

О природе вероятности в математике и физике

Михайлов Кирилл Анатольевич,

аспирант,

философский факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, учебно-научный корпус «Шуваловский»

ORCID 0009-0001-0007-1891

airdesign@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются подходы к пониманию природы вероятности в математике и физике с вытекающими из данных подходов следствиями, а также возникающими при этом трудностями. Обсуждается онтологический статус вероятности. Показывается, что теорию вероятностей, вопреки Р. Мизесу, следует относить к классу математических наук, используя определение, сформулированное А.Н. Колмогоровым. Применение этой дефиниции на практике обеспечивается в рамках классического подхода при условии, что связь с физической реальностью задается через понятие равновозможности. Для этого вводятся понятия простых и сложных событий, поясняется способ разложения сложных событий на простые. Обосновывается точка зрения, согласно которой определенную и связанную с физической реальностью указанным способом математическую вероятность можно считать объективной, т. е. существующей независимо от проведения каких-либо испытаний.

Также раскрываются различные интерпретации квантовой механики и подходы к пониманию вероятности. Показано, что в физике на сегодняшний день существующие подходы к пониманию природы вероятности противоречат друг другу. В боровской интерпретации вероятность является аналогом классического подхода – статистической объективной вероятностью, имеющей математическое оформление, а в квантовом байесизме вероятность количественно определяет степень достоверности и зависит от субъекта, проводящего эксперимент. Копенгагенская интерпретация квантовой механики пытается устранить трудности, связанные с объединением в единую картину волновых и корпускулярных свойств света и электронных пучков, путем придания вероятности онтологического статуса, что приводит к проблеме понимания физической реальности. В статье утверждается необходимость новой связи математического описания вероятности с физической реальностью.

Анализируется эмпирический (частотный) подход Р. Мизеса, который вызывает много критики, так как не имеет четкой непротиворечивой формализации. В статье утверждается, что такой подход не согласуется с квантовой механикой. Также рассматривается вероятность, заданная в копен-

гагенской интерпретации квантовой механики М. Борном, который формулирует новое определение вероятности, что не исключает трудности, связанные с физической трактовкой вероятности. Подход Борна строится на основе классического подхода и сводится к формальному аксиоматическому определению, предполагающему трактовку вероятности как математического конструкта. Связь вероятности с физической реальностью и непротиворечивость статистическому методу нахождения значений вероятностей остаются нерешенными проблемами, что создает дуализм понимания вероятности: в математике — одно, в физике — другое. Если в математическом подходе решение обозначенных проблем осуществляется через связь вероятности с физическими свойствами, то в квантовой механике в копенгагенской интерпретации проблемы сохраняются, причиной чего является приращение волновой функции онтологического статуса.

Ключевые слова и словосочетания: вероятность, детерминизм, индетерминизм, интерпретации квантовой механики, математическое понимание вероятности, физическое понимание вероятности, взаимосвязь физики и математики.

On the nature of Probability in Mathematics and Physics

Kirill Mikhaylov,

Postgraduate Student,

Department of Philosophy, Lomonosov Moscow State University,

Leninskie Gory, bld. "Shuvalovsky", Moscow, 119991, Russian Federation

ORCID 0009-0001-0007-1891

airdesign@mail.ru

Abstract

The article discusses approaches to understanding the nature of probability in mathematics and physics with the consequences of these approaches, as well as the difficulties that arise. The ontological status of probability is discussed. It is shown that probability theory, contrary to R. Mises, should be classified as a mathematical science, using the definition formulated by A.N. Kolmogorov. The application of this definition in practice is provided within the framework of the classical approach, provided that the connection with physical reality is defined through the concept of equal opportunity. To do this, the concepts of simple and complex events are introduced, and the method of decomposing complex events into simple ones is explained. The point of view is substantiated, according to which a mathematical probability determined and related to physical reality in this way can be considered an objective probability, that is, existing independently of any tests.

Various interpretations of quantum mechanics and approaches to understanding probability are also revealed. It is shown that in physics today the existing approaches to understanding the nature of probability contradict each other. In the Bohm interpretation, probability is an analogue of the classical approach — statistical objective probability, which has a mathematical formalization, and in

quantum Bayesianism, probability quantifies the degree of reliability and depends on the subject conducting the experiment. The Copenhagen interpretation of quantum mechanics tries to eliminate the difficulties associated with combining the wave and corpuscular properties of light and electron beams into a single picture by giving the ontological status of probability, which leads to the problem of understanding physical reality. The article argues for the need for a new connection between the mathematical description of probability and physical reality.

