

Конференция "Два дня истории и эпистемологии обоснования квантовой механики"

А.А. Печенкин

В апреле 2023 г. в Париже состоялась конференция, посвящённая философско-методологическим проблемам квантовой механики, собравшая физиков, философов и историков науки из Европы, Северной и Южной Америки и Австралии. Конференция была своего рода продолжением дискуссий, отражённых в книге "Oxford Handbook on Quantum Interpretations" (2022 г.), и большинство докладчиков были авторами этой книги. На конференции обсуждались итоги последних опытов, касающихся проверки полноты квантовой механики, нестандартные формулировки и интерпретации этой теории, вопросы истории и социального контекста понятийного аппарата квантовой механики.

Ключевые слова: интерпретация, запутанность, полнота, реальность, философия науки, физика, история науки, идеология, здравый смысл

PACS numbers: 01.10.Fv, 01.65.+g, 03.65.-w

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.11.t142>

Содержание

1. Введение (1).
 2. Наблюдаемость, реальность, запутанность (2).
 3. Полнота квантовой механики как теории (2).
 4. Неортодоксальные интерпретации квантовой механики (4).
 5. Исторические экскурсы (5).
 6. Социально-политический контекст проблемы интерпретации квантовой механики (6).
 7. Заключение (7).
- Список литературы (7).

1. Введение

14 и 15 апреля 2023 г. в Париже состоялась конференция "Два дня истории и эпистемологии обоснования квантовой механики", организованная рядом французских и международных научных и коммерческих организаций: Oxford Handbook, физический факультет Университета Париж Сите, Федеральный университет Баия (Бразилия), проект Архимед (S.I.E.E), исследовательский центр Сфера UMR7219 – CNRS.

Конференция была посвящена обсуждению итогов публикации фундаментальной книги *Оксфордское руководство по истории квантовых интерпретаций*, и боль-

шинство докладчиков состояло из авторов этого коллективного труда [1].

В конференции приняли участие научные работники и преподаватели из Англии, Франции, США, Канады, Бразилии, Австралии и России (автор настоящего обзора). В их числе были два нобелевских лауреата — Роджер Пенроуз (Нобелевская премия по физике 2020 г.) и Алайн Аспе (Нобелевская премия по физике 2022 г.).

В преамбуле, представленной организаторами конференции, было сказано, что "за последние несколько лет снова повысился интерес к основаниям квантовой механики. Чем это объясняется? В первую очередь здесь надо указать на возникшую за последние двадцать лет техническую возможность проводить реально эксперименты, которые ранее относились к мысленным. Эти эксперименты не только еще раз подтвердили квантовую механику, но и указали путь к новым технологиям и создали новую ситуацию в квантовой криптографии и в квантовых вычислениях".

Что продемонстрировала апрельская конференция в Париже? Во-первых, фундаментальные изменения в понятийном аппарате, который работает при интерпретации квантовой механики; во-вторых, расширение философского аппарата, привлекаемого к интерпретации квантовой механики; в-третьих, сохранение (или даже повышение) интереса к неортодоксальным (некопенгагенским) интерпретациям, в-четвёртых, появление новых социально-политических контекстов, в которых интерпретации квантовой механики формулируются и обсуждаются. Докладчиками были представлены историко-научные факты, не получившие ранее отражения в историко-научной литературе.

История интерпретаций квантовой механики была прослежена в двух книгах М. Джеммера, вышедших в

А.А. Печенкин. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, философский факультет, Ломоносовский просп. 27, корп. 4, учебный корпус "Шуваловский", 119991 Москва, Российская Федерация
Email: a_pechenk@yahoo.com

Статья поступила 5 декабря 2023 г.,
после доработки 7 июня 2024 г.

1960–1970-х гг. [2, 3]. "Оксфордское руководство по истории квантовых интерпретаций" 2022 г. и Парижская конференция 2023 г. вместе восполнили тот пробел в историко-научной литературе, который образовался после выхода в свет книг М. Джеммера.

В связи с тематикой конференции имеет смысл отметить две даты: в 2025 г. исполняется 100 лет квантовой механики (летом 1925 г. вышла в свет статья В. Гейзенберга "О квантово-теоретической переинтерпретации кинематических и механических соотношений"), а в 2024 г. исполняется 60 лет неравенству Белла (в 1964 г. была опубликована статья Дж. Белла "О парадоксе Эйнштейна – Подольского – Розена").

2. Наблюдаемость, реальность и запутанность

На конференции в Париже отчётливо звучало понятие квантовой запутанности (entanglement), связанное с понятием квантовой нелокальности, характерное для философии квантовой механики конца XX и начала XXI вв. Согласно ряду свидетельств, это понятие использовалось уже Шрёдингером в его письме Эйнштейну (1935 г.) [4, 5]. Однако реальное и широкое употребление этого понятия относится к концу прошлого (XX) века и к нынешнему (XXI) веку [6–8]. В упомянутых книгах Джеммера, как и в отечественных философских публикациях 1970–1980 гг., это понятие не акцентировалось [9–14].

"Фактически авторы показали, — пишет Пенроуз, комментируя известную статью Эйнштейна, Подольского и Розена (1935 г.), — что из квантовой механики проистекает следствие, которое показалось им, как и многим другим людям (причём даже сегодня), неприемлемым. Следствие таково: пара сколь угодно удалённых друг от друга частиц должна рассматриваться как цельная, связанная система! Измерение, которому подвергнется любая из этих частиц, немедленно затронет и другую частицу, которая при этом окажется в квантовом состоянии, зависящем не только от результата измерения, сделанного с первой частицей, но и — что самое поразительное — от того, какое именно измерение мы выберем" [5, с. 83]¹.

