий, при помощи какого приема мы можем данному физическому объекту сопоставить то или иное численное значение этой величины. Мы называем это рецептом измерения данной физической величины. Наконец, те же рецепты служат для обратного перехода от новых значений величин, полученных из первых при помощи указанного выше формального математического аппарата, опять к физическим объектам.

Пример лучше всего пояснит сказанное. Мы измеряем, например, положение планеты в данный момент времени. Рецепт таков: мы отсчитываем соответственные деления лимба трубы, когда пересечение окулярных нитей совпадает с данной планетой, и одновременно положение стрелки часов, то есть мы определяем значение угловых координат в данный момент времени. Затем мы подставляем полученные таким образом числа в соответственные уравнения в качестве начальных условий. Уравнения дают нам новые совместные значения координат и времени (t, φ, ψ) . Высказывание теории за-

ключается в утверждении, что, установив трубу соответственно с полученными из этих уравнений значениями делений кругов, мы увидим планету на пересечении нитей одновременно с прохождением стрелки часов через число на циферблате, равное t . Только совокупность всех указанных этапов и составляет теорию.

Формализм, то есть математические соотношения между символами, сами математические символы и рецепты сопоставления их с физическими объектами от теории к теории различны; но указанные этапы и их совокупность характерны для всякой теории. Под эту структуру подходит и классика, и квантовая теория.

На одно, правда, принципиально малосущественное различие я хотел бы еще указать. Исторически в классике установление рецептов измерения значений величин обычно предшествовало установлению формализма, то есть уравнений. Больше того, мы так сжились с этими рецептами издавна, что почти не замечаем их условности и принципиального значения. Поэтому-то их часто вовсе не причисляют к составным частям теории, что, конечно, как сказано, ошибочно. В противоположность этому в современной теоретической физике и особенно в квантовой теории рецептурная часть гораздо менее привычна и занимает большее место.

Более того, в современной теории квантов дело обстоит исторически так, что на основании некоторых довольно расплывчатых соображений установили сначала формализм – я имею в виду уравнение Шрёдингера – по отношению к некоторому символу, к так называемой функции ψ . И только после этого поставили себе вопрос: какой нужно дать рецепт для сопоставления ψ объектам природы? Как известно, современный рецепт этой связи был установлен не сразу, а только после некоторых проб, оказавшихся неудачными.

LECTURES ON THE FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS

L.I. Mandelshtam

(Excerpts from lectures published in Leonid Mandelshtam's book Lektsii po optike, teorii otноситelnosti i kvantovoi mekhanike [Lectures on Optics, the Relativity Theory and Quantum Mechanics]. Moscow, Nauka Publishers, 1972, pp. 331-337 and 377-383.)

In place of a summary: We will be interested not in the mathematical aspect of the matter nor in the solution of specific problems. It seems to me that it would be more desirable to discuss some issues of principle relating to the foundations of wave mechanics. This is a gratifying but difficult matter. Certainly I cannot undertake to provide a systematic exhaustive exposition of the subject. This would be exceedingly difficult, and my exposition will of necessity be fragmentary.

Key words: quantum mechanics, wave function, probability, measurability, macroscopic parameters.

К ВОПРОСУ О ПРАВОМЕРНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОНЯТИЙ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ В ФИЗИКЕ МИКРОМИРА*

(Статья из сборника избранных трудов И.С. Алексеева
по методологии физики «Деятельностная концепция познания и реальности». –
М.: Руссо, 1995. – С. 220–227)

И.С. Алексеев

В ряде работ, появившихся на страницах научных журналов за последние несколько лет, предлагается гипотеза об исключительно макроскопической природе пространственно-временных представлений и неприменимости их в физике микромира как характеристик способа существования отдельных микрообъектов. Так, Е. Циммерман утверждает, что «пространственно-временное описание может считаться законным только для макроскопических систем»⁴⁶, что же касается микроскопических систем, то они «должны быть описаны в абстрактных понятиях (заряд, спин, масса, странность, квантовые числа), которые не имеют никакого отношения к пространству и времени»⁴⁷. Видный американский физик Дж. Чу выдвигает тезис: «Понятия пространства и времени играют в современной микрофизике роль, аналогичную роли эфира в макроскопической физике конца XIX в. Никогда не будет возможно продемонстрировать, что пространственно-временной континуум *не может* существовать, но все большее число нас (ученых-физиков. – И. А.) приходит к выводу, что для достижения решающего успеха нам нужно перестать думать и говорить о таком ненаблюдаемом континууме»⁴⁸. Японский физик Т. Тати, строя «беспространственно-временное описание природы», также рассматривает пространство-время не как основное понятие, а как производное, имеющее смысл только в области экспериментальных фактов, но непригодное для характеристики способа существования объектов на микроуровне⁴⁹.