The empirical (frequency) approach of R. Mises is analyzed, which causes a lot of criticism, as it does not have a clear consistent formalization. The article argues that this approach is inconsistent with quantum mechanics. The probability given by M. Born in the Copenhagen interpretation of quantum mechanics is also considered, which formulates a new definition of probability, which does not exclude the difficulties associated with the physical interpretation of probability. Born's approach is based on the classical approach and is reduced to a formal axiomatic definition, which assumes the interpretation of probability as a mathematical construct. The connection of probability with physical reality and the consistency of the statistical method of finding probability values remain unresolved problems, which creates a dualism of understanding probability: in mathematics – one thing, in physics – another. If in the mathematical approach, the solution of these problems is carried out through the connection of probability with physical properties, then in quantum mechanics, in the Copenhagen interpretation, problems persist, which is caused by giving the wave function an ontological status.

Keywords: probability, determinism, indeterminism, interpretations of quantum mechanics, mathematical understanding of probability, physical understanding of probability, relationship between physics and mathematics.

Библиографическое описание для цитирования:

Михайлов К.А. О природе вероятности в математике и физике // Идеи и идеалы. – 2026. – Т. 18, № 3, ч. 2. – С. 476–492. – DOI: 10.17212/2075-0862-2026-18.3.2-476-492.

Mikhaylov K. On the nature of Probability in Mathematics and Physics. *Ideas and Ideals*, 2026, vol. 18, iss. 3, pt. 2, pp. 476–492. DOI: 10.17212/2075-0862-2026-18.3.2-476-492.

Введение

Известно, что одной из важных задач философии, по крайней мере начиная с Сократа, является прояснение используемых понятий. Например, что есть красота как таковая? Присуща ли она бытию или принадлежит только нашему субъективному восприятию мира? Подобные вопросы ставились и философами, анализировавшими базовые представления математики, физики, биологии и других научных дисциплин. Например, в философии математики остро стоят вопросы об онтологическом статусе математических объектов, о связи математики и физики, о причинах «непостижимой эффективности математики в физике» и др. Так, еще

в пифагорейской традиции числам приписывалось обладание вполне самостоятельным бытием. Этот вопрос связан с более общей философской проблематикой: что есть бытие, что существует само по себе, что обладает субстанциальностью, а что носит лишь акцедентальный характер?

Как ни странно, но после появления теории вероятностей естественный вопрос «Что такое вероятность?» до сих пор остается дискуссионным. Относится ли вероятность только к математике, или она немыслима без той или иной физической ситуации? В само определение вероятности имплицитно входит понятия испытания (эксперимента), благоприятного и неблагоприятного исхода определенного опыта, который может повторяться много раз. Вероятность рассматривается как вероятность исхода определенного испытания. Вытекает ли отсюда, что понятие вероятности относится не к математике, а к физике? А если вероятность – это чисто математическое понятие, то мы сталкиваемся с проблемой связи математики с физикой. Почему предельные абстракции, к которым относятся математические объекты, «работают» в физике, имеющей дело с конкретной экспериментальной ситуацией? Были предложены различные ответы на эти вопросы, но на сегодняшний день общепринятого мнения не существует. В данной статье сделана попытка внести некоторую ясность в указанную проблему.

Принято считать, что теория вероятностей как наука возникла во втором десятилетии XVIII века в работах Я. Бернулли и П. Лапласа. Первоначально вероятность определялась через понятие равновозможности: как отношение числа «благоприятных» исходов к числу всех возможных (равновозможных) исходов. В XX веке данный подход был подвергнут критике из-за непроясненности самого понятия равновозможности, что породило различные дискуссии и поиск альтернативных предложений. В связи с этим возник вопрос, к какому классу наук следует относить теорию вероятностей: к математическим или физическим?

В настоящее время сохраняются разные взгляды на этот вопрос. Так, Р. Мизес, М.А. Леонтович, И. Нейман выдвигали аргументы, обосновывающие отнесение данной теории к физике; в работах А.Я. Хинчина, Б.В. Гнеденко, А.Н. Колмогорова были попытки аргументации принадлежности этой теории к математике. Например, применяя аксиоматический подход, А.Н. Колмогоров попытался вовсе уйти от вопроса о связи понятия вероятности с физической реальностью, абсолютно строго сформулировав теорию вероятностей в рамках чистой математики, не приписывая ей ни интуитивную трактовку Я. Бернулли как равновозможность, ни другие интерпретации [5]. Данный подход оставил простор для разных гипотез, поскольку понятие вероятности получилось слишком абстракт-

ным, а вопросы о связи понятия вероятности с реальным миром и использования его на практике все равно остались.

Теория вероятностей в математике

В конце 20-х годов XX века А.Н. Колмогоров ввел в математику аксиоматическое понятие вероятности [5], которое на сегодняшний день является базовым и присутствует во многих учебниках. Вероятность, по Колмогорову, является идеализированным формальным объектом, оторванным от определенного физического содержания. В рамках такого подхода вероятности допустимо приписывать произвольный физический смысл; вводится, сохраняя формальную аксиоматику, некое множество, называемое пространством элементарных событий, без какого бы то ни было указания на то, что это такое. То есть математический подход А.Н. Колмогорова не решал проблему привязки вероятности к физическому миру, так как перед ученым стояла задача построить строго математическую теорию вероятностей, не опираясь на понятие равновозможности, которое было камнем преткновения в классическом подходе. Попытаемся преодолеть эту трудность.

