

ВЛАДЛЕНОВА И.В. (док. филос. наук, профессор, Национальный технический университет «ХПИ»)

ОПЕРАЦИОНАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕОРИИ ДЕ БРОЙЛЯ-БОМА: ПРОБЛЕМА НАБЛЮДАТЕЛЯ

В статье рассмотрены различные философские интерпретации квантовой механики: копенгагенская интерпретация, многомировая, статистическая, теория де Бройля-Бома, объективная редукция Пенроуза. Показано, что в операциональной трактовке смысл основных понятий нерелятивистской квантовой физики: волновая функция, редукция, приготовление и измерение состояния, проекционный постулат, соотношение неопределенностей может быть пояснено с помощью реалистических экспериментальных процедур. Понятие редукции волновой функции в момент измерения фактически излишне, оно является лишь удобным вспомогательным средством для наглядного описания наблюдаемых эффектов, тем самым снимается «проблема наблюдателя».

Ключевые слова: квантовая физика, наблюдатель, нелокальность, операционализм.

Владленова І.В. ОПЕРАЦІОНАЛЬНИЙ ВИМІР ТЕОРІЇ ДЕ БРОЙЛЯ-БОМА: ПРОБЛЕМА СПОСТЕРІГАЧА У статті розглянуто різні філософські інтерпретації квантової механіки: копенгагенська інтерпретація, багатосвітова, статистична, теорія де Бройля-Бома, об'єктивна редукція Пенроуза. Показано, що в операціональному трактуванні сенс основних понять нерелятивістської квантової фізики: хвильова функція, редукція, приготування і вимірювання стану, проєкційний постулат, співвідношення невизначеностей може бути пояснено за допомогою реалістичних експериментальних процедур. Поняття редукції хвильової функції в момент вимірювання фактично зайве, воно є лише зручним допоміжним засобом для наочного опису спостережуваних ефектів, тим самим знімається «проблема спостерігача».

Ключові слова: квантова фізика, спостерігач, нелокальність, операціоналізм.

Vladlenova I.V. OPERATIONAL DIMENSION OF THE DE BROGLIE-BOHM THEORY: THE PROBLEM OF OBSERVER There are different philosophical interpretations of quantum mechanics: the Copenhagen interpretation, the many-worlds, the statistical theory of de Broglie-Bohm, Penrose objective reduction. It is shown that in the operational interpretation of the meaning of the basic concepts of non-relativistic quantum physics: the wave function reduction, preparation and measurement conditions projection postulate, the uncertainty can be explained using realistic experimental procedures. The notion of reduction of the wave function at the time of measurement is actually superfluous, it is merely a convenient visual aid to describe the observed effects, thus removed the «problem of the observer».

Keywords: quantum physics, the observer, non-locality, operationalism.

Существуют различные философские интерпретации квантовой механики – физической теории, описывающей материальный мир систем с электронно-ядерным строением. В рамках философских представлений осуществляется попытка поисков ответов на вопросы о природе физической реальности и способе её познания, о характере детерминизма и причинности, о сущности и месте статистики в квантовой механике и т.д. Существует несколько подходов к интерпретации квантовой механики: копенгагенская интерпретация, многомировая, статистическая, теория де Бройля-Бома, объективная редукция Пенроуза и др.

Копенгагенскую интерпретацию квантовой механики сформулировали Н.Бор и Г.Гейзенберг. Согласно копенгагенской интерпретации, квантовая механика описывает не микрообъекты сами по себе, а их свойства, проявляющиеся в макроусловиях, которые создаются классическими измерительными приборами в процессе акта наблюдения. Таким образом, решается проблема так называемого коллапса волновой функции – на нее «влияет» процесс измерения. Акт измерения вызывает «мгновенное схлопывание», а процесс измерения случайно выбирает в точности одну из возможностей, допустимых волновой функцией данного состояния, волновая функция же мгновенно изменяется, чтобы отразить этот выбор. С физической точки зрения не понятен статус процесса измерения, ибо такая интерпретация ставит процессы измерения в особое положение, но не определяет ясно, что они представляют собой, не указывает на их отличительные черты, а также вводит неопределённое понятие измерения, которое превращает вероятностные функции в достоверные результаты измерений. В такой интерпретации получает особый статус и сам «наблюдатель».