Успешное осуществление этой программы, если оно будет иметь место, очевидно, повлечет за собой значительное изменение философского статуса категорий пространства и времени. В такой ситуации задача заключается в том, чтобы, критически проанализировав тенденции современной физики к

* Пространство и время в современной физике. – Киев, 1968. – С. 259–265.

⁴⁶ Zimmerman E. The macroscopic nature of space-time // American journal of physics. – 1962. – Vol. 30. – № 2. – P. 97.

⁴⁷ Ibid. – P. 101

⁴⁸ Chew G. The dubious role of the space-time continuum in microscopic physics // Science progress. – 1963. – Vol. 51. – № 204. – P. 529.

⁴⁹ Tati T Concepts of space-time in physical theories. Non spatiotemporal description of nature // Progress of the theoretical physics. – 1964. Supplement № 29. – P. 7.

отказу от использования понятий пространства и времени в описании и объяснении микромира, во-первых, выявить и четко сформулировать соображения, служащие основанием для отказа, и, во-вторых, проверить обоснованность этих соображений.

Прежде всего встает вопрос: почему понятия пространства и времени перестают работать в физике микромира? Дж. Чу отвечает на него, указывая на ненаблюдаемость пространственно-временного континуума, или, выражаясь более точно, на невозможность измерения положения микрообъекта с произвольной точностью: «Релятивистская эквивалентность массы и энергии устанавливает абсолютный предел нашей способности определять положение. Если фотон (или любая другая частица, используемая в качестве пробной) имеет энергию, большую, чем энергия, связанная с массой покоя частиц, с которыми он взаимодействует, то тогда при измерительном столкновении рождаются новые частицы, и вся ситуация изменяется. Мы даже не можем сказать, что объект, положение которого мы измеряем, существует»⁵⁰. Е. Циммерман, ссылаясь на работы Е. Вигнера, также указывает, что для микрообъектов «невозможно измерить (или определить операционально) временные промежутки и расстояния в пространстве с точностью, даже отдаленно приближающейся к той, которая допускается принципом неопределенности»⁵¹.

Итак, по мнению физиков, основанием для отказа от понятий пространства и времени является невозможность их операционального определения, то есть невозможность определения с произвольной точностью промежутков времени (характеристик длительности явлений) и расстояний (характеристик протяженности). Невозможность такого измерения – это надежно установленный и обоснованный теоретический факт. Однако обоснованность логического перехода от суждения о невозможности измерения пространственных и временных промежутков к требованию отказа от понятий пространства и времени вызывает вполне понятные сомнения и возражения со стороны большинства философов и физиков. На чем же основаны эти возражения?

Например, В.И. Свидерский базирует свои возражения на положении об абсолютности пространства и времени, которую «в общем смысле следует понимать как всеобщность, непреложность, обязательность этих форм для существования всех состояний материи»⁵²; поэтому «ограниченность наших естественнонаучных макроскопических представлений о пространстве и времени и неприменимость их в старом виде к процессам в микромире отнюдь не означает неистинности этих понятий в применении к открываемым

⁵⁰ Chew G. The dubious role... – P. 530.

⁵¹ Zimmerman E. The macroscopic nature of space-time. – P. 99.

⁵² Свидерский В. И. Философское значение пространственно-временных представлений в физике. – Л., 1956. – С. 304.

наукой качественно новым областям материального мира, а означает лишь необходимость конкретизации и раскрытия содержания этих понятий»⁵³.

Анализ этих и подобных им возражений показывает, что все они основываются (если отбросить доводы типа *argumen-tum ad hominem*) на предположении об абсолютности пространства и времени, то есть на предположении, которое как раз и нуждается в доказательстве. Таким образом, если положение об абсолютности пространства и времени принято как постулат, истинный по определению, то все аргументы, противоречащие этому постулату, заранее оказываются ложными. Как же можно проверить обоснованность самого постулата?

Здесь открываются два пути. На первом, по которому обычно идут все доказательства, апеллируют к истории науки, показывая, что все физические теории, в том числе и современные, используют понятия пространства и времени в качестве основных физических понятий. Это – путь эмпирического обоснования тезиса о всеобщности пространства и времени. Действительно, практика научной работы до сих пор всегда опиралась на пространственно-временные представления как на исходные. Особенно это было характерно для науки XIX в., развитие которой давало полное право считать пространство и время универсальными формами бытия материи.