Назовем события простыми, если они являются независимыми и равновозможными, и сложными — если они не являются равновозможными или независимыми. Равновозможность здесь должна основываться на представлении о некоторой симметрии. Если сложные события — результаты опыта и их можно представить как совокупность простых событий некоторого другого опыта (который еще нужно определить), то вероятности сложных событий вычисляются как вероятность совокупности простых событий этого второго опыта, из которых они состоят. Если подобное разложение сложных событий на простые допустимо для любого опыта, тогда появляется возможность вернуться к классическому пониманию вероятности, основанному на понятии равновозможности.

Решение этой задачи можно найти в работе А.Я. Хинчина о методе произвольных функций. Данный метод позволяет найти разложение сложных функций на составляющие части. Новые функции могут быть произвольными, но с непрерывным распределением начальных данных [13]. Рассуждая в задаче о броске игрового шарика по красно-черной рулетке, А.Я. Хинчин показал, что для произвольной функции распределения начальных данных частота события в серии испытаний устанавливается из объективных особенностей самого явления и не зависит от исходной произвольной функции. Данный метод может быть распространен на любые сложные системы [13, с. 534].

Вероятность элементарных событий в аксиоматике А.Н. Колмогорова можно задать на множестве равновозможных событий, разъяснив данное

понятие через простые события и показав способ их нахождения в случае сложных. Такой подход, хотя и будет чисто математическим, позволяет привязать содержание понятия вероятности к физическому миру. Заданную таким образом вероятность можно считать объективной, поскольку она является характеристикой, свойством физического процесса, мерой случайности события. Следует отметить, что объективность в данном случае не тождественна субстанциальности. Объективная вероятность всегда привязана к определенному физическому процессу. Субстанциальность же означает возможность существования объекта независимо от чего-либо и его способность быть причиной самой себя (*causa sui*). Субстанциальность всегда подразумевает объективность, но не наоборот. Вероятность в трактовке А.Н. Колмогорова, с привязкой к физическому миру через определение элементарных вероятностей как равновозможных, не является субстанциальной. Вероятность является свойством физического процесса и всегда зависит от него. Значит, она не может существовать независимо от него и не является субстанциальной.

Для вычисления объективной вероятности можно использовать и статистический метод, описанный Б.В. Гнеденко [2, с. 47]. Но при таком подходе в итоге получается не значение самой объективной вероятности, а лишь приближенное с некоторой погрешностью. Получить точное значение объективной вероятности статистическим методом практически невозможно.

Следует отметить, что статистически полученная вероятность не тождественна частотной вероятности Р. Мизеса, о чем и пишет в своей книге Б.В. Гнеденко. Событие имеет вероятность, если можно провести независимые испытания, в которых оно может произойти или не произойти, и в результате частота события незначительно отличается от некоторого (в общем случае неизвестного) значения статистической вероятности [2, с. 45].

Теория вероятностей в физике: частотная интерпретация

В начале XX века Рихард фон Мизес предложил частотное определение вероятности. В него он заложил эмпирический «факт»: «относительная частота различных признаков меняется все меньше, если все больше увеличивать число наблюдений» — и назвал вероятностью предельное значение относительной частоты «выпадения» некоторого признака [8, с. 18]. Число испытаний должно быть довольно большим и даже стремиться к бесконечности.

В определении вероятности у Р. Мизеса также встречается понятие коллектива, к которому — и только к которому — оно применимо. «Коллектив есть массовое явление (или многократно повторяемый процесс), для кото-

рого обоснованно предположение, что относительная частота появления каждого единичного наблюдаемого признака стремится к определенному предельному значению. Это значение называется вероятностью появления признака в пределах коллектива» [8, с. 20]. Р. Мизес всегда акцентировал внимание на том, что вероятности событий (например, выпадения количества очков на верхней грани игральной кости) для каждого кубика свои и устанавливаются только экспериментом, что понятие вероятности не применимо там, где нельзя провести достаточное количество экспериментов или они не планируются проводиться.

Если в математике в конечном итоге победило аксиоматическое построение теории вероятности и некоторое условное понимание его значения, выдвинутое А.Н. Колмогоровым, то в статистической физике и квантовой механике события развивались несколько иначе. Применение теории вероятностей на практике ставит вопрос о том, какое понятие вероятности здесь используется. Классическим изложением математического аппарата квантовой механики считается книга Джона фон Неймана, в которой он сформулировал квантовую механику в контексте формализма гильбертова пространства [9]. Он построил математически строгий алгоритм, связывающий уже известные эмпирические данные. Нейман исходил из эмпирического понимания вероятности – из частотной интерпретации Р. Мизеса. Однако, как верно заметил А.А. Печенкин, «понятие вероятности у Неймана оставалось внешним по отношению к основной математической схеме квантовой механики – теории самосопряженных операторов в гильбертовых пространствах. У него еще нет обобщенной теории вероятностей, преодолевающей ограниченности той трактовки, которая была выдвинута Рихардом фон Мизесом» [11].