Чтобы пояснить, что нового внесло понятие квантовой запутанности, проведём следующий мысленный эксперимент (перефразирующий мысленный эксперимент Эйнштейна – Подольского – Розена): два электрона с противоположными спинами (образующие синглет) были нами отделены друг от друга, причём один остался в Москве, а другой улетел в Санкт-Петербург. Через час после этого события мы, находясь в Москве, измерили спин находящегося в нашем распоряжении электрона. Это оказался электрон со спином, направленным вверх. Следовательно, электрон, находящийся в Санкт-Петербурге, имеет спин, направленный вниз. А что было с ним полчаса тому назад? Мы можем однозначно предсказать, что спин этого электрона уже был направлен вниз. Ведь мы предполагаем, что на этот электрон не было оказано какого-либо физического воздействия.

В духе позиции Эйнштейна и его соавторов мы могли бы сказать, что направленный вниз спин электрона,

находящегося в Санкт-Петербурге, — физическая реальность. Ведь он однозначно предсказуем. И квантовая механика неполна, поскольку этот элемент реальности не представлен в аппарате теории.

Бор ответил бы: нет, спин электрона, находящегося в Санкт-Петербурге, полчаса тому назад не обладал физической реальностью. У нас не было эксперимента, позволяющего измерить эту физическую величину.

Мы могли бы провести такое же рассуждение, оперируя понятиями квантовой запутанности и нелокальности. Состояния электронов в рамках пары — электрон со спином, направленным вверх, и электрон со спином, направленным вниз, — запутаны. Мы не можем сказать, какой именно электрон обладает каким именно спином. Когда было проведено измерение, электроны распутались: каждый из них получил свой спин. Полчаса тому назад, однако, электроны находились ещё в состоянии запутанности и рассуждать о состояниях каждого электрона по отдельности было бы физически неправильно. Когда было проведено измерение в Москве, запутанное состояние было разрушено и каждый из электронов получил свой собственный спин.

Приведённый пример, однако, упрощает ситуацию. Получается, что природа уже знала, что один из электронов имел спин \uparrow , а второй имел спин \downarrow , и только экспериментатору состоянию частиц не были известны. Чтобы приблизить ситуацию к реальности, надо предположить, что наблюдатель, находящийся в Москве, конструирует измерение тогда, когда системы оказываются уже пространственно разделёнными. Тогда факт выбора измерения в Москве мгновенно оказывает влияние на ситуацию в Санкт-Петербурге. Допустим мы измеряем спин электрона не вертикально, а под углом 45° , тогда спин в Санкт-Петербурге тоже окажется расположенным под углом 45° , только направленным в противоположную сторону.

Как пишет Пенроуз, две частицы могут быть разделены расстоянием в несколько миль или даже световых лет. Тем не менее оказывается, что "сам выбор измерения, производимого над одной частицей, мгновенно фиксирует ось спина другой частицы" [4, с. 230].

"Свойство запутанности, — говорил в своём докладе Аспе (первый доклад на конференции), — не просто добавление к индивидуальным свойствам составляющих пару частиц. Это глобальное свойство: частицы, находящиеся на больших расстояниях друг от друга, остаются связанными друг с другом (явление квантовой нелокальности)".

3. Полнота квантовой механики как теории

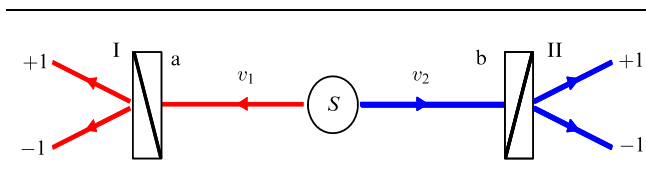
Доклад А. Аспе (Институт оптики университета Париж-Сакле) назывался "От нарушения неравенства Белла к квантовой телепортации: квантовая нелокальность как продуктивный образ". Аспе, физик-экспериментатор, известен своими экспериментами, показавшими нарушение неравенства Белла, выведенное в предположении так называемых локальных скрытых переменных, — экспериментами, составившими веский аргумент в пользу полноты квантовой механики.

Главная тема доклада Аспе — новый этап в дебатах о полноте квантовой теории, связанный с неравенством, выведенным Дж. Беллом в 1964 г., с целью продемонстрировать полноту квантовой механики, точнее — с

¹ Страница указана для издания на русском языке.

целью сделать аргументы в пользу полноты квантовой механики операциональными, т.е. перейти от философских дебатов к утверждениям, допускающим экспериментальную проверку.

Как известно, Белл вывел своё неравенство исходя из той версии мысленного эксперимента Эйнштейна – Подольского – Розена, которую сформулировали в 1957 г. Д. Бом и его студент Я. Ааронов [16]. Аспе, однако, не просто воспроизвёл формулировку Бом – Ааронова и результат Белла, он пересказал ту проблему, к которой пришёл Белл, спроектировав её на экспериментальную технику, которую он и другие экспериментаторы использовали, проверяя неравенство Белла. Аспе описал эксперимент с фотонами, скоррелированными по поляризации. Проводится измерение поляризации фотона v_1 по направлению a и поляризации v_2 по направлению b . Результаты $+1$ или -1 зависят от того, является ли поляризация параллельной или перпендикулярной углу измерения поляризатора. Определяются вероятности найти $+1$ или -1 для v_1 , измеряемой вдоль a , и $+1$ или -1 для v_2 , измеряемой вдоль b .



Теорема Белла утверждает следующее: никакая теория с локальными скрытыми переменными (в смысле эйнштейновского локального реализма) не может воспроизвести квантово-механические предсказания для корреляции в смысле Эйнштейна – Подольского – Розена при любых ориентациях поляризаторов.