Статистическая интерпретация квантовой механики дана М.Борном. В ней теряется смысл понятия «траектории движения электрона», вместо этого рассматривается вероятность нахождения электрона в определённом элементе пространства, окружающего ядро атома.

В рамках концепции объективной редукции, разрабатываемой Р.Пенроузом, гипотетический процесс спонтанного схлопывания, коллапса волновой функции происходит за счет гравитационных эффектов на микроуровне. Отсюда следует вывод о возможности объективной редукции или коллапса волновой функции, в которой происходит редукция состояний сознания к квантовым состояниям.

Идея о включении человека (и сознания) в структуру физической реальности реализовалась в формулировке антропного принципа, с позиции которого человек является наблюдателем, без которого Вселенная не могла бы существовать. В зависимости от версий антропного принципа (слабой, сильной и т.п.) формулируются различные постулаты от «тонкой настройки вселенной» до «особой роли сознания наблюдателя в квантовой механике».

Рассмотрим проблему наблюдателя в физической теории в контексте операциональной трактовки на примере теории де Бройля-Бома (механика Бома или причинная интерпретация) – это одна из интерпретаций квантовой теории, предложенная Бомом в 1952 [1].

Теория де Бройля-Бома – простейший пример теории со скрытыми переменными. В дополнение к волновой функции, которая эволюционирует согласно уравнению Шрёдингера, для полноты описания теория также включает в себя фактическую конфигурацию системы частиц, даже в ситуациях *отсутствия наблюдателя*. Эволюция во времени конфигурации (то есть, позиции всех частиц или конфигурации всех полей) определяется волновой функцией с помощью «задающего уравнения». Теория де Бройля-Бома выражает в явном виде фундаментальную *нелокальность квантовой физики*. Скорость какой-либо одной частицы зависит от величины волновой функции, которая зависит от конфигурации всей вселенной. Проблема измерения разрешима в этой теории, поскольку результат

эксперимента регистрируется конфигурацией частиц в экспериментальной установке после его завершения. Коллапс волновой функции в копенгагенской интерпретации предстает в виде акта измерения, вызывающего мгновенное схлопывание, «коллапс волновой функции». Это означает, что процесс измерения случайно «выбирает» в точности одну из возможностей, допустимых волновой функцией данного состояния, а волновая функция мгновенно изменяется, чтобы отразить этот выбор. Коллапс волновой функции называют редукцией фон Неймана, под которой понимается мгновенное изменение описания квантового состояния (волновой функции) объекта, происходящее при измерении.

Другая интерпретация процессу измерения дана в *теории де Бройля-Бома*. Первоначально теория «волны-пилота» как теории со скрытыми переменными была представлена Луи де Бройлем в 1927 году. Её более современная версия в интерпретации Бома остаётся попыткой интерпретации квантовой механики как детерминированной теории, в которой такие понятия, как мгновенный коллапс волновой функции и парадокс кота Шредингера находят своё объяснение. Эта теория основывается на реализме (это означает, что ее понятия существуют независимо от наблюдателя) и детерминизме. Положение и импульс каждой частицы считаются скрытыми переменными, они определены в любое время, но не известны наблюдателю, начальные условия для частицы также не известны точно, так что с точки зрения наблюдателя, есть неопределенность в состоянии частицы, которая соответствует принципу неопределенности Гейзенберга. Набору частиц соответствует волна, которая эволюционирует, подчиняясь уравнению Шредингера. Каждая из частиц следует по детерминированной траектории, которая ориентируется на волновую функцию, плотность частиц соответствует величине волновой функции. Волновая функция не зависит от частиц и может существовать так же в виде «пустой волновой функции». Как и большинство интерпретаций квантовой механики, кроме многомировой интерпретации, эта теория нелокальна. Эта теория предсказывает экспериментальные результаты квантовой механики. Дж. С. Белл подчеркивает [2], что в картине квантовой механики де Бройля-Бома могут существовать «пустые волны», которые описываются волновыми функциями, распространяющимися в пространстве и времени, но не несущие энергию или импульс, и не привязанные к частице.