Сторонником частотного подхода в понимании вероятности в физике можно считать М.А. Леонтовича. В своей книге «Статистическая физика» (1944) он обращал внимание на то, что на практике понятие вероятности отождествляется с частотой события, но требует дальнейшей проработки, потому что в «формальной теории вероятностей конкретный смысл понятия вероятности остается произвольным» [7]. Леонтович попытался узаконить и формализовать частотное понятие вероятности, но ожидаемый результат не получился, и его труд можно рассматривать лишь как попытку построения связи между аксиоматикой А.Н. Колмогорова и частотным представлением Р. Мизеса.

Противником частотной интерпретации вероятности в квантовой механике можно назвать Миклоша Редя, который в своей работе 2001 года обратил внимание на то, что принятая фон Нейманом в 1932 году интерпретация вероятности как относительной частоты приводила к некоторым трудностям. Проблемы интерпретации были связаны с понятиями ансам-

бля и отбора субансамбля путем квантового измерения, аналогично трудностям, возникшим у Р. Мизеса с понятием иррегулярности, требовавшим нетривиальных допущений и критиковавшимся ранее [9, 18]. Фон Нейман также не смог отстоять позицию частотной трактовки вероятности в построении квантовой механики.

Определенная по Р. Мизесу частотная вероятность отсутствует до проведения достаточно большого числа испытаний и не является объективной [8, с. 18]. В квантовой механике вероятность вводится как интеграл от квадрата модуля волновой функции, следовательно, понятие вероятности используется до проведения каких-либо испытаний и имеет объективный статус. Более того, практика показывает, что результат вычисления вероятности зависит от конкретной серии испытаний и может значительно отличаться в разных сериях.

Сам процесс измерения (проведения испытания) является редукцией функции волны вероятности. В этом случае не совсем понятно, как быть с определением вероятности по Мизесу. Какую из вычисленных вероятностей использовать? Нарушается ли в процессе измерения сама вероятность? Или она только появляется после измерения, как в подходе Мизеса?

Как писал В.С. Готт, в копенгагенской интерпретации считается, что каждое испытание «прерывает установленный до измерения ход изменения вероятностей» [3, с. 84]. Это было изложено и в статье В.И. Купцова о характере вероятностных представлений в физике. В статье делался акцент на существовании объективной вероятности еще до измерения и утверждалось, что само измерение уже носит вероятностный характер, т. е. не может служить основой для последующего определения вероятности [10, с. 108].

По Р. Мизесу получалось, что понятие вероятности появляется только после проведения большого числа испытаний, а квантовая механика, наоборот, подтверждает, что любое измерение редуцирует волновую функцию уже существовавшей вероятности. Можно сделать вывод, что квантовая механика несовместима с частотным подходом Мизеса, но действительно ли частотный подход Мизеса не подходит, или он просто не смог довести дело до конца и выстроить последовательную теорию? Проблема в его подходе к пониманию вероятности, или в самой квантовой механике, или и там, и там?

Теория вероятностей в квантовой механике: копенгагенская интерпретация

Итак, частотный подход Мизеса не смог преодолеть возникших трудностей, поэтому требовалось нечто иное. Решение задачи на собственные значения оператора, соответствующего данной физической вели-

чине, и их нормировка на единицу позволили М. Борну назвать выражение $\int_J |\psi(q)|^2 dq$ вероятностью того, что координата положения системы в состоянии ψ находится в интервале $J = [q'; q'']$ [11, с. 311]. Данное определение вероятности носит математический характер, не является эмпирическим и отличается от математического определения Колмогорова – требуется иная алгебра для работы с вероятностями [4, с. 279; 10, с. 136]. Действительно, Колмогоров определял вероятность, задав множество элементарных событий Ω , а также множество случайных событий, которое является множеством подмножеств множества элементарных событий, и мера множества удовлетворяет следующим аксиомам:

$$P(\Omega) = 1, P(\emptyset) = 0, P(A \cup B) = P(A) + P(B), \text{ если } A \text{ и } B \text{ не пересекаются.}$$

У Борна же, при наложении двух полей ψ_1 и ψ_2 с плотностями вероятности $P_1 = |\psi_1|^2$ и $P_2 = |\psi_2|^2$, плотность вероятности суммарного поля равна $P_1 + P_2 + \psi_1\psi_2' + \psi_1'\psi_2$ [4, с. 279].