"Точка зрения Эйнштейна – Подольского – Розена, — продолжает Аспе, — предполагает следующее: два фотона, составляющих пару, несут с момента своего возникновения некое свойство λ , имеющее для каждой пары своё значение (каждый фотон из пары фотонов обладает своим λ , специфическим для той пары, которой он принадлежит)". Прообраз простой и убедительный: два близнеца, имеющих тождественные наборы хромосом, оказались в противоположных частях света...

Бор не согласился бы: квантовая механика — полная теория и она не нуждается в дополнительном параметре λ .

Условие локальности, формулируемое Дж. Беллом, следующее: 1) результат $A(\lambda, a)$ измерения на фотоне v_1 поляризатором I не зависит от ориентации удалённого поляризатора II и наоборот; 2) распределение $\rho(\lambda)$ дополнительного параметра λ по парам фотонов не зависит от ориентации a и b .

Переходя к истории экспериментальной проверки полноты квантовой теории, Аспе процитировал последний абзац статьи Дж. Белла "Парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена" (1965 г.) [17]: "Ситуация будет иной, если квантово-механические предсказания имеют ограниченную достоверность. Очевидно, они могут быть применены только к экспериментам, в которых установки инструментов сделаны заранее так, чтобы позволить им достичь некоторой взаимной связи для обмена сигналами со скоростью меньшей или равной скорости света". Аспе особо выделил последнюю фразу, сказав:

"Эта фраза изменила мою жизнь. Я понял, что я должен делать". Аспе имел в виду следующую фразу: "В этой связи критичными являются эксперименты типа эксперимента, предложенного Бомом и Аароновым, в котором настройки изменяются в течение полета частиц".

Аспе выделил три стадии в экспериментальных исследованиях, посвящённых проверке неравенства Белла. Первая стадия: пионерские эксперименты, проведённые в 1970-е гг. в Беркли, Гарварде, Техасе и в других научных центрах. Эти эксперименты ещё не вполне отвечали той идеальной модели, которая имела в виду Беллом при выводе неравенства, носящего его имя. Среди них были исследования как подтверждающие неравенство Белла, так и опровергающие это неравенство.

Вторая стадия: исследования Аспе с соавторами, проведённые в Институте оптики (Высшая политехническая школа). Это начало 1980-х гг. Эти эксперименты уже исходили из схемы, приближающейся к той, которую имел в виду Белл, выводя своё неравенство, и они однозначно опровергали это неравенство.

Третью стадию, в соответствии с той схемой, которую предложил Аспе, составили эксперименты, начатые в 1990-е гг. и продолжавшиеся до 2015 г. Это уже эксперименты с разными типами "запутанности" (спутанности), эксперименты с запутанными парами, занимающими большие расстояния, эксперименты, использующие новые источники запутанных пар.

Вторым докладом, заслушанным на конференции, был доклад историка физики и физика-теоретика Франка Лало, представлявшего Высшую Нормальную Школу в Париже. Лало обсуждал проблему единства квантовой механики как физической теории. Он указал на вообще-то известный факт: при стандартном изложении в квантовой механике возникает логический разрыв, а именно описываются две категории процессов: квантовая динамика — изменение состояния системы в соответствии с уравнением Шрёдингера — и коллапс волновой функции, имеющий место в процессе измерения. Стандартная (копенгагенская) интерпретация квантовой механики лишь маскирует этот логический разрыв. Она описывает процесс измерения в философских терминах, относя его к явлениям человеческого сознания, или точнее — к неустраняемому возмущению квантового объекта прибором, который направляется и управляется человеком.

Лало отмечает, что наиболее ясно и выразительно логическая непоследовательность квантовой механики была описана Дж. фон Нейманом, различившим в аппарате квантовой механики два вида процессов: причинное изменение квантового состояния, происходящее в соответствии с уравнением Шрёдингера (процесс 1), и внепричинное (акаузальное) воздействие на квантовый объект, имеющее место при измерении (процесс 2). "Мы нашли, — писал фон Нейман, — что некоторое состояние ψ под действием оператора энергии преобразуется в состояние $\psi_1 \dots$ чисто причинным образом... С другой стороны, при измерении... состояние ψ испытывает акаузальное изменение, в результате которого может возникнуть каждое из состояний $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ притом с вероятностями $|(\varphi, \varphi_1)|^2, |(\varphi, \varphi_2)|^2, \dots$ соответственно" [18].

Лало следующим образом формулирует проблему измерения в квантовой механике: "Проблема измерения — это проблема, почему единичный макроскопический результат возникает в результате измерительного про-

песса, в то время как динамическое уравнение квантовой механики свидетельствует о том, что серия результатов должна возникнуть одновременно?"

Мы здесь не будем воспроизводить тот способ, с помощью которого Лало планирует обеспечить целостность изложения квантовой механики. Остановимся лишь на тех исходных представлениях, которые он указывает. Это изложение квантовой механики по де Бройлю–Бому и выдвинутое в 1996 г. Р. Пенроузом концепция суперпозиции состояний, локализованных в различных регионах пространства (QS MDS) [17].

В теории де Бройля–Бома частица, лишённая спина, даже когда она "запутана" с некоторой другой частицей, характеризуется своей волновой функцией, определённой в обычном трёхмерном пространстве. Кроме того, подмножество частиц может быть в любое время описано своей единственной ("условной") волновой функцией.

Лало следующим образом излагает идею Пенроуза. Если массивный объект находится в состоянии суперпозиции, складывающейся из состояний, локализованных в различных регионах пространства (QS MDS), то согласно общей теории относительности возникает суперпозиция различных единиц пространства-времени. Понятие временной трансляции тогда оказывается плохо определённым, поскольку в этом случае возникает неопределённость и "расплывчатость" понятия энергии.