Однако уже развитие квантовой механики положило начало сомнениям относительно обязательности пространственно-временного способа описания природы. Достаточно вспомнить, например, неоднократные высказывания Н. Бора об ограниченной применимости пространственно-временных понятий⁵⁴, особенно резко формулировавшиеся в 20-е гг., когда Н. Бор говорил о матричном варианте квантовой механики, о том, что в «противоположность обычной механике новая механика не имеет дела с описанием движения элементарных частиц в пространстве и времени»⁵⁵.

В научной практике за последние годы намечается известный отход от признания абсолютности пространственно-временных представлений. Та же практика, таким образом, может служить и для обоснования мнений о неабсолютности пространственно-временных представлений, особенно в случае успеха обсуждающейся гипотезы. Кроме того, следует заметить, что эмпирическое обоснование всеобщности гарантирует эмпирическую же всеобщность, никак не могущую претендовать на абсолютность.

Второй путь проверки обоснованности предположения об абсолютности пространства и времени – это анализ истории науки с целью выявления предпосылок применимости указанных понятий в различных ее областях. Он, в частности, предполагает и уточнение смысла понятий категорий пространства и времени.

⁵³ Свидерский В. И. Философское значение... – С. 282.

⁵⁴ Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. – М., 1961. – С. 145.

⁵⁵ Бор Н. Атомная теория и механика // Успехи физических наук. – 1926. – Т. 6. – Вып. 2. – С. 108–109.

В нашей философской литературе принято восходящее к Г. Лейбницу понимание пространства как характеристики способа существования материальных объектов и времени как характеристики способа смены, изменения состояний объектов. Дополнительно к этому предполагается, что пространственные отношения между сосуществующими объектами характеризуются протяженностью, а временные отношения между сменяющимися состояниями – длительностью; иными словами, пространство немислимо без протяженности, а время – без длительности⁵⁶. Считается справедливым и обратное – наличие протяженности предполагает наличие пространства, наличие длительности – времени, так что понятия «протяженность» и «пространство», «время» и «длительность» можно считать равноправными. Если это так, для доказательства абсолютности пространства достаточно показать абсолютность протяженности, а для доказательства абсолютности времени – абсолютность длительности. Доказательство неприменимости понятия протяженности, очевидно, повлечет за собой в качестве следствия положение о неприменимости понятия пространства. Аналогичное справедливо в отношении времени и длительности.

Итак, пространственная определенность сосуществования объектов фиксируется в понятии протяженности, а временная – в понятии длительности. Кроме пространственной и временной определенности объекты могут иметь определенность существования, фиксируемую в понятии «отношение», которое, вообще говоря, не сводится к пространственной и временной определенности. Только программа механицизма ставит своей целью свести всякий вид определенности, все свойства и отношения к пространственным и временным. Однако история науки достаточно убедительно показала несостоятельность подобных претензий механицизма.

Выражение определенности существования и сосуществования объектов в понятиях необходимо требует использование понятий «тождество» и «различие». Определенность существования объекта предполагает отличие его от других объектов и отождествление данного объекта с самим собой (себетождественность). Простая констатация существования объекта без дальнейшей конкретизации определенности существования отвечает уровню его индивидуальности, зафиксированному в категории «качество»⁵⁷. Это самая абстрактная, самая бедная по своим характеристикам определенность существования объекта: известно только, что данный объект отличается от других (но чем конкретно – неизвестно) и себетождественен (но по каким параметрам – неясно). В математике уровню качественной определенности соответствует понятие «множество» – каждый его элемент предполагается

⁵⁶ См., например: *Мелюхин С.Т.* К философской оценке современных представлений о свойствах пространства и времени в микромире // Философские проблемы физики элементарных частиц. – М., 1963. – С. 122; *Павлов В.Т.* Логические функции категорий пространства и времени. – Киев, 1966. – С. 18–19.

⁵⁷ Слово «качество» употребляется здесь в гегелевском смысле – как определенность объекта, тождественная с его бытием.

себетождественным и отличным от любого другого элемента. Кроме того, все элементы множества тождественны с точки зрения отношения принадлежности к данному множеству. Это отношение – единственное, определяющее способ сосуществования элементов множества.

Дальнейшая конкретизация определенности существования объектов в плане тождества и различия между ними может идти по двум линиям – внешней, на которой устанавливаются характеристики тождества и различия между *многими* себетождественными объектами (в этом случае, в частности, появляются и пространственные характеристики), и внутренней, где дополнительные отождествления и различения устанавливаются в рамках *одного* себетождественного объекта.