Борновское определение придает несколько иное и формально закрепленное понятие вероятности. Оно имеет алгебру, отличную от колмогоровской, которая переходит в последнюю при применении процедуры измерения [10, с. 136]. Но действительно ли это совершенно другое и неравнозначное определение? По своему смыслу борновская вероятность – аналог классической геометрической вероятности попадания объекта в интервал некоторых значений. Выражение $\int_J |\psi(q)|^2 dq$ является вероятностью того, что координата положения системы в состоянии ψ находится в интервале $J = [q'; q'']$. При формировании своей интерпретации М. Борн изначально попытался связать волновую функцию ψ с частицами [4, с. 278]. Затем он заметил, что $|\psi|^2$, по уже существовавшему ранее представлению об интенсивности как мере плотности световых квантов, ассоциируется с плотностью вероятности обнаружения частиц. В дальнейшем стало ясно, что полной аналогии с классической статистической интерпретацией все-таки не получается [4, с. 279]. Но, давая новое определение вероятности, Борн все равно изначально исходил из классических представлений. Не имея изначального понимания смысла вероятности, сложно дать какое-либо новое определение и написать математическую формулу, описывающую его. Только изначальное толкование понятия позволяет усмотреть его аналогию в рамках новой теории, сформулировать новое определение и оформить его математическое описание.

Из-за связи вероятности с волновой функцией, меняющейся во времени и пространстве согласно уравнению Шредингера, Борн рассмотрел в вероятности нечто, наделенное физической реальностью, хотя она и не переносила энергии и импульса [4, с. 279]. Этому смелому шагу также спо-

собствовала и статья 1924 года Бора, Крамерса и Слэтера, в которой упоминалась реальность промежуточного типа и виртуальное поле излучения [4, с. 280]. Борн заложил некоторый промежуточный этап. Полноценный онтологический статус вероятности, подразумевающий субстанциальные свойства и встраивание в физическую реальность, был осознан несколько позже. Интересно отметить, что если вероятность имеет онтологический статус, то в основу микромира, возможно, закладывается чисто математический объект – вероятность, определенная М. Борном через интеграл от функции $|\psi|^2$, и, следовательно, квантовая механика имеет схожую философскую основу с пифагореизмом.

Но для решения практических задач квантовой механики нужен был работающий способ получения значений вероятности. Борн предположил, что для этого можно использовать статистический метод [4, с. 280–281], но правомерность этого предположения все равно остается спорной: почему вероятность, математически заданная как функция от $|\psi|^2$, не противоречит статистическому подходу со стороны физики?

Дальнейшее развитие интерпретация Борна в связи со статистическим методом получила у В. Паули и П. Йордана. Йордану удалось даже сделать переход к еще более глубокому формализму. Также в это время в основу квантовой механики был заложен статистический подход к процессу измерения. «Замечания Паули составили основу, на которой в конце 1926 г. Йордан построил, независимо от Лондона и Дирака, свою формулировку теории преобразований. Эта формулировка, в конечном счете, как позже убедился Йордан, полностью согласованная с этими предшествовавшими формулировками, исходила из совершенно иных предпосылок. В ней был принят аксиоматический подход» [4, с. 297–298].

Физико-математический дуализм понимания природы вероятности

Можно сделать вывод, что выбрать единственный подход к пониманию вероятности и идеально связать его с реальным миром не получается. На практике приходится использовать в основном эмпирический путь – измерять значения вероятностей частотным методом, определения же вероятностей задаются математическими аксиоматическими путями. Возможно ли вообще раскрыть понятие вероятности со стороны физики?

Приведем следующий пример. В начале XX века возник вопрос, является ли свет волной или частицей. Проведение опытов с двумя щелями в совокупности с открытием фотоэффекта не смогли однозначно ответить на него, и ученые были вынуждены прибегнуть к описанию света через контринтуитивную конструкцию корпускулярно-волнового дуа-

лизма. Данная конструкция позволила хоть как-то увязать абсолютно несовместимые на первый взгляд представления – корпускулярные и волновые свойства света: свет распространяется как волна, а взаимодействует с веществом как частица. Часто это трактуют так: «В зависимости от характера физических процессов, в которых участвуют микрообъекты, т. е. от тех взаимодействий, в которые они вступают, в том числе и в наших приборах, у них проявляются или корпускулярные, или волновые свойства» [10, с. 112]. Предполагается, что проявление этих свойств не есть демонстрация свойств тех или иных приборов: «Проявление микрочастицами в определенных взаимодействиях или волновых, или корпускулярных свойств зависит не только от их взаимодействий, но и от их собственных параметров. Чем больше, например, импульс частицы, тем явственнее выступают ее корпускулярные свойства, и, наоборот, чем меньше ее импульс, тем ярче выступают ее волновые свойства» [10, с. 112]. Сделаем по этому поводу важное замечание. Дело в том, что свет, согласно корпускулярно-волновому дуализму, принятому в квантовой физике, взаимодействует с веществом (а прибор всегда состоит из какого-то вещества) как частица и никогда как волна; как волна он распространяется. Собственно, эту ситуацию и выражает вероятностная трактовка волновой функции. Распространяется именно волна вероятности, существующая объективно, а не взаимодействие микрообъекта с прибором. Вероятности чего? Того, что при взаимодействии микрообъекта с веществом (именно как частицы) он будет обнаружен в определенном месте пространства. [6, с. 105].