Лало здесь упоминает соотношение неопределённости энергия-время, "четвёртое соотношение неопределённости", согласно терминологии де Бройля [19]. С этим соотношением неопределённости оказались связаны дебаты, носящие методологический характер, в том числе дебаты, протекавшие в отечественной литературе (дискуссия между Л.И. Мандельштамом и И.Е. Таммом, с одной стороны, и В.А. Фоком и его учеником Н.С. Крыловым, с другой, — прослежена в [20]).

Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц не выделяют четвёртое соотношение неопределённости. Они пишут, что "о соотношении $|E + \varepsilon - E' - \varepsilon'| \Delta t$ часто говорят как о соотношении неопределённости для энергии. Необходимо, однако, подчеркнуть, что его смысл существенно отличается от смысла соотношения неопределённости для координаты и импульса" [21].

Сознавая спорность возводимой им конструкции, Пенроуз, на которого ссылается Лало, отметил, что существует общепризнанный вариант использования соотношения $\Delta t \Delta E \geq \hbar$ — в случае с радиоактивными ядрами. Для нестабильного ядра Δt может рассматриваться как его время жизни, а ΔE как соответствующая неопределённость энергии, связанная с дефектом массы.

Третьим докладчиком был неоднократно упоминаемый выше Пенроуз (Оксфордский университет, Великобритания). В докладе, названном "Квантовая реальность, классическая реальность и коллапс волновой функции", Пенроуз следовал тем размышлениям, которые были зафиксированы в его популярной книге, цитированной выше, и в его статье о "гравитизации" квантовой механики [22]. Как обычно, Пенроуз демонстрировал не только книжные диаграммы, но и картинки собственного производства.

Пенроуз констатировал, что квантовая механика подтверждалась всеми возможными до сих пор экспери-

ментами. Однако эта теория содержит внутреннее противоречие: унитарная эволюция в соответствии с уравнением Шрёдингера плохо согласуется с "редукцией волнового пакета", согласно которой квантовая система "прыгает" в собственное состояние некоторого оператора, который принимается, чтобы представить квантовое измерение той или иной физической величины. "Строго говоря, R (постулат редукции волнового пакета) просто несовместим с U , где U — унитарная эволюция в соответствии с уравнением Шрёдингера".

"Моя позиция, — говорил Пенроуз, — принять принципы общей теории относительности как имеющие определяющее значение в том, как квантовая механика должна быть модифицирована. Некоторые релевантные идеи, относящиеся к гравитации, должны быть включены в модифицированную квантовую механику".

В учебниках по квантовой механике принцип суперпозиции обычно иллюстрируется на примере суперпозиции состояний одной и той же микрочастицы, находящейся в одной и той же точке пространства (например, электрона со спином "вверх" и "вниз"). Пенроуз начинал доклад с другого примера, применяемого при изложении принципа суперпозиции, — с "кота Шрёдингера". Однако он модифицировал эту картинку: "вместо кота я взял сферическую массу, которая движется направо, если детектор получает фотон, и остаётся в первоначальном положении, если фотон отражён от детектора... Перед нами возникает суперпозиция состояний, каждое из которых должно быть стационарным состоянием. Эта суперпозиция берётся как нестабильная из-за некоторых нелинейных эффектов, проистекающих из "гравитизации" стандартной квантовой механики, нестабильная с временем жизни порядка $\tau = \hbar/E_G$, где величина E_G принимается как некая фундаментальная неопределённость энергии суперпозиционного состояния и вышеприведённая формула рассматривается как соотношение неопределённости энергия-время (по аналогии с формулой, соотносящей время жизни радиоактивного ядра с неопределённостью в отношении его массы и энергии)".

Пенроуз сделал следующее пояснение: "Если массивный объект поставлен в суперпозиционное состояние, состоящее из состояний, локализованных в различных регионах пространства (QS MDS), из общей теории относительности тогда следует, что он находится в суперпозиционном состоянии также и различных пространств-времен. Понятие временной трансляции тогда оказывается плохо определённым, поскольку в этом случае возникает неопределённость или расплывчатость понятия энергии.

Мы предполагаем, что неопределённость энергии ΔE распределяется вдоль времени $\tau = \hbar/\Delta E$ (соотношение неопределённости энергия-время): вектор состояния проектируется в один из компонентов QS MDS. Конечный результат эквивалентен проекционному постулату фон Неймана и на этой основе решает проблему измерения" [22].

4. Неортодоксальные интерпретации квантовой механики

Как отмечалось, на апрельской конференции в Париже обсуждались неортодоксальные (некопенгагенские) интерпретации квантовой механики. Выше уже шла речь об интерпретации Бома–де Бройля (правда, это

изложение может рассматриваться не как интерпретация, а как неортодоксальная формулировка аппарата квантовой механики). На апрельской конференции в Париже освещалась также многомировая интерпретация Эверетта (её также называют интерпретацией относительных состояний) и байесинистская интерпретация (основанная на применении формулы Байеса, одной из основных формул теории вероятностей).

В докладе Дж. Барретта (Калифорнийский университет в Ирвайне, США) был реконструирован ход рассуждений, который присутствовал в PhD диссертации Эверетта, защищённой в 1957 г. в Университете Принстона. Докладчик также показал, что парадокс, известный под названием "друг Вигнера", был первоначально зафиксирован Эвереттом и послужил одним из аргументов в пользу многомировой интерпретации, которая вначале называлась интерпретацией относительных состояний (см. по этому поводу [23]).

В отечественной литературе интерпретация Эверетта обсуждалась в брошюре М.А. Маркова [24], в книге Д.И. Блохинцева [9], в статье А.А. Гриба [38], а также в статье автора настоящего обзора [25].