Пространственные характеристики сосуществования можно ввести следующим образом. Допустим, имеется несколько множеств различных индивидуализированных объектов. Допустим далее, что каждое множество содержит одинаковое число элементов и каждый объект задан на уровне качественной определенности существования. Если, несмотря на это, между множествами существуют различия, то они будут иметь пространственную природу, то есть множества могут различаться только по способу сосуществования элементов.

Особенно четко смысл пространственных различий между многими объектами выявляется при рассмотрении отношений тождества и различия между множествами, элементы которых обладают более богатой, чем качественная, определенностью существования, зафиксированной в понятии «свойство». Известен принцип тождества, сформулированный Г. Лейбницем, который утверждает, что объекты, тождественные по всем своим свойствам, должны представлять один и тот же объект, быть тождественными, не различаясь даже по числу. И. Кант, полемизируя с Лейбницем, указывал, что объекты, тождественные по всем свойствам, все же могут быть различными как индивидуальности. То, что обеспечивает их различие, и есть пространственные характеристики⁵⁸. Если же, как это имеет место для систем одинаковых частиц в квантовой механике, работает лейбницевский принцип тождества, и объекты с одинаковыми свойствами, несмотря на то, что их несколько, не различимы как индивидуальности, то понятие пространства к таким объектам неприменимо.

Итак, в общем случае можно сказать, что пространственные различия позволяют не только различать, но и индивидуализировать объекты, тождественные в лейбницевском смысле. Если этого сделать нельзя, и объекты, тождественные по Лейбницу, хотя и различны (их несколько), но лишены индивидуальности, то это значит, что понятие пространства к таким объектам неприменимо. Определенность существования и сосуществования объектов характеризуется непространственным образом (скажем, с помощью теории групп). Понятие пространства и конкретизирующие его понятия про-

⁵⁸ Кант И. Сочинения. – Т. 3. – М., 1964. – С. 316.

тяженности и расстояния, таким образом, работают только там, где различные объекты обладают индивидуальностью. В связи с этим становится понятным стремление физиков отказаться от использования понятия пространства там, где объекты не могут быть индивидуализированы, как это наблюдается в микрофизике. Именно невозможность индивидуализации объектов препятствует операциональному определению их пространственно-временных характеристик.

Если пространственные различия – это различия между многими индивидуализированными объектами, то временные – это различия между индивидуализированными состояниями одного и того же объекта. При этом существенно, что существованием каждый раз обладает только одно из многих возможных состояний объекта. Степень различия между сменяющимися состояниями одного и того же объекта конкретизируется далее в понятиях длительности промежутка времени.

Если же несколько различных состояний одного и того же объекта считаются существующими сразу, а не по одному, то категория времени работать не будет. Подобная ситуация наблюдается при квантовых переходах между двумя различными состояниями. К изменениям типа квантового скачка временные понятия не применимы. Изменение, осуществляющееся при помощи квантового перехода, не обладает длительностью, что неоднократно отмечалось в литературе по квантовой механике.

Таким образом, гипотезу о макроскопическом характере пространственно-временных представлений можно считать продолжением тенденции, которую современная физика начала развивать в матричном варианте квантовой механики. Эта тенденция связана с последовательным учетом в категориальном аппарате теории невозможности эффективного отождествления и различения объектов.

TOWARDS THE QUESTION OF VALIDITY OF USING THE CONCEPTS OF SPACE AND TIME IN THE PHYSICS OF THE MICROWORLD

I.S. Alekseyev

An article from *Activity Concept of Perception and Reality*, a collection of selected works on methodology in physics by Igor Alekseyev [I.S. Alekseyev. *Deyatel'nost'naya kontseptsia poznaniya i realnosti*. Moscow, Russo Publishers, 1995, pp. 220–227].

НАШИ АВТОРЫ

АЛЕКСЕЕВ Игорь Серафимович (1935–1988 гг.) – доктор философских наук, профессор, работал старшим научным сотрудником сектора истории физики и механики Института истории естествознания и техники АН СССР.

АРИСТОВ Владимир Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором Вычислительного центра имени А.А. Дородницына РАН.

БЕЛИНСКИЙ Александр Витальевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

ВЕКШЕНОВ Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Российской академии образования.

ВЛАДИМИРОВ Юрий Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор Института гравитации и космологии РУДН, академик РАЕН.

КОПЕЙКИН Кирилл Владимирович – протоиерей, кандидат физико-математических наук, кандидат богословия, директор Научно-богословского центра междисциплинарных исследований Санкт-Петербургского государственного университета, преподаватель Санкт-Петербургской православной духовной академии.

