

Интерференция возможностей или как «интегралы по траекториям» объясняют вероятностную причинность.

Терехович Владислав Эрикович

Кафедра философии науки и техники, Философский факультет
Санкт-Петербургский государственный университет
v.terekhovich@gmail.com

В статье описана модель «интерференции возможностей», снимающая противоречие между вероятностной причинностью квантовой механики и однозначной причинностью обычных объектов, при этом первая при определенных условиях переходит во вторую. Для этого объединяются идеи нескольких интерпретаций квантовой механики, концепция возможного и действительного модусов существования и метод «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана, в классическом пределе переходящий в принцип наименьшего действия. Предлагаемый подход решает проблему измерения квантовых объектов, не требуя особой роли сознания, и в отличие от других интерпретаций, может быть распространен на классическую механику и общую теорию относительности. Философским и физическим смыслом волновой функции становится описание одной из возможностей объекта.

Ключевые слова: принцип наименьшего действия, интерпретации квантовой механики, интегралы по траекториям Фейнмана, вероятностная причинность.

The Interference of Possibilities or as "Path integrals" explains the Probabilistic Causality

Terekhovich V. E.

The model described in the paper removes contradiction between the probabilistic causality of quantum mechanics and the unique causality of normal subjects and the first one passes into the second one under certain conditions. To get this, we combine the ideas of some interpretations of quantum mechanics, the philosophical concept of potential and actual existence and R. Feynman's method of "path integral", that goes into the Principle of least action in the classical limit. The proposed approach solves a problem of measurement of quantum objects, and don't need a special role of the observer's consciousness. In contrast to other interpretations, it can be extended to classical mechanics and general relativity. Thus, the philosophical meaning of the wave function is that it describes one of possibility of object.

Keywords: Principle of least action, interpretations of quantum mechanics, Feynman's path integrals, probability causality.

Введение.

В классической парадигме объекты подчиняются однозначной причинности, в описании микрообъектов не обойтись без причинности вероятностной. Уравнение волновой функции однозначно определяет эволюцию квантовой системы, но не предназначено для однозначного (а только вероятностного) предсказания состояния системы в результате измерения, которое приводит к случайному изменению волновой функции с бесконечной скоростью, в результате чего возникает так называемая «редукция волнового пакета» [1]. В науке принято использовать концепции, основанные как на однозначной, так и на неоднозначной причинности. Первые предполагают, что полное знание начальных условий и закона изменения системы во времени позволяет однозначно определить ее состояние в любой момент прошлого или будущего. Вторые оперируют вероятностями будущих состояний. Первые можно считать идеализацией, пригодной для практических целей, результатом статистического усреднения, предположений о замкнутости системы и независимости ее частей. В этом случае предсказания статистики приобретают практически определенный, а не вероятностный характер [2].

Несмотря на то, что большинство физиков мало обеспокоено проблемой «редукции волновой функции», зачастую не зная о ней вовсе [3], приблизиться к пониманию происходящего с причинностью при переходе с одного уровня описания Природы на другой - одна из задач философии физики. М. Борн считал, что физика нуждается в обобщающей философии, ведь слово «реальность» – как и большинство слов – не имеет однозначного смысла [4]. Э. Шредингер удивлялся равнодушию физиков, «принимающих современную интерпретацию просто потому, что она работает, не беспокоясь об обосновании» [5]. В.А. Фок считал, что требуется разработка философских вопросов, рассматривающих «вероятность как фундаментальное понятие и отличать потенциально возможное от осуществившегося» [6]. В.Л. Гинзбург писал об интерпретации квантовой механики, как одной из трех великих проблем физики [7]. По мнению Р. Пенроуза, онтология все еще имеет для квантовой механики решающее значение [8].