Заметим, что большинство интернетовских публикаций, касающихся многомировой интерпретации квантовой механики, принадлежит только что упоминавшемуся Дж. Барретту, сделавшему доклад на конференции в Париже.

Х. Цвирн (Высшая Нормальная школа, Париж) представил новую и малоизвестную интерпретацию квантовой механики — байесинистскую интерпретацию (его доклад назывался "Служит ли кубизм решением концептуальных проблем квантовой механики?"). Для читателей старшего поколения будет, наверное, понятнее, если эта интерпретация будет названа субъективно-идеалистической, поскольку в своих философских предпосылках она соответствует идеализму Дж. Беркли, подвергнутому "сокрушительной критике" В.И. Лениным в его книге *Материализм и эмпириокритицизм*. Согласно этой интерпретации, квантовое состояние представляет не физическую систему, а эпистемическое состояние человека (называемого агентом), который проектирует это состояние на его возможный будущий опыт.

Байесинистская интерпретация квантовой механики — это интерпретация, опирающаяся на известную формулу Байеса, появляющуюся на первых страницах учебников по теории вероятности. Формула Байеса представляет условную вероятность гипотезы в виде дроби, в числителе которой стоит вероятность конъюнкции гипотезы и эмпирического свидетельства, а в знаменателе — вероятность эмпирического свидетельства. Однако дело здесь не только в математике. Выражая гипотезу через эмпирическое свидетельство, получаемое отдельным человеком (индивидом), байесинисты трактуют вероятность этой гипотезы как функцию того знания, которым обладает данный индивид. «Слово "опыт", — говорил докладчик, — должно здесь пониматься как личный опыт агента, который он приобретает в течение всей своей жизни».

Как мы видели, некоторых теоретиков, занимающихся вопросами интерпретации квантовой механики, волнует гетерогенность этой теории: наличие в ней детерминизма — уравнения движения, сформулированного Шрёдингером, и индетерминизма — при измерении волновая функция коллапсирует и состояние системы

переходит в одно из собственных состояний оператора, представляющего наблюдаемую величину.

Для кубиста (сторонника байесинистской интерпретации) ситуация здесь "простая": унитарная эволюция касается изменения верования. Верование, которое агент имел в отношении результатов возможных измерений при $t = t_0$, оказывается причинно связанным с верованием, которое агент дедуцирует о возможном результате измерения при $t = t_1$. "Редукция волнового пакета, — говорит далее кубист, — не представлена в концептуальном аппарате квантовой механики. Это всецело опыт исследователя, производящего измерение".

Байесинистская интерпретация квантовой механики была, с учётом её изложения Цвирном, описана в статье автора настоящего обзора [26].

В Оксфордской книге по квантовым интерпретациям и на конференции в Париже рассматривалась также и статистическая (ансамблевая) интерпретация квантовой механики, присутствующая в известном отечественном учебнике по квантовой механике Д.И. Блохинцева и в учебнике канадского физика Л. Баллантайна (доклады Дж. Мартинца (Университет Аахена, Германия) и А. Печенкина, автора обзора (МГУ им. М.В. Ломоносова).

«Сильная сторона статистической интерпретации, — писал А.А. Марков, — состоит в том, что в большом количестве случаев экспериментатор, изучая квантовые явления, имеет дело действительно с ансамблем одинаково приготовленных систем. Но как быть с "ансамблем", состоящим из одной системы, даже из одной микрочастицы?» [24].

В докладах на конференции в Париже прослеживалась, однако, и культурно-историческая сторона ансамблевого подхода. Ансамблевый подход выдвинул в 1928 г. (статья 1929 г.) американский физик, сотрудничавший в 1920-х гг. с Н. Бором, — Дж. Слэтер. Причём Слэтер не спорил с какими-либо конкурирующими интерпретациями. Он просто объяснял содержание новой физической теории: "Волновая механика является расширением не обычной ньютоновской механики, а статистической механики, и этого достаточно, чтобы объяснить многие из её загадочных черт" [27].

В довоенные годы статистический (ансамблевый) подход развивали американский физик Дж. Кэмбл, написавший один из первых учебников по квантовой механике, советские физики К.В. Никольский (в своей книге и статьях) и Л.И. Мандельштам в своих лекциях, читаемых на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Статистический подход отстаивал также в своей философской книге *Логика исследования* (1934 г.) австрийский школьный учитель физики К. Поппер, предварительно вступивший в переписку с А. Эйнштейном.

Активным критиком статистического (ансамблевого) подхода был В.А. Фок, выступивший против идей, выдвигаемых К.В. Никольским, Л.И. Мандельштамом и Д.И. Блохинцевым

5. Исторические экскурсы

Доклад М. Пати (почётный (эмеритус) главный научный сотрудник CNRS) назывался "Критика Эйнштейном квантовой механики". Пати сосредоточил внимание на поздних выступлениях Эйнштейна (после 1935 г.), связанных с его проектом теории единого поля (по поводу

философской позиции Эйнштейна см. статьи В.А. Фока [28, 29] и отечественных историков физики и философов [30–32]).

Пати отметил, что эйнштейновская критика квантовой механики с самого начала касалась двух проблем: индетерминизма (вероятностного характера физической теории) и идеи несепарабельности, заложенной в квантовой механике. Со временем индетерминизм перестал быть отрицательным ориентиром Эйнштейна: вероятностный характер квантовой механики обрёл строгую аксиоматическую формулировку. Можно сказать, что идея вероятности стала составной частью математического аппарата квантовой механики.