Вдохновлённый идеями теории де Бройля-Бома, Белл продолжил анализ ЭПР-парадокса и сформулировал свои неравенства. Неравенства Белла предоставили теоретическую базу для возможных физических экспериментов. Результаты, полученные в опытах Фридмана-Клаузера и в опытах Аспэ, подтверждали идею об отсутствии эйнштейновского локального реализма. Окончательный удар по локальности был нанесён многосвязными состояниями Гринбергера-Хорна-Цайлингера, заложившими базис квантовой телепортации. В 2010 году Джон Клаузер, Ален Аспэ и Антон Цайлингер стали лауреатами премии Вольфа по физике за фундаментальный концептуальный и экспериментальный вклад в основы квантовой физики, в частности за серию возрастающих по сложности проверок неравенств Белла (или расширенных версий этих неравенств) с использованием запутанных квантовых состояний. В 2010 году международный коллектив учёных из Франции, Германии и Испании получил и исследовал запутанные квантовые состояния электронов, то есть частиц с массой, в твёрдом сверхпроводнике из углеродных нанотрубок [3]. В 2011 году исследователям из Института квантовой оптики общества Макса Планка удалось создать состояние квантовой запутанности между отдельным атомом рубидия и конденсатом Бозе-Эйнштейна, разнесёнными на расстояние 30 метров [4]. В рамках квантово-механического явления запутанности предложена новая интерпретация решения парадокса кота Шредингера. Представим разнесённых в пространстве наблюдателей А и Б, у

которых имеется по экземпляру квантово-запутанных ящичков с котами Шрёдингера, находящимися в суперпозиции «жив-мёртв». Если в момент t_1 наблюдатель А открывает ящик, то его кот равновероятно оказывается либо живым, либо мёртвым. Если живым, то в момент t_2 наблюдатель Б открывает свой ящик и находит там мёртвого кота. Проблема в том, что до исходного измерения нет возможности предсказать, у кого именно что окажется, а после «один кот жив, другой мёртв», и «назад» ситуацию не повернуть. Слабые квантовые измерения позволяют вовремя остановить «убийство» кота Шрёдингера и оставить его в исходной суперпозиции «жив-мёртв». Такой подход классических ограничений был найден в 2006 году Коротковым и Джорданом за счёт слабых квантовых измерений (англ. «weak quantum measurement»). Оказалось, что можно не распаивать ящик, а лишь чуть-чуть приподнять его крышку и подсмотреть в щёлку. Если состояние кота неудовлетворительно, то крышку можно сразу захлопнуть и попробовать ещё раз. В 2008 году группа исследователей из Калифорнийского университета объявила об успешной экспериментальной проверке данной теории [5]. «Реинкарнация» кота Шрёдингера стала возможной. Наблюдатель А теперь может приоткрывать и закрывать крышку ящика, пока не убедится, что у наблюдателя Б кот окажется в нужном состоянии.

Открытие возможности «обратного коллапса» во многом перевернуло представления о базовых принципах квантовой механики. Стало понятно, что можно не просто передавать потоки запутанных частиц в разнесённые в пространстве приёмники, но и хранить такие частицы неопределённо долгое время в приёмниках в состоянии суперпозиции для «последующего использования». Математически могут существовать ситуации, при которых пучок фотонов или отдельный фотон будет бесконечно циркулировать по сложной замкнутой траектории, выписывая тор в пространстве. И это не просто математическая абстракция. В 2008 году исследователи занялись анализом возможной физической реализацией [6–7]. В результате были найдены технические способы, позволяющие реализовать такие математические решения. Оказалось, что пучок света действительно можно «свернуть» в замкнутый тороидальный узел и «положить на место», и такое состояние останется стабильным и самоподдерживающимся. Квантовая телепортация, основанная на запутанных квантовых состояниях, используется в таких интенсивно исследуемых областях, как квантовые вычисления и квантовая криптография, которые являются одним из бурно развивающихся прикладных направлений квантовой физики. Однако в связи с открытием и успешным тестированием обратимых слабых квантовых измерений основы надёжности квантовой криптографии оказались под большим вопросом [8].