Для решения проблем измерения, причинности и реальности в квантовой механике создано большое число ее интерпретаций [9]. Однако, те из них, которые за основу взяли однозначную причинность и классическую реальность, так и не смогли объяснить квантовые парадоксы. А интерпретации, эти парадоксы объясняющие, не способны без противоречий описать механизм перехода причинности и реальности от квантовой к классической.

Предлагаемое в статье решение – модель «интерференции возможностей» основана на предположении о фундаментальной роли вероятностной причинности, которая при

определенных условиях переходит в причинность однозначную. Обосновывается гипотеза о том, что метод «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана является наглядным средством описания вероятностной причинности квантовых процессов в терминах перехода из состояния возможного в состояние действительное. Именно этот формализм через принцип наименьшего действия объединяет уравнения квантовой механики с уравнениями классической механики и общей теорией относительности [10]. Предлагаемая концепция имеет много общего с интерпретациями квантовой механики, использующими понятия «суперпозиция», «когеренция» и «возможность», не требуя при этом особой роли сознания наблюдателя. В результате мы получаем инструмент эффективный для описания трех уровней физической реальности.

Проблема причинности в квантовой механике и ее интерпретации.

Для описания поведения квантовых частиц Э. Шредингер ввел абстрактную волновую функцию и записал ее уравнение, которое однозначно определяет изменение амплитуды вероятности состояния частицы, но не может однозначно предсказать результат его измерения. Измерение приводит к случайному изменению волновой функции, при котором определению подлежат лишь вероятности различных исходов. При этом нарушается однозначная причинно-следственная связь. Проблема измерения (часто используются термины «коллапс» или «редукция волнового пакета») возникает при попытке описывать одним уравнением Шредингера состояния до и после взаимодействия [11]. Факт измерения как будто создает новую реальность, зависящую от прибора и экспериментатора.

Среди физиков до сих пор распространен взгляд, что квантовая механика не дает никакой картины «реальности», а ее уравнения следует рассматривать только как удобный математический формализм для вычисления вероятности альтернатив [12]. Однако существует ряд теоретических моделей или интерпретаций, по-своему решающих проблему причинности при измерении [13]. Первое философское решение проблемы предложил Н. Бор, заявив, что скачок волновой функции во время измерения – не изменение реальности, а изменение нашего знания о ней. До измерения о реальности говорить бессмысленно, а факт измерения создает однозначную реальность для того, кто ее измерил. Трактовку Бора, названную «копенгагенской», поддержал В. Гейзенберг, с оговоркой, что до измерения все-таки можно говорить о некоей «полуреальности», потенции, тенденции к осуществлению [14].

А. Эйнштейн, М. Планк и Э. Шредингер считали, что вероятностная причинность обусловлена недостатком информации. Предпринимались попытки свести вероятностную причинность к статистике. Например, считать волновую функцию соответствующую не

одному электрону, а облаку электронов, распределенных в пространстве [15]. Тогда в момент измерения фиксируются не индивидуальные однозначные характеристики отдельных электронов, а статистические характеристики их совокупности. Для тех же целей в *ансамблевой интерпретации* была использована аналогия со статистической термодинамикой [16]. Принято считать, что попытки эти не удалась, поскольку понятие вероятности в квантовой механике принципиально отличается от измерительной вероятности в статистической физике [17].

Идея неполноты квантовой механики использована в *теории со скрытыми параметрами* Д. Бом [18]. Бом сохранил реальность волновой функции за счет введения нового скрытого поля - нелокального квантового потенциала, зависящего от положения всех частиц сразу, но не зависящего от расстояния между ними. Бом использовал понятие перепутанности состояний до измерения, введенное Шредингером. Такая интерпретация не противоречит результатам проверки теоремы Белла, исключаяющим только локальные скрытые параметры [19]. Позднее Бом развил *холистскую интерпретацию*, согласно которой только в момент извлечения из неопределенного или запутанного состояния целостного единства мы воспринимаем объект как реальный, хотя он существовал и до измерения. Как только измерение или взаимодействие прекращается, объект возвращается в имплицативное состояние мирового целого [20].