Критика Эйнштейна, подчеркнул Пати, сосредоточилась на идее несепарабельности. Докладчик, однако, провёл различие между двумя терминами: "нелокальность" и "несепарабельность". Первый термин означает пространственное отношение, постулирование которого противоречило бы СТО. Несепарабельность же выражает отношение запутывания, вытекающее из квантовой механики. В поздних работах Эйнштейна, однако, эти два свойства, согласно докладчику, сливались в одно: "нелокальность сепарабельности". Докладчик здесь сослался на статью Эйнштейна 1948 г. [33].

К. Джоас (Копенгагенский университет) назвал свой доклад "Обоснование и прикладные исследования. Творческое напряжение на раннем этапе развития квантовой механики". Джоас говорил о эпистемологических дискуссиях в процессе формулирования матричной механики (Гейзенберг, Борн, Иордан) и волновой механики (Шрёдингер), об эпистемологических дискуссиях второй половины 1920-х гг. Он также призвал различать интерпретационные вопросы, волнующие работающих физиков, и проблемы интерпретации квантовой механики, занимающие прежде всего философов.

6. Социально-политический контекст проблемы интерпретации квантовой механики

Как было отмечено в начале обзора, на конференции в Париже присутствовала не только эпистемологическая, но и социально-политическая проблематика. В докладе О. Фраере (Бразилия, Федеральный университет Баии) была подчеркнута идейная и даже философская значимость экспериментов Аспе. Фраере констатировал, что эти исследования ознаменовали новый этап в развитии философского осмысления квантовой механики. Ещё в 1960-е гг. философские основания квантовой механики не привлекали широкого внимания физиков. Физики, обсуждая квантовую механику, обращались к дискуссиям 1920–1930-х гг., к дискуссиям Бора и Эйнштейна. Работы Аспе с соавторами значительно расширили горизонт философского мышления физиков. На первый план вышли понятия запутанности и квантовой нелокальности, понятия, ставшие актуальными при решении проблем квантовой телепортации и квантовой криптографии.

Историко-научные вопросы обсуждал также Т. Рикман (Стенфордский университет, США), который остановился на философских коннотациях вышеупомянутых работ Д. Бома, посвящённых проблеме скрытых переменных. Первоначальной философской позицией Бома была копенгагенская интерпретация квантовой механики. С ортодоксальной копенгагенской позиции им

была написана книга по основам квантовой механики, вышедшая в 1951 г. [34]. Вскоре, однако, Бом пересмотрел свою позицию и опубликовал пионерские неортодоксальные работы, к которым восходит неравенство Белла (см. выше) и интерпретация квантовой механики, известная как интерпретация де Бройля–Бома.

Т. Рикман, прослеживая эволюцию воззрений Бома, указывает на два фактора, первый из которых — подчеркнута плюралистическая философия науки П. Фейерабенда, с которым Бома связывали приятельские отношения. Как известно, Фейерабэнд противопоставлял своё понимание науки тому, которое развивал Т. Кун в книге *Структура научных революций*. Философия Куна тяготела, по мнению Фейерабенда, к идеологии тоталитарного общества.

Вторым фактором были дискуссии по интерпретации квантовой механики, развернувшиеся в СССР. "Д. Бом, — пишет Рикман, — не особенно вникал в политическую подоплеку этих дискуссий. Но он с симпатией воспринял те благожелательные оценки его неортодоксальной интерпретации, которые доходили до него из Советского Союза".

В докладе А.Б. Кожевникова (Университет Британской Колумбии, Канада) речь шла об идеях американского философа и историка науки П. Формана, представленных в его широко известной статье "Веймарская культура, причинность и квантовая механика. 1918–1927", опубликованной в 1971 г. [35]. П. Форман в этой статье связал идейное развитие квантовой теории с идеологической ситуацией, возникшей в немецкоязычном сообществе физиков после поражения Германии в Первой мировой войне и во время становления Веймарской республики. Форман фиксировал популярность иррационалистической философии жизни в Веймарской республике, которая была слабым в финансово-политическом отношении государством. Форман также считал неправомерной слишком высокую оценку позитивистского влияния на физику, которая присутствует в литературе. Форман отмечает, что иррационализм, присутствующий в философии жизни, становясь популярной идеологией, ограничивал традиционные ценности физики и приобщал физиков к идеям релятивизма и индетерминизма. В статье Формана речь, однако, шла не об упадке физики и о потере перспектив научности. Форман писал о новой философии физики, порождением которой стала теория Бора–Крамерса–Слэтера (1925 г.), в которой даже законы сохранения носили вероятностный характер. Об этой теории писал также М. Джеммер как об уникальной: она просуществовала очень недолго, но оказала идейное влияние на концептуальное формирование квантовой механики. В 1925 г. была опубликована статья Гейзенберга, первая статья по "новой" квантовой механике, отмеченная методологией дескриптивизма и феноменализма (статья положила начало исторически первой формулировке квантовой механики — матричной механике), за ней последовали статьи Борна и Иордана (1925 г.) и Гейзенберга, Борна и Иордана (1926 г.), волновая механика Шрёдингера (1927 г.) и вероятностная интерпретация квантовой механики, ставшая одним из фундаментальных положений этой теории.

А.Б. Кожевников не только описал статью Формана 1971 г., он проследил серию его последующих публика-

ций. Резюме, которое делает Кожевников, следующее: "согласно Форману, научное знание продуцируется локально в социальных сетях и принципиально обусловлено культурно-историческими ситуациями".

Заканчивая свой доклад, Кожевников отметил, что нынешняя ситуация в философии науки не вполне отвечает идеям Формана. "Тезис Формана был предметом дискуссий последние пятьдесят лет. Однако то, что вызывало возражения, постепенно становится общепринятым. Сегодня актуальными становятся вопросы, каким образом такое локально продуцируемое явление, как научное знание, усваивается самыми различными культурами и социальными структурами, каким образом наука диктует свои нормы понимания мира в самых различных интеллектуальных ситуациях и контекстах".