В копенгагенской интерпретации любые свойства частиц (и сами частицы) появляются только в момент измерения. До этого существует лишь волна вероятности обнаружения именно корпускулярных свойств, что и является попыткой решения одной из основных задач квантовой механики – объединения волны и частицы. М. Джеммер в своей книге указывал, что дуализм «волна – частица» требовал введения новых понятий неклассической физики и принципа дополнительности в логике [4, с. 338].

По аналогии с корпускулярно-волновым дуализмом в квантовой механике понятие вероятности может попасть в схожий физико-математический дуализм, так как в одних случаях вероятность может проявлять себя как математический объект, а в других – как физический. Как промежуточный этап желательно было бы найти некоторую конструкцию, увязывающую физический и математический подходы в рамках этого физико-математического дуализма. Так как речь идет об определении вероятности, то сделать это аналогичным вероятностным методом невозможно. Но этого не требуется, так как применение указанного способа в квантовой механике породило довольно много проблем. В связи с этим

было бы интересно найти альтернативный способ решения корпускулярно-волнового дуализма.

Вполне удовлетворительная попытка была сделана во второй половине XX века при рассмотрении среды распространения света как нелинейной. В книге А.Т. Филиппова «Многоликий солитон» подробно описано, как можно было бы получить одновременно и корпускулярные, и волновые свойства света, если рассматривать его как волну в нелинейной среде [12]. Однако для этого требовалось бы изменить изначальную теорию О.Ж. Френеля, который рассматривал распространение света только как волны в линейной среде, из-за чего и возникли трудности совместимости волновых и корпускулярных свойств света (линейная волна не имеет корпускулярных свойств, в отличие от распространения возмущений в нелинейных средах, которые ими обладают и, собственно, выглядят и ведут себя как частицы). Если бы О.Ж. Френель имел математический аппарат для расчета волн в нелинейных средах, то, возможно, физика развивалась бы совершенно иначе [12].

Аналогично этому, для физико-математического дуализма понятия вероятности, возможно, найдется объект, подобный нелинейной среде. Например, будет обнаружен какой-то объект, который сможет объединить математическое и физическое понимания вероятности и не будет обладать противоречивой двойственностью. Вероятнее всего, это потребует модернизации квантовой механики.

Теория вероятностей в квантовой механике: альтернативные интерпретации

Еще одним вопросом, связанным с борновской интерпретацией вероятности, является вопрос онтологического индетерминизма в микромире. Если в классической физике мир представляется детерминированным, с оговоркой, что в реальности существует некоторая погрешность измерения начальных условий, и вероятность чаще всего понимается как степень незнания этих начальных условий эксперимента, то в микромире, согласно квантовой механике, детерминизм невозможен уже на уровне онтологии. К неполноте данных о начальных условиях, обусловленной неточностью измерения, добавляется принципиальная невозможность получения полных данных в соответствии с принципом неопределенности [1, с. 19]. С данным подходом были согласны далеко не все физики. Сторонниками объективности мира и детерминизма можно считать А. Эйнштейна, П. Ходжсона, Д. Бома. В работах последнего была раскрыта одна из наиболее популярных теорий скрытых параметров, наличие которых позволило бы получить локальное детерминированное описание микромира [14, с. 24].

Бомовская интерпретация квантовой механики подразумевает также альтернативную интерпретацию вероятности для нее. Она отличается от борновской вероятности в копенгагенской интерпретации, но не представляет что-то новое в общем объеме подходов к понятию вероятности. Поскольку Д. Бом пытался уйти от индетерминизма, нужно было избавиться от редукции волновой функции. Это получилось сделать, объявив все фундаментальные объекты точечно-подобными частицами, детерминированными в пространстве и времени. «Положение частицы не оказывает воздействия на “управляющую волну” и поэтому может рассматриваться как ненаблюдаемая величина и в определенном смысле как скрытая переменная» [14, с. 25]. В бомовском подходе вероятность не определяется, как у Борна, через связь плотности вероятности и волновой функции. Последнее имеет лишь статус гипотезы, которая подтверждается статистически. Собственно, и само понятие вероятности у Д. Бома имеет статистическую природу.