Х. Эверетт предположил, что волновое уравнение однозначно предсказывает поведение частицы не только до, но и после измерения [21]. При этом все вероятности реализуются, но в разных «мирах». *Многомировая интерпретация* не означает, что существует множество реальных миров, имеются в виду разные проекции одного мира, сосуществующие в виде квантовой суперпозиции Вселенной. Каждая проекция включает в себя объекты, окружающую их среду и экспериментаторов в «соотнесенных состояниях». Во время измерения никакого коллапса не происходит, все альтернативные состояния продолжают сосуществовать реально. Но поскольку отдельные состояния сознания экспериментатора перепутаны (часто используются термины «соотносятся» или «коррелируют») с состояниями, соответствующими результатам измерения, то один из вариантов объяснения – предположить, что для каждого из возможных результатов измерения существует своя «проекция» экспериментатора в своем «мире». Каждая такая проекция получает свой результат, полагая, что существует лишь он один [22]. То, какую альтернативную реальность наблюдать определяет сам наблюдатель [23]. Неясно, почему такой выбор всегда подчиняется классическим законам и почему он кажется нам однозначным - детерминистическим?

Развитием концепций Бома, но без скрытых параметров, и идей Эверетта, но без размножения миров, можно считать популярную сегодня *концепцию декогеренции* [24], согласно которой система не рассматривается вне отношений с окружающей средой, их состояния перепутаны. До измерения в суперпозиции сосуществуют разные состояния, волновые функции которых находятся в состоянии интерференции. В момент измерения объект взаимодействует с окружающей средой в виде прибора и наблюдателя, в результате волновая функция одного из состояний изменяется так, что перестает интерферировать с остальными. Суперпозиция распадается, одно из альтернативных состояний выходит из перепутанного неопределенного статуса в наблюдаемую реальность. Вместо коллапса говорят о декогеренции или рассогласовании альтернативных состояний объекта за счет его взаимодействий с другими объектами [25].

Существует ряд концепций, которые вместо понятий «миры», «запутанные состояния», «альтернативы» и т.п., используют понятие «возможность». Например, В.А. Фок вслед за Гейзенбергом использует понятие потенциальных возможностей и «осуществившегося» в результате измерения. Состояние (его вероятность), описываемое волновой функцией отражает объективно существующие при данных условиях (независящие от наблюдателя) потенциальные возможности [26]. Но эти состояния не являются действительными, поскольку возможности того или иного результата взаимодействия объекта с прибором еще не осуществились. Переход от возможного к осуществившемуся, к действительному происходит при взаимодействии или измерении [27]. Изменение постановки вопроса о вероятностях снимает проблему измерения. Отсюда делается вывод о том, что вероятностная форма законов природы – объективна, а детерминистическая форма – наше упрощение.

К. Поппер, первоначально будучи приверженцем ансамблевой интерпретации, позже перешел к *пропензитивной интерпретации*, исходящей из «объективного» понятия вероятности как возможности или потенции в смысле философии Аристотеля [28]. По Попперу, волновая функция описывает не свойства объектов, а их диспозиции (потенции, предрасположенности) проявлять те или иные свойства в процессе измерения. Причем предрасположенности так же реальны как силы или силовые поля [29].

Метод Фейнмана.

У трактовок измерения волновой функции как перехода из состояния возможного в действительное остаются два недостатка. Во-первых, не ясен механизм перехода. Во-вторых, не понятна их связь с законами других разделов физики. Решению обеих проблем может способствовать метод «интегралов по траекториям» [30] - оригинальный подход,

предложенный Ричардом Фейнманом для новой математической формулировки квантовой механики.