В докладе А.А. Печенкина речь шла об идеологическом контексте дискуссий, касающихся интерпретации квантовой механики, имевших место в СССР в 1940–1960-е гг. Печенкин выделил два уровня государственной идеологии: идеологию доминирования и идеологию компромисса. С позиций идеологии доминирования квантовая механика рассматривалась философами-марксистами А.М. Дебориным, А.А. Максимовым, М.Э. Омеляновским и физиком Д.И. Блохинцевым (в его статьях конца 1940-х – начала 1950-х гг.).

В отличие от теории относительности, квантовая механика не отрицалась советскими идеологами (даже экстремистскими). Идеологическим атакам подверглась копенгагенская интерпретация квантовой механики, изложенная Н. Бором и В. Гейзенбергом, интерпретация, ссылающаяся на дополненность и наблюдаемость (одним из бескомпромиссных критиков копенгагенской интерпретации был уже упоминавшийся Д.И. Блохинцев, автор популярного и нестареющего учебника по квантовой механике).

Идеология компромисса заметна в статьях В.А. Фока, излагавших интерпретацию квантовой механики в связи с дискуссиями между Бором и Эйнштейном. Согласно Фоку, позиция Бора — это в тенденции "стихийный материализм", и в ходе своей творческой эволюции Бор преодолевал ссылки на "наблюдателя", характерные для его ранних работ. В конечном итоге, с точки зрения Фока, Бор отказался от понятия "неконтролируемое взаимодействие", присутствовавшего в его формулировке концепции дополненности.

Идеология компромисса — это стихийное мировоззрение интеллектуала, живущего в тоталитарном обществе, провозглашавшем материализм как незыблемую основу науки, политики и вообще здравого смысла.

А. Печенкин, однако, указал и на философские публикации, преодолевающие то, что он называл идеологией компромисса. Это прежде всего публикации московского философа, специалиста по философии физики И.С. Алексеева [11, 36], дающие аутентичное изложение концепции дополненности Бора и показывающие, что это изложение логически сопряжено с концепциями "наблюдатель" и "неконтролируемое взаимодействие".

Аутентичное изложение концепции дополненности и вообще копенгагенской интерпретации квантовой механики предлагали также киевские философы П.С. Дышлевый и В.М. Свириденко [37].

Социально-политический контекст интерпретаций квантовой механики рассматривался также Ани Якоб-

сон (Дания, Образовательный центр обучения взрослых, доклад "Копенгаген и Нильс Бор"), Флавио Дел Санто (Университет Вены, доклад "Обоснование квантовой механики в послевоенной Италии"), Стефано Оснагчи (Архив Гуссерля, Париж, доклад "Н. Бор и эпистемологические уроки квантовой механики").

7. Заключение

Настоящий обзор не претендует на полноту охвата всех докладов, сделанных в апреле 2023 г. в Париже, и всех дискуссий, возникших на парижской конференции.

Автор надеется, что обзор даёт представление о специфике философских проблем квантовой механики. В научной литературе существенна не только полнота изложения, но и оперативность. Конференция в Париже затронула ряд вопросов, которые не освещались или практически не освещались в отечественной литературе, и информация об этой конференции, как надеется автор, создаст противовес тенденции к "философии науки без науки", явственно проступающей в отечественных публикациях последних лет. Речь идёт о философских статьях и книгах, написанных авторами, лишёнными надлежащего научного образования и поэтому занимающимися абстрактными историческими комментариями, лишёнными какой-либо методологической значимости.

Список литературы

1. Freire O (Jr.) (Exec. Ed.), Bacciagaluppi G, Darrigol O, Hartz T, Joas C, Kojevnikov A, Pessoa O (Jr.) (Editorial Board) *The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations* (Oxford: Oxford Univ. Press, 2022) 1296 pp.
2. Jammer M *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (New York: McGraw-Hill, 1966) 399 pp.; Пер. на русск. яз.: Джеммер М *Эволюция понятий квантовой механики* (Пер. с англ. В Н Покровского, под ред. Л И Пономарева) (М.: Наука, 1985)
3. Jammer M *The Philosophy of Quantum Mechanics. The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective* (New York: Wiley, 1974)
4. Penrose R *Fashion, Faith, and Fantasy in the New Physics of the Universe* (Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 2016); Пер. на русск. яз.: Пенроуз Р *Мода, вера, фантазия и новая физика Вселенной* (Сер. New Science) (СПб.: Питер, 2020)
5. Penrose R *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (Oxford: Oxford Univ. Press, 1989); Пер. на русск. яз.: Пенроуз Р *Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики* (М.: УРСС, 2003)
6. Менский М Б УФН **170** 631–648 (2000); Menskii M B *Phys. Usp.* **43** 585–600 (2000)
7. Менский М Б УФН **171** 459–462 (2001); Menskii M B *Phys. Usp.* **44** 438–442 (2001)
8. Менский М Б УФН **175** 413–435 (2005); Menskii M B *Phys. Usp.* **48** 389–409 (2005)
9. Блохинцев Д И *Принципиальные вопросы квантовой механики* (М.: Наука, 1966); Пер. на англ. яз.: Blokhintsev D I *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Dordrecht: D. Reidel, 1968)
10. Омеляновский М Э (Отв. ред.) *Философские вопросы квантовой физики* (М.: Наука, 1970) Сборник статей
11. Алексеев И С *Концепция дополненности. Историко-методологический анализ* (М.: Наука, 1978)
12. Фок В А УФН **45** 3–14 (1951)
13. Фок В А УФН **59** 107–117 (1956)
14. Фок В А УФН **86** 363–365 (1965); Fock V A *Sov. Phys. Usp.* **7** 628–629 (1966)
15. Bohm D, Aharonov Y *Phys. Rev.* **108** 1070 (1957)
16. Bell J *Physique Physique Fizika* **1** 195 (1964) <https://doi.org/10.1103/PhysiquePhysiqueFizika.1.195>; Пер. на русск. яз.: Белл Дж "Па-