Проанализируем *многомировую интерпретацию квантовой механики*, которая позволяет представить запутанные частицы как проекции всех возможных состояний одной и той же частицы из параллельных вселенных. В многомировой интерпретации квантовой механики, в отличие от теории де Бройля-Бома, нет необходимости вводить понятие пустой волновой функции. Многомировая интерпретация – это интерпретация квантовой механики, которая предполагает существование «параллельных вселенных», в каждой из которых действуют одни и те же законы природы и которым свойственны одни и те же мировые постоянные, но которые находятся в различных состояниях. Многомировая интерпретация не предполагает реального наличия именно других миров, она предлагает лишь один реально существующий мир, который описывается единой волновой функцией, которую, однако, для завершения процесса измерения какого-либо квантового события, необходимо разделить на наблюдателя (который проводит измерение) и объект, описываемых каждый своей волновой функцией. Идеи многомировой интерпретации квантовой механики созвучны теории хаотической инфляции

Вселенной (которая при измерении делится на множество невзаимодействующих миров и гипотетически часть из них может сильно отличаться от остальных). В этой интерпретации эксперимент Шредингера с котом приводит к расщеплению миров еще до открытия коробки. Однако многомировую интерпретацию нельзя в полной мере считать научной, поскольку она не соответствует определенным методологическим критериям, к примеру, представление о наличии большого количества миров, которые мы не наблюдаем, является также крайним нарушением принципа Оккама, который гласит, что «сущности не следует умножить сверх необходимости» (не следует умножать физические законы сверх необходимости). Также формализм квантовой теории в многомировой интерпретации предлагает бесконечно много способов для разложения квантового состояния Вселенной в суперпозиции ортогональных состояний, что свидетельствует о невероятной сложности рассматриваемой системы (не возможности применить принцип фальсификации).

Применим операциональный подход к интерпретации квантовой механики. Д.А. Киржниц отмечает, что параллельно с пробуждением интереса к нелокальной теории изменилась и оценка присущих ей трудностей. Однако, по мнению исследователя, эти трудности, по крайней мере, их подавляющая часть, не носят принципиального характера, а возникают в результате слишком прямолинейного обобщения аппарата локальной теории поля. Возможность их преодоления может быть проиллюстрирована моделями нелокальной теории, согласно Д.А. Киржницу, являются внутренне согласованными и совместимыми световым сигналам и т. п. [9].

Смысл основных понятий нерелятивистской квантовой физики: волновая функция, редукция, приготовление и измерение состояния, проекционный постулат, соотношение неопределенностей может быть пояснено с помощью реалистических экспериментальных процедур. В качестве примеров Д.Н. Клышко рассматривает измерения поляризации фотонов, координаты и импульса частиц, а также корреляции Эйнштейна-Подольского-Розена, эффекты Ааронова-Бома, «квантовой телепортации» и др. [10]. Д.Н. Клышко предлагает интерпретировать основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения, которая позволяет определять основные понятия с помощью подходящих экспериментальных операций-процедур.

Как альтернативу квантовой нелокальности Д.Н. Клышко предлагает использовать концепцию неколмогоровости квантовой механики, подразумевающей отсутствие совместных распределений и априорных значений в случае некоммутирующих наблюдаемых. С операциональной точки зрения можно рассматривать редукцию волновой функции (проекционное правило фон Неймана) как чисто математическое и не придавать никакого физического смысла. Также необходимо тщательно различать процедуру измерения и процедуру приготовления, при таком подходе проективный постулат не нужен, потому что можно рассматривать измерение и как приготовление новой волновой функции, однако в реальных квантовых экспериментах для приготовления волновой функции и для измерения используются совершенно различные процедуры [там же, с.987]. Клышко отмечает, что при количественном расчете экспериментов в настоящее время понятие редукции волновой функции в момент измерения фактически излишне, оно является лишь удобным вспомогательным средством для наглядного описания наблюдаемых эффектов.