Объясняя эксперимент с двумя щелями, где возникает интерференция двух несовместимых траекторий электронов, Фейнман предложил не отказываться от суждений о траектории до измерения, как копенгагенцы, а отказаться от постулата о несовместимости траекторий, изменив правило сложения вероятностей [31]. В момент измерения происходит выбор одного из интерферирующих альтернативных или возможных состояний. В результате, ранее совместимые состояния становятся несовместимыми и перестают интерферировать, что наблюдается как «редукция волнового пакета». При этом важен факт взаимодействия с прибором, а вовсе не наличие сознательного наблюдателя [32].

Чтобы подсчитать вклад всех возможных траекторий квантовой частицы, Фейнман предположил, что частица движется одновременно по всем возможным траекториям, но волны амплитуды вероятности этих путей гасятся в конечной точке траектории так, что максимальная вероятность отвечает действительному пути, для которого вариация некоторой величины равна нулю, а сама величина минимальна. По аналогии с классической механикой эту величину Фейнман назвал «действием». Каждый возможный путь частицы связан с изменением фазы ее волны амплитуды вероятности. Вблизи действительного пути волны находятся почти в одной фазе и взаимно усиливаясь, порождают значительный эффект, наблюдаемый как «реальный». Остальные пути существуют вполне реально (часто их называют виртуальными), просто они нами не наблюдаются, точнее, вероятность их наблюдения крайне мала [33]. Предлагаемое далее решение проблемы вероятностной причинности объединяет «интегралы по траекториям» с интерпретациями, использующими модель перехода из возможности в действительность.

Концепция «интерференции возможностей».

Будем рассматривать квантовый объект как суперпозицию всех его возможных альтернативных состояний в n -мерном конфигурационном пространстве. Суперпозиция означает то, что до измерения состояния существуют совместно и независимо друг от друга. Альтернативность означает то, что эти состояния взаимно исключают друг друга после измерения. Каждому возможному состоянию соответствует волновая функция, описывающая его эволюцию - изменение амплитуды его вероятности. Возможные состояния объекта могут быть согласованы или когерировать друг с другом и с возможными состояниями других объектов (окружающей средой). Согласованность означает, что разность фаз

соответствующих волновых функций постоянно во времени или изменяется с постоянной скоростью.

Волновые функции всех согласованных возможных состояний объекта и согласованных с ним возможных состояний других объектов – «пакета возможностей» (термин В.П. Визгина) интерферируют в соответствии с правилом сложения их фаз. Результирующее состояние характеризуется максимальной устойчивостью в данных условиях и описывается максимальной вероятностью. Суммарная вероятность состояния объекта определяется как квадрат суммы амплитуд вероятности всех его возможных состояний. Это результирующее состояние можно называть «действительным» состоянием. Все остальные состояния объекта можно по-прежнему называть «возможными». Совокупность первых образует «действительную реальность», а совокупность вторых – «возможную реальность». И та, и другая сосуществуют «параллельно» в каждой точке конфигурационного пространства.

При любом взаимодействии одного квантового объекта с другим (он тоже - суперпозиция возможных состояний) для обоих происходит изменение некоторых волновых функций их возможных состояний. Меняется характер их согласованности – меняется разность фаз с собственными «пакетами возможностей» и с «пакетами возможностей» других объектов. В результате все они иначе интерферируют друг с другом, иначе складываются их фазы, возникает новое результирующее состояние – максимально устойчивое и максимально вероятное в изменившихся условиях. Иначе говоря, суперпозиция новых возможных состояний взаимодействующих объектов образует их новое действительное состояние, характеризующееся в соответствии с моделью Фейнмана, минимальным значением квантового действия и максимальной вероятностью.

В классическом пределе (квантовое действие \rightarrow классическое действие) описанный механизм трансформируется в принцип наименьшего действия, гласящий, что из всех возможных траекторий объект следует по траектории, вдоль которой действие стационарно и минимально. В релятивистском пределе это правило соответствует принципу максимального собственного времени, а траектория соответствует мировой линии, называемой геодезической [34]. Два последних принципа относятся уже не к вероятностной, а к экстремальной причинности, которая в свою очередь, приближенно для макрообъектов может быть заменена однозначной динамической причинностью.