- радокс Эйнштейна – Подольского – Розена" *Квантовая магия* **5** (2) 2160–2177 (2008)
17. von Neumann J V *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Berlin: J. Springer, 1932); Пер. на англ. яз.: von Neumann J V *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1955); Пер. на русск яз.: фон Нейман И *Математические основы квантовой механики* (М.: Наука, 1964) с. 306
 18. Penrose R *Gen. Relat. Gravit.* **28** 581–600 (1996)
 19. де Бройль Л *Избранные научные труды Т. 2 Квантовая механика и теория света. Работы 1934–1951 годов* (Гл. ред. Ж Лошак) (М.: МГУП, 2011) с. 430–453
 20. Pechenkin A L I *Mandelstam and His School in Physics* 2nd ed. (Cham: Springer, 2019) pp. 221–233, https://doi.org/10.1007/978-3-030-17685-3_15
 21. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Квантовая механика. Нерелятивистская теория* (М.: Физматгиз, 1963) с. 190; Пер. на англ. яз.: Landau L D, Lifshitz E M *Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory* (Oxford: Pergamon Press, 1965)
 22. Penrose R *Found. Phys.* **44** 557–575 (2014)
 23. Белинский А В *УФН* **190** 1335–1342 (2020); Belinsky A V *Phys. Usp.* **63** 1256–1263 (2020)
 24. Марков М А *О трех интерпретациях квантовой механики* (М.: Наука, 1991); *О трех интерпретациях квантовой механики* 2-е изд. (М.: URSS, 2010) с. 72–109
 25. Печенкин А А "Три классификации интерпретаций квантовой механики", в сб. *Будущее фундаментальной науки. Концептуальные, философские и социальные аспекты проблемы* (Отв. ред. А А Крушанов, Е А Мамчур) (М.: КРАСАНД, 2011) с. 25–34; http://intelros.ru/pdf/Philos_nauki/1999_05/7.pdf
 26. Печенкин А А *Эпистемология и философия науки* **57** (12) 199–216 (2020)
 27. Slater J C "Physical meaning of wave mechanics" *J. Franklin Inst.* **207** (4) 449 (1929)
 28. Фок В А *УФН* **59** 67–69 (1956)
 29. Фок В А *УФН* **83** 577–582 (1964); Fock V A *Sov. Phys. Usp.* **7** 592–595 (1965)
 30. Визгин В П, Кобзарев И Ю, Явелов Б Е "Научное творчество и жизнь Альберта Эйнштейна", в сб. *Эйнштейновский сборник, 1984–1985* (Сост. Г Е Горелик) (М.: Наука, 1988) с. 301
 31. Кедров Б М, Овчинников Н Ф (Отв. ред.) *Методологические принципы физики. История и современность* (М.: Наука, 1975)
 32. Делокаров К Х (Сост.) *Эйнштейн и философские проблемы физики XX века* (М.: Наука, 1979)
 33. Einstein A *Dialectica* **2** 320–324 (1948); Пер. на русск. яз.: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. 3 (М.: Наука, 1966) с. 612
 34. Bohm D *Quantum Theory* (New York: Prentice-Hall, 1951); Пер. на русск. яз.: Бом Д *Квантовая теория* (М.: Наука, 1965)
 35. Forman P "Weimar culture, causality, and quantum theory, 1918–1927: Adaptation by German physicists and mathematicians to a hostile intellectual environment" *Historical Studies Phys. Sci.* **3** 1–115 (1971) <https://doi.org/10.2307/27757315>
 36. Алексеев И С *Вопросы философии* (6) 82–87 (1984)
 37. Дышлевы П С, Свириденко В М "О принципе наблюдаемости и концепции дополнителности", в сб. *Методологические проблемы теории измерений* (Ред. коллегия: П С Дышлевы и др.) (Киев: Наукова думка, 1966) с. 13–56
 38. Гриб А А "К вопросу об интерпретации квантовой физики" *УФН* **183** 1337 (2013); Grib A A "On the problem of the interpretation of quantum physics" *Phys. Usp.* **56** 1230 (2013)

The conference “Two days of the history and philosophy of the foundations and interpretations of quantum mechanics”

A.A. Pechenkin

Lomonosov Moscow State University, School of Philosophy,
Lomonosov prosp. 27-4, 119991 Moscow, Russian Federation
E-mail: a_pechenk@yahoo.com

The conference on the philosophical and methodological problems of quantum mechanics occurred in Paris (14–15 April 2023). The physicists, historians of science, and philosophers came to participate from Europe, North and South America, Australia. The discussions which were presented in “Oxford Handbook on Quantum Interpretations” (2022) have been continued. The majority of the participants contributed to the “Oxford Handbook”. The recent experiments concerning the experimental tests of the Bell inequality, the problem of the completeness of the theory, the nonstandard formulations of quantum mechanics, the social context of the interpretations were taken under consideration.

Keywords: interpretation, entanglement, realism, the philosophy of science, physics, common sense

PACS numbers: 01.10.Fv, **01.65. + g**, **03.65. – w**

Bibliography — 38 references

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.11.t142>

Received 5 December 2023, revised 7 June 2024

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.11.t142>