Кроме интерпретации Д. Бома существуют и другие альтернативные интерпретации квантовой механики. Например, в байесовском подходе вероятность количественно определяет степень достоверности для одного испытания, без какой-либо априорной связи с предельными частотами, и зависит от субъекта, проводящего эксперимент. По сути, это классическое определение вероятности, с тем отличием, что элементарным событиям приписывается не равная вероятность, а распределенная некоторым субъективным образом, зависящим от экспериментатора. Переход к квантовой механике в интерпретации квантового байесионизма (QBism, QBists) происходит с помощью связи с гильбертовым пространством по теореме Глиссона. Различие между классической и квантовой вероятностями заключается не в их определении, а в природе информации, которую они кодируют. В классическом мире максимальная информация о физической системе является полной в том смысле, что она предоставляет точные ответы на все возможные вопросы, которые могут быть заданы системе. В квантовом мире максимальная информация не является полной и не может быть дополнена [15]. В интерпретации QBism существуют и другие варианты построения квантовой вероятности, даже для получения (вывода) борновской интерпретации вероятности, но они приводят к еще более сложным и запутанным конструкциям, основанным на субъективной вероятности де Финетти [16].

Поскольку вопрос о природе вероятности в квантовой механике остается окончательно не решенным, делаются попытки уйти от этого понятия к понятию склонности. Например, в статье Л.Е. Баллентайна интерпретация квантовых состояний как представления знаний считается несостоятельной, а квантовые склонности составляют своего рода причинно-след-

ственную основу для наблюдаемых частот. Склонность – это тенденция или предрасположенность некоторой физической ситуации к получению определенного результата. Она относится к степени проявлений причинно-следственной связи, которая слабее, чем детерминизм. Утверждается, что внутренние вероятности квантовой механики, которые вычисляются на основе вектора состояния или матрицы плотности, наиболее естественно интерпретируются как квантовые склонности. Основная причина в том, что они зависят только от подготовки квантового состояния [17]. Да, переход от более строго описания теории вероятностей к теории склонностей дает некоторую свободу в описании и вариации, но не приближает к необходимому пониманию и четкой структуре природы вероятности.

Заключение

XX век стал довольно значимым для развития понятия вероятности. Появилась аксиоматика А.Н. Колмогорова, были предложены частотный подход Р. Мизеса, статистический подход Б.В. Гнеденко, разработан подход со стороны математического аппарата квантовой механики. Однако такое разнообразие еще не означает согласованности между перечисленными подходами. Скорее наоборот, показывает наличие трудностей их согласования.

В статье были рассмотрены основные подходы к пониманию природы вероятности со стороны математики и со стороны физики. Было показано, что различие между математикой и физикой и их «непостижимая» взаимосвязь не обходят стороной и понятие вероятности. Вопрос о том, к какой группе наук его относить, до сих пор не имеет общепринятого решения. Придание вероятности онтологического статуса, с включением ее в физическую реальность, и другие подходы со стороны физики не решают эту проблему. Определенная М. Борном вероятность не отображает ее согласованности со статистическими данными, что приводит к необходимости воспринимать ее как формализованный математический объект.

В статье была предпринята попытка преодолеть физико-математический дуализм при объяснении природы вероятности. Представлена точка зрения, согласно которой теорию вероятностей следует относить к математическим наукам, что не мешает ее успешному применению в практике. Рассмотрение теории вероятностей со стороны математики придает понятию вероятности больше осмысленности. Обоснование непротиворечивости математического определения вероятности эмпирическому методу ее вычисления произведено на основе различения простых и сложных событий, что дает возможность использовать понятие равновозможности

и метод произвольных функций Хинчина. Причисление же теории вероятностей к физическим наукам сопряжено с серьезными трудностями ее строгого обоснования. Автор надеется, что данная статья внесла некоторую ясность в понятие вероятности, а прояснение понятий, как было упомянуто в начале статьи, является одной из самых важных задач философии.