ЛАПШИН Владимир Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Земли физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, директор Института прикладной геофизики (Москва).

ЛИПКИН Аркадий Исаакович – кандидат физико-математических наук, доктор философских наук, профессор кафедры философии Московского физико-технического института.

МАНДЕЛЬШТАМ Леонид Исаакович (1879–1944 гг.) – доктор физико-математических наук, академик АН СССР, с 1925 г. был заведующим кафедрой теоретической физики Московского университета, с 1934 г. работал также в Физическом институте АН СССР.

ПАНОВ Александр Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

СЕВАЛЬНИКОВ Андрей Юрьевич – доктор философских наук, профессор Института философии РАН, профессор кафедры логики Московского государственного лингвистического университета.

ТЕРЕХОВИЧ Владислав Эрикович – кандидат философских наук, секретарь Санкт-Петербургского онтологического общества.

ЭРЕКАЕВ Валентин Данилович – кандидат философских наук, доцент философского факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

МЕТАФИЗИКА

**Российский университет
дружбы народов**

Научный журнал

2015, № 1 (15)

Редактор *И.Л. Панкратова*
Компьютерная верстка *Н.А. Ясько*
Дизайн обложки *М.В. Рогова*

Адрес редакции:
Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198
Сайт: <http://lib.rudn.ru/37>

Подписано в печать 23.01.2015 г. Формат 60×84/8.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 15,4. Тираж 500 экз. Заказ 66.

Российский университет дружбы народов
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Типография РУДН
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. 952-04-41

Для заметок

Общие требования по оформлению статей для журнала «Метафизика»

Автор представляет после согласования с Главным редактором:

- Текст статьи до 20-40 тыс. знаков в электронном формате;
- Язык публикации – русский;
- Краткую аннотацию статьи (два–три предложения, 4-5 строк) на русском языке;
- Ключевые слова – не более 12;
- Информацию об авторе:
 - Ф.И.О. полностью, ученая степень и звание, место работы, должность, почтовый служебный адрес, контактные телефоны и адрес электронной почты.

Формат текста:

– шрифт: Times New Roman; кегль: 14; интервал: 1,5; выравнивание: по ширине;

– абзац: отступ (1,25), выбирается в меню – «Главная» – «Абзац – Первая строка – Отступ – ОК» (то есть выставляется автоматически).

- ✓ Шрифтовые выделения в тексте рукописи допускаются только в виде курсива.
- ✓ Заголовки внутри текста (название частей, подразделов) даются выделением «Ж» (полужирный).
- ✓ Разрядка текста, абзацы и переносы, расставленные вручную, не допускаются.
- ✓ Рисунки и схемы допускаются в компьютерном формате.
- ✓ Ссылки на литературу даются по факту со сквозной нумерацией (не по алфавиту) и оформляются в тексте арабскими цифрами, взятыми в квадратные скобки, с указанием страниц.

Например:

- На место классовой организации общества приходят «общности на основе объективно существующей опасности» [2, с. 57].
- О России начала XX века Н.А. Бердяев писал, что «постыдно лишь отрицательно определяться волей врага» [3, с. 142].
- ✓ Номер сноски в списке литературы дается арабскими цифрами без скобок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адорно Т.В. Эстетическая теория. – М.: Республика, 2001.
2. Бек У. Общество риска. На пути к другому модерну. – М.: Прогресс-Традиция, 2000.
3. Бердяев Н.А. Судьба России. Кризис искусства. – М.: Канон+, 2004.
4. Савичева Е.М. Ливан и Турция: конструктивный диалог в сложной региональной обстановке // Вестник РУДН, серия «Международные отношения». – 2008. – № 4. – С. 52–62.
5. Хабермас Ю. Политические работы. – М.: Праксис, 2005.

- ✓ Примечания (если они необходимы) даются подстрочными сносками со сквозной нумерацией, выставляются автоматически.

С увеличением проводимости¹ кольца число изображений виртуальных магнитов увеличивается и они становятся «ярче»; если кольцо разрывается и тем самым прерывается ток, идущий по кольцу, то изображения всех виртуальных магнитов исчезают.

¹ Медное кольцо заменялось на серебряное.

- ✓ Века даются только римскими цифрами (XX век).

Редакция в случае неопубликования статьи авторские материалы не возвращает и не рецензирует.

Будем рады сотрудничеству!

Контакты:

ЮРТАЕВ Владимир Иванович, тел.: 8-910-4334697; E-mail: vyou@yandex.ru