Обсуждение.

Понятия возможного и действительного, как и большинство понятий физики, пришло из философии. Аристотель ввел понятия «динамис» - возможность и «энергея» -

действительность. Под действительностью он понимал то, что обрело форму, вид, эйдос: «Все изменяется из сущего в возможности в сущее в действительности» [35]. Г. Лейбниц считал, что если от возможности следует перейти к действительности, то количество существования должно быть наивозможно большим при данном возможном порядке существования [36]. По мнению В.П. Визгина: «В мире, где есть одна «действительность», где «возможности» не существует, не существует и времени, время есть создание и исчезновение, переоформление «пакета возможностей» того или иного существования» [37]. С точки зрения диалектики: «Случайность – это реализация одной из нескольких возможностей, имеющихся у объекта при определенных условиях» [38]. Особую популярность сегодня приобрела тема виртуальной реальности [39]. Например, для С.С. Хоружего виртуальная реальность – это недо-выступившее, недо-рожденное бытие [40].

Среди физиков со времен Лагранжа широко распространен инструменталистский подход к математическим объектам типа лагранжиан, гамильтониан или действие, за которыми не стоит никаких реальных величин [41]. С этой точки зрения принцип наименьшего действия не может дать ничего нового в понимании причинности или реальности. Однако идея использования модусов возможного и действительного при описании вероятностной причинности находит много сторонников. В.А. Ассеев указывает: «В основном уравнении квантовой механики отражается однозначная связь, но связь не осуществившихся событий, а потенциальных их возможностей и выражающих их вероятностей... Принцип наименьшего действия является обобщенной формой выражения детерминизма в физике» [42].

А.Ю. Севальников обосновывает полионтичную модель квантовой механики, которая является не «метафорой», а отображает действительные черты реальности [43]. Он же указывает, что точку зрения на результат измерения как осуществившееся потенциальные возможности разделяет достаточно большое число физиков и философов [44]. Под словом состояние он предлагает понимать возможность, полагая, что уравнение Шредингера описывает происходящее на уровне потенциальных возможностей, и лишь во время измерения, когда вмешивается «иное», происходит актуализация возможного [45]. Ф. Дайсон считает, что «материя, согласно квантовой механике не есть инертная субстанция, но является активным агентом, постоянно делающим выбор между альтернативными возможностями согласно вероятностным законам» [46].

М.Э. Омеляновский считает, что волновая функция описывает не частицу «саму по себе», а потенциальные возможности ее взаимодействия с прибором [47]. Точку зрения, во многом согласованную с концепцией предрасположенностей Поппера, предлагают Л.Б.

Баженов [48] и Н.Ф. Овчинников [49]. М. Шарлов рассматривает реалистичные интерпретации «интегралов по траекториям», согласно которым частица действительно следует по траекториям, вносящим вклад в их интеграл [50]. По мнению А.А. Печенкина интерпретации, трактующие волновые функции как «потенциальные возможности» переходящие в действительность, отличаются от модальной и многомировой интерпретаций [51]. В последних измерение не создает значение величины, а лишь обнаруживает одно из возможных значений (состояний), существующих до измерения как возможности. С точки же зрения «интерференции возможностей» переход в действительность, выход из запутанного состояния, обнаружение одного из возможных состояний – разные описания одного и того же процесса.

Метод «интегралов по траекториям» объясняет, каким образом уравнения классической и релятивистской механики становятся предельным случаем уравнений квантовой механики. Предполагается, что классическое тело, как фотон или электрон, движется сразу по всем возможным путям (мировым линиям) между начальным и конечным событиями. Но поскольку фаза волны амплитуды вероятности относительно велика, набор мировых линий, вносящих значительный вклад в вероятность обнаружения тела, сокращается до узкого пучка. В пределе это единственная мировая линия, предсказанная классическим принципом наименьшего действия Гамильтона [52].