Литература

1. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. – М.: Наука, 1989. – 400 с.
2. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1988. – 447 с.
3. Готт В.С. Философские вопросы современной физики. – М.: Высшая школа, 1972. – 344 с.
4. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики: пер с англ. / под ред. А.И. Пономарева. – М.: Наука, 1985. – 384 с.
5. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974. – 120 с.
6. Кравец А.С. Природа вероятности. – М.: Мысль, 1976. – 176 с.
7. Леонтович М.А. Статистическая физика. – М.: Гостехиздат, 1944. – 256 с.
8. Мизес Р. Вероятность и статистика / под ред. и с предисл. А.Я. Хинчина. – Изд. 5-е. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.
9. Нейман И. Математические основы квантовой механики / пер. с нем. М.К. Поливанова и Б.М. Степанова; под ред. Н.Н. Боголюбова. – М.: Наука, 1964. – 367 с.
10. Омеляновский М.Э. Философские вопросы квантовой физики. – М.: Наука, 1970. – 257 с.
11. Печенкин А.А. Два понятия вероятности в науке XX века // Вестник Московского университета. Серия 7, Философия. – 2018. – № 4. – С. 98–112.
12. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
13. Хинчин А.Я. Метод произвольных функций и борьба против идеализма в теории вероятностей // Философские вопросы современной физики. – М., 1952. – С. 522–538.
14. Эрекаев В.Д. Квантовая механика и современная философия. – М.: Ленанд, 2023. – 168 с.
15. Caves C.M., Fuchs C.A., Schack R. Quantum probabilities as Bayesian probabilities // arXiv preprint. – 2001. – URL: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0106133> (accessed: 10.09.2025).
16. Helland I.S. On probabilities in quantum mechanics // arXiv preprint. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2401.17717v6> (accessed: 10.09.2025).
17. Ballentine L.E. Propensity, Probability, and Quantum Theory // Foundations of Physics. – 2016. – Vol. 46. – P. 973–1005. – DOI: 10.1007/s10701-016-9991-0.

18. Rédei M. Von Neumann's concept of quantum logic and quantum probability // John von Neumann and the Foundations of Quantum Physics. – Dordrecht: Springer, 2000. – P. 153–172. – (Vienna Circle Institute Yearbook; vol. 8). – DOI: 10.1007/978-94-017-2012-0_10.

References

1. Heisenberg W. *Fizika i filosofiya. Chast' i tseloe* [Physics and Philosophy. Part and Whole]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 400 p. (III In Russian).
2. Gnedenko B.V. *Kurs teorii veroyatnostei* [Course of Probability Theory]. 6th ed., rev. Moscow, Nauka Publ., 1988. 447 p.
3. Gott V.S. *Filosofskie voprosy sovremennoi fiziki* [Philosophical Issues of Modern Physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972. 344 p.
4. Jammer M. *Evolutsiya ponyatii kvantovoi mekhaniki* [The Conceptual Development of Quantum Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 384 p. (In Russian).
5. Kolmogorov A.N. *Osnovnye ponyatiya teorii veroyatnostei* [Foundations of the Theory of Probability]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 120 p.
6. Kravets A.S. *Priroda veroyatnosti* [The Nature of Probability]. Moscow, Mysl' Publ., 1976. 176 p.
7. Leontovich M.A. *Statisticheskaya fizika* [Statistical Physics]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1944. 256 p.
8. Mises R. *Veroyatnost' i statistika* [Probability, Statistics and Truth]. 5th ed. Moscow, Librokom Publ., 2009. 264 p. (In Russian).
9. Neumann J. *Matematicheskie osnovy kvantovoi mekhaniki* [Mathematical Foundations of Quantum Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 367 p. (In Russian).
10. Omel'yanovskii M.E. *Filosofskie voprosy kvantovoi fiziki* [Philosophical Problems of Quantum Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 257 p.
11. Pechenkin A.A. Dva ponyatiya veroyatnosti v nauke XX veka [Two Concepts of Probability in 20th Century Science]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 7, Filosofiya = Lomonosov Philosophy Journal*, 2018, no. 4, pp. 98–112.
12. Filippov A.T. *Mnogolikii soliton* [The Many-Faced Soliton]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 288 p.
13. Khinchin A.Ya. Metod proizvol'nykh funktsii i bor'ba protiv idealizma v teorii veroyatnostei [The Method of Arbitrary Functions and the Struggle against Idealism in Probability Theory]. *Filosofskie voprosy sovremennoi fiziki* [Philosophical Issues of Modern Physics]. Moscow, 1952, pp. 522–538.
14. Erekaev V.D. *Kvantovaya mekhanika i sovremennaya filosofiya* [Quantum Mechanics and Modern Philosophy]. Moscow, Lenand Publ., 2023. 168 p.
15. Caves C.M., Fuchs C.A., Schack R. Quantum probabilities as Bayesian probabilities. *arXiv preprint*, 2001. Available at: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0106133> (accessed 10.09.2025).

16. Helland I.S. On probabilities in quantum mechanics. *arXiv preprint*, 2024. Available at: <https://arxiv.org/abs/2401.17717v6> (accessed 10.09.2025).
17. Ballentine L.E. Propensity, Probability, and Quantum Theory. *Foundations of Physics*, 2016, vol. 46, pp. 973–1005. DOI: 10.1007/s10701-016-9991-0.
18. Rédei M. Von Neumann's concept of quantum logic and quantum probability. *John von Neumann and the Foundations of Quantum Physics. Vienna Circle Institute Yearbook*, vol. 8. Dordrecht, Springer, 2000, pp. 153–172. DOI: 10.1007/978-94-017-2012-0_10.

Статья поступила в редакцию 19.10.2025.

Статья прошла рецензирование 12.02.2026.

The article was received on 19.10.2025.

The article was reviewed on 12.02.2026.