Под эффектом наблюдателя понимается влияние наблюдения над физической системой. По аналогии с эффектом в психологии, когда люди меняют свое поведение, когда осознают, что за ними следят. Это может также означать: наблюдатель влияет на физический процесс (однако это влияние можно уменьшить, используя лучшие инструменты или методы наблюдения). В квантовой механике,

которая занимается изучением очень маленьких объектов, наблюдать за системой без изменения системы сложно, так что наблюдатель может «рассматриваться» как часть системы. Основой для современной квантовой теории является представление, что нет явления, пока оно не наблюдается. Однако нельзя путать принцип неопределенности с эффектом наблюдателя. Принцип неопределенности в его стандартной форме на самом деле описывает, как именно мы можем измерить положение и импульс частицы, согласно этому принципу при увеличении точности измерения одной величины, мы вынуждены терять точность в измерении другом. Это операционалистская трактовка принципа неопределенности Гейзенберга, однако существует альтернативная трактовка в духе «эффекта наблюдателя», согласно которой наблюдатель нарушает систему, что приводит к ошибкам, однако это не так, ибо «принцип неопределенности» наиболее часто используется на практике.

Выводы. В операциональной трактовке смысл основных понятий нерелятивистской квантовой физики: волновая функция, редукция, приготовление и измерение состояния, проекционный постулат, соотношение неопределенностей может быть пояснено с помощью реалистических экспериментальных процедур. Понятие редукции волновой функции в момент измерения фактически излишне, оно является лишь удобным вспомогательным средством для наглядного описания наблюдаемых эффектов, тем самым снимается «проблема наблюдателя». Такие представления определяются позицией научного реализма: научные теории должны давать истинное или приближенное к истинному описание очевидных и неочевидных аспектов не зависящих от субъективных аспектов окружающего мира.

Литература

1. Bohm D. *Unfolding Meaning: A Weekend of Dialogue with David Bohm.* – UK and New York : Routledge, 1996. – 192 p.
2. Bell J. S. *Speakable and Unsayable in Quantum Physics: Collected Papers on Quantum Philosophy* / J. S. Bell. – Cambridge : Cambridge University Press. – 283 p.
3. Wolf Foundation: Physics [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.wolffund.org.il/index.php?dir=site&page=winners&name=&prize=&year=&field=3008>.
4. Carbon Nanotubes as Cooper-Pair Beam Splitters / [L. G. Herrmann, F. Portier, P. Roche et.] // *Physical Review Letters.* – 2010. – В.2. – V. 104. – Режим доступа : <http://physics.aps.org/articles/v3/3>.
5. Gasperini M. *The Pre-Big Bang Scenario in String Cosmology* / Gasperini Maurizio and Veneziano Gabriele // *Physics Reports.* – 2003. – Vol. 373. – Nos. 1–2. – hep-th/0207130. – P. 1–212.
6. Katz N. *An empirical Bayes approach to estimating ordinal treatment effects* / N. Katz N. // *Political Analysis.* – 2011. – № 19 (1). – 20 p.
7. Katz N. *Reversal of the Weak Measurement of a Quantum State in a Superconducting Phase Qubit* / Katz N., et al. // *Physical Review Letters* : журнал. – 2008. – В. 20. – Т. 101. – DOI:10.1103/PhysRevLett.101.200401
8. *A proximity-based programmable DNA nanoscale assembly line* / Hongzhou Gu, Jie Chao, Shou-Jun Xiao and Nadrian C. Seeman // *Nature.* – 2010. – V. 465. – P. 202–205.
9. Киржниц Д. А. *Лекции по физике* / Д. А. Киржниц. – М. : Наука, 2006. – 244 с.
10. Клышко Д. Н. *Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения* / Д. Н. Клышко // *УФН.* –1998. – Т. 168. – С. 975–1015.