По мнению Г.Я. Мякишева, именно в изложении Фейнмана квантовая механика предстает как непосредственное обобщение классической механики [53]. В.А. Ассеев считает, что Фейнману удалось доказать предположение Эддингтона о том, что принцип наименьшего действия тождественен принципу максимальной вероятности [54], а состояние мира, которое осуществлено в действительности, является наиболее вероятным состоянием [55].

Выводы.

Интерпретации квантовой механики, отрицающие беспричинный «коллапс» волновой функции при измерении, так или иначе, используют философские категории «возможность» или аналогичные ей, а также понятия «суперпозиция» и «интерференция». Отличаются они в первую очередь ответами на два связанных вопроса. Насколько равноправны наблюдаемые реальности? Играет ли наблюдатель особую роль в формировании конкретной реальности и типа ее причинности? По нашему мнению, наименее противоречивый ответ на оба вопроса дает концепция «интерференции возможностей», объединяющая идеи нескольких интерпретаций квантовой механики, философскую концепцию возможного и

действительного модусов существования, а также метод «интегралов по траекториям» Р. Фейнмана, в классическом пределе переходящий в принцип наименьшего действия. Обобщим основные положения этой концепции.

(а). Волновые функции, характеризующие возможные состояние объектов, интерферируют путем сложения их фаз. Условие интерференции - их сосуществование (суперпозиция) и согласованность или когерентность (постоянство разности фаз).

(б). Любое взаимодействие объектов друг с другом и с окружающей средой сводится к интерференции пакетов их возможных состояний.

(в). До интерференции волновые функции описывают возможные состояния (траектории) объекта. Образованное в результате интерференции действительное состояние (траектория) эквивалентно реализации одного из возможных состояний. Действительное состояние отличается от возможных состояний тем, что одна из его существенных характеристик, например, действие принимает экстремальное значение, что соответствует максимальной вероятности или максимально устойчивому распределению вероятностей.

(г). Состояния квантовых объектов при масштабах много больших планковских стремятся к классическим состояниям макроскопических объектов, траектории – к геодезическим мировым линиям, фазы волновой функции - к классическому действию.

Преимущество концепции в том, что она снимает противоречие вероятностной и однозначной причинности. Вероятностная причинность переходит в экстремальную, которая в пределе становится однозначной. «Интерференция возможностей» согласуется с популярными интерпретациями квантовой механики, объединяя их достоинства, а также с философской традицией описания возможного и действительного модусов существования. Понятие «возможность», используемое в интерпретациях квантовой механики, в «интегралах по траекториям», в принципе наименьшего действия и его аналогах, вместо статуса метафоры и математической абстракции получает онтологический статус. Фраза «отбор из всех возможных состояний (траекторий)» обретает физический смысл сложения фаз. Волновая функция становится формальным выражением возможности. Философское понимание действительности как осуществленной возможности получает физическое объяснение через «интегралы по траекториям» и математическое представление в вариационном исчислении. Разделение действительной и возможной реальности производится с помощью механизма интерференции волновых функций. И, наконец, объясняется, каким образом классическое взаимодействие макроскопических тел сводится к интерференции их волновых функций

Как у любой гипотезы у концепции «интерференции возможностей» есть свои недостатки. В частности остается нераскрытой ее связь с принципами сохранения и симметрии. Не вполне ясен механизм интерференции с бесконечной скоростью, и то, как он соотносится с общей теорией относительности.

Автор выражает искреннюю благодарность за плодотворные дискуссии в процессе подготовки статьи проф. Асееву В.А., проф. Севальникову А.Ю. и асп. Прозорову А.А.

Примечания.

1. Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. - М., 1957. - Т. LXII. - № 4. - С. 472.
2. См.: Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика Ч. 1 // Теоретическая физика. В 10-ти томах. - М., 1995. - С. 16-30.
3. См.: Липкин А.И. Две методологические революции в физике – ключ к пониманию оснований квантовой механики // Вопросы философии. - М., 2010. - № 4. – С. 74-90.
4. См.: Борн М. Физика в жизни моего поколения. Сборник. - М., 1963. – С. 269.
5. Там же, С. 255.
6. Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. - М., 1957. - Т. LXII. - № 4. - С. 473.
7. См.: Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века? // В.Л. Гинзбург. О науке, о себе и о других: статьи и выступления. - М., 2003.
8. См.: Пенроуз Р. Путь к реальности или законы, управляющие Вселенной. - М.-Ижевск, 2007. – С. 656.
9. См., например: Jammer M. The Philosophy of Quantum Mechanics. - Wiley, 1974.; Севальников А.Ю. Современное физическое познание: в поисках новой онтологии. - М., 2003.; Пенроуз Р. Путь к реальности или законы, управляющие Вселенной. - М.-Ижевск, 2007.
10. См.: Ogborn J., Taylor E.F. Quantum physics explains Newton's laws of motion. Physics Education. - 2005.- №40, is. 1.
11. См.: Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. - М., 1957. - Т. LXII. - № 4. - С.472.
12. См.: Пенроуз Р. Путь к реальности или законы, управляющие Вселенной. - М.-Ижевск, 2007. – С. 654.
13. См., например: Печенкин А.А. Три классификации интерпретаций квантовой механики // Философия науки. - М., 1999. - № 5.; Styer D. et al. Nine formulations of quantum mechanics. Am. J. Phys. – 2002. - Vol. 70, is. 3.; Севальников А.Ю. Современное физическое познание: в поисках новой онтологии. - М., 2003.
14. См.: Гейзенберг В. Шаги за горизонт. - М., 1987. – С. 223.
15. См.: Эйнштейн А. Собр. науч. тр. в 5-ти томах. - М., 1966. - Т. 3. – С. 528-529
16. См.: Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. - М., 1976. – С. 616.
17. См.: Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. - М., 1957. - Т. LXII. - № 4. – С. 471.
18. См.: Бом Д. О возможности интерпретации квантовой теории на основе представления о “скрытых” переменных // Вопросы причинности в квантовой механике. - М., 1955. – С. 35.
19. См.: Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. - Долгопрудный, 2008. – С. 178.
20. См.: Bohm D. Wholeness and the Implicate Order. - London: Routledge, 1980.
21. См.: Everett H. Relative State Formulation of Quantum Mechanics. Reviews of modern physics. - 1957. - Vol. 29. - № 3.– С. 454-462.
22. См.: Пенроуз Р. Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. - М.-Ижевск, 2007. – С. 655.
23. См.: Менский М.Б. Человек и квантовый мир. - Фрязино, 2005. – С. 168.
24. См.: Zurek W.H. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical // Rev. Mod. Phys. - 2003. - Vol. 75. - P. 715.

25. См.: *Эткинз П.* Десять великих идей науки. Как устроен наш мир. - М., 2008. – С. 249.
26. См.: *Фок В.А.* Квантовая физика и строение материи // Структура и формы материи. - М., 1967. – С. 179.
27. См.: *Фок В.А.* Об интерпретации квантовой механики // Успехи физических наук. - М., 1957. - Т. LXII. - № 4. – С. 469-471.
28. См.: *Печенкин А.А.* Удалось ли реабилитировать причинность: Карл Поппер против «редукции волнового пакета» // Причинность и телеономизм в современной естественно-научной парадигме / Ред.: Е.А. Мамчур, Ю.В. Сачков. - М., 2002. – С. 183.
29. См.: *Поппер К.* Квантовая механика и раскол в физике. - М., 1998. – С. 17.
30. См.: *Feynman R.* The principle of Least Action in Quantum mechanics // Feynman's thesis: A new approach to quantum theory. Ed.: L. M. Brown. Hackensack. - N. J. et al.: - World scientific, 2005. - XXII. - P. 119.
31. См.: *Фейнман Р., Хибс А.* Квантовые интегралы по траекториям. - М., 1968. – С. 19.
32. См.: *Борн М.* Физика в жизни моего поколения. Сборник. - М., 1963. – С. 32.
33. См.: *Ogborn J., Taylor E.F.* Quantum physics explains Newton's laws of motion. Physics Education. - 2005. - №40, is. 1.
34. См.: *Taylor E.F., Wheeler J.A.* Spacetime Physics. - Freeman, New York, 1992.
35. См.: *Аристотель.* Сочинения. - Калининград, 2002. – С. 385.
36. См.: *Лейбниц Г. В.* Соч. в 4-х томах. - М., 1982. - Т. 1. – С. 284.
37. См.: *Визгин В.П.* Этюд времени // Философские исследования. - М., 1999. - №3. –С. 157.
38. См.: *Бранский В.П., Ильин В.В.* Необходимость и случайность // Диалектика материального мира. Онтологическая функция материалистической диалектики / Ред. В.В. Ильин и Д.А. Гушин. - Л., 1985. – С. 210.
39. См.: статья «Виртуальность» в Новая философская энциклопедия: В 4 томах. Ин-т философии РАН, Нац. общ.-научн. Фонд / Науч.-ред. совет: пред. В.С. Степин. - М.: Мысль, 2000. - Т. 1.
40. См.: *Хоружий С.С.* Род или недород? Заметки к онтологии виртуальности // Вопросы философии. - 1997. - №6. – С. 53.
41. См.: *Липкин А.И.* Место понятий и принципов «парящих над» отдельными разделами физики // Актуальные вопросы современного естествознания. - 2010. - № 8. – С. 51-58.
42. См.: *Ассеев В.А.* Экстремальные принципы в естествознании и их философское содержание. - Л., 1977. – С. 179.
43. См.: *Севальников А.Ю.* Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии. - М., 2009. – С. 181.
44. Там же, С. 75.
45. Там же, С. 98-123.
46. См.: *Dyson F.* Infinite in all direction. - N.Y., 1988. – P. 5.
47. См.: *Омельяновский М.Э.* О взаимоотношении детерминизма и принципа причинности в физике // Спонтанность и детерминизм. / Под ред. В.В. Казютинский, Е.А. Мамчур, Ю.В.Сачков, А.Ю. Севальников и др. Ин-т философии РАН. - М.: Наука, 2006. – С. 11.
48. См.: *Баженов Л.Б.* Вероятностная причинность и теория пропензитивности К. Поппера // Спонтанность и детерминизм. / Под ред. В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др. Ин-т философии РАН. - М., 2006. – С. 66.
49. См.: *Овчинников Н. Ф.* Причинность и мир предрасположенностей // Спонтанность и детерминизм. / Под ред. В. В. Казютинский, Е. А. Мамчур, Ю. В. Сачков, А. Ю. Севальников и др. Ин-т философии РАН. - М., 2006. – С. 75.
50. См.: *Sharlow M.* The Quantum Mechanical Path Integral: Toward a Realistic Interpretation. 2007. - [Эл. ресурс]. – Режим доступа: <http://philsci-archive.pitt.edu/3780/>.
51. См.: *Печенкин А.А.* Философия науки и квантовая механика. - [Эл. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ihst.ru/~apech/apech.pdf>.
52. См.: *Taylor E.F.* A call to action. Am. J. of Phys. - 2003. - Vol. 71, is. 5.
53. См.: *Мякишев Г.Я.* Динамические и статистические закономерности в физике. - М., 1973. – С. 157.
54. См.: *Ассеев В.А.* Экстремальные принципы в естествознании и их философское содержание. - Л., 1977. – С. 192.
55. См.: *Эддингтон А.* Пространство, время и тяготение. - М., 2003. – С. 177.