

ДЕТЕРМИНИЗМ И ВЕРОЯТНОСТЬ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРИРОДЫ

М.Б. Челноков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: l-chelnok@yandex.ru

Рассмотрено современное состояние проблемы детерминизма и причинно-следственной связи в квантовой механике, а также различные точки зрения на природу микрочастиц. Проведена классификация микрочастиц по размерам области их существования. Рассмотрена аналогия между распадом и стабильностью нейтрона, с одной стороны, и радиоактивными и стабильными ядрами — с другой. Сформулирована идея о возможности стабилизации радиоактивных ядер для решения проблемы радиоактивных отходов и ликвидации последствий ядерных катастроф.

Ключевые слова: детерминизм, вероятность, причина, следствие, микрочастица, радиоактивность.

DETERMINISM AND PROBABILITY AS FUNDAMENTAL BASES OF THE NATURE

M.B. Chelnokov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

e-mail: l-chelnok@yandex.ru

The present state of the problem of determinism and causality in quantum mechanics and various points of view on the nature of microparticles are discussed. A classification of microparticles by sizes of their region of existence is carried out. The analogy is considered between the disintegration and stability of a neutron, on the one hand, and radioactive and stable nuclei, on the other hand. The idea on possibility of radioactive nuclei stabilization for solving the problems of disposal of radioactive wastes and elimination of consequences of nuclear disasters is stated.

Keywords: determinism, probability, cause, effect, microparticle, radioactivity.

В настоящей статье обсуждается фундаментальный вопрос о вероятности и детерминизме в квантовой механике. Споры по этому поводу идут уже много лет, но до сих пор остаются определенные сомнения и неясности. При этом иногда авторы настолько боятся промахнуться, что дело доходит до абсурда. Например, в монографии [1], специально посвященной вероятностным и статистическим аспектам квантовой теории, в которой на трехстах страницах развивается солидный математический аппарат, автор в самом начале пишет: “Мы не будем затрагивать здесь вопроса о природе статистичности в микромире”.

В настоящей статье, наоборот, намеренно вообще не будут затрагиваться математические аспекты, а рассматривается именно природа, физическая суть проблемы.

Если в мире происходит некоторое событие, то оно происходит по какой-то причине, т.е. каждое событие-следствие обусловлено некоторым событием-причиной — это утверждение до появления квантовой механики казалось незыблемым и само собой разумеющимся, принималось аксиоматически. С зарождением квантовой механики по этому поводу начались жаркие споры. Однако еще до этого в классической физике появилось понятие вероятности, но оно рассматривалось или как метод описания, или как непознанная необходимость, т.е. предполагалось, что при все более глубоком и детальном исследовании от вероятности, по крайней мере в принципе, можно избавиться.

Квантовая механика рассматривает вероятность как некоторую фундаментальную первичную основу, не сводимую к чему-либо другому. В квантовой механике вероятность присуща уже каждой отдельно взятой частице, а не только коллективу.

В 1949 г. советские физики В.А. Фабрикант, Л.М. Биберман и Н.Г. Сушкин выполнили блестящий, фундаментальный эксперимент, направленный на выяснение природы вероятности в квантовой механике [2]. Этот эксперимент был призван ответить на вопрос о том, присуща ли вероятность коллективу частиц, или даже каждой отдельно взятой частице? Сразу скажем, что эксперимент дал последний вариант ответа.

На первый взгляд схема эксперимента повторяла схему известного опыта Дэвиссона–Джермера, проведенного в 1927 г., т.е. наблюдалась дифракция пучка электронов на кристалле. Но было одно принципиальное различие: в опыте Фабриканта–Бибермана–Сушкина электронный пучок был столь малой интенсивности, что электроны проходили через прибор практически поодиночке и никак не влияли друг на друга.

Приведем основные параметры этого эксперимента. Среднее время между прохождением в приборе двух электронов равнялось $2,4 \cdot 10^{-4}$ с. Электроны ускорялись напряжением 72 кВ и при этом они проходили весь прибор от катода до фотопластинки, на которой происходила регистрация, за $8,5 \cdot 10^{-9}$ с, т.е. время движения электрона в приборе было в $3 \cdot 10^4$ раз меньше среднего промежутка времени между попаданиями двух последовательных электронов в любую точку фотопластинки. Чтобы почувствовать масштаб этих цифр переведем их пропорционально в макроскопические параметры. Например, если электрон проходит через прибор за одну секунду, то в сутки через прибор проходят всего три электрона! Одна секунда присутствия электрона в приборе и затем пауза 8 часов! Итак, влияние электронов друг на друга полностью исключено, они идут поодиночке.

В эксперименте была накоплена огромная статистика. Сам эксперимент делился на три стадии. На первой стадии время экспонирования фотопластинки, т.е. время бомбардировки ее электронами, было довольно малым, так что на нее приходило малое число электронов — десятки, сотни, но не триллионы или более. В этом случае на фотопластинке получались отдельные точки от каждого попадания электрона. Расположение этих точек было совершенно хаотическим, случайным, никакой закономерности обнаружить было невозможно.

Опыт многократно повторялся. И когда он проводился в следующий раз абсолютно с теми же параметрами, расположение точек на фотопластинке было, вообще говоря, другим, но также совершенно хаотическим.

На второй стадии эксперимента менялся только один параметр — время экспонирования фотопластинки. Оно выбиралось гораздо бóльшим, чем на первой, — таким, что на фотопластинку приходило огромное число электронов. Это время составляло порядка трех часов. В этом случае на фотопластинке получалась характерная дифракционная картина, которая при многократном повторении эксперимента оставалась совершенно стабильной.

Переход от первой стадии эксперимента ко второй объясняется как раз вероятностно-волновой природой каждой отдельно взятой частицы. В самом деле, поскольку электроны идут поодиночке, не влияя друг на друга, поведение отдельного электрона объясняется именно его природой, а не совокупностью частиц. Место попадания каждого электрона на фотопластинку определяется вероятностью. В тех точках, в тех областях, где волна вероятности, образуя дифракционную картину, имеет максимальную интенсивность, т.е. дает максимальную вероятность попадания частицы, плотность точек на фотопластинке от такого попадания весьма велика, эти точки сливаются друг с другом и получают дифракционные максимумы. В тех же областях, в которых дифракционная картина дает минимумы, вероятность попадания электронов ничтожно мала, здесь регистрируется очень малое число точек (в пределе — нуль) и эти области остаются не засвеченными, практически свободными от попадания электронов.

Таким образом, вероятностная природа, поведение каждой отдельно взятой частицы и дифракционные (или интерференционные) эффекты в квантовой механике неразрывно связаны между собой, а точнее, это по своей природе одно и то же.

Была еще и третья стадия эксперимента. На этой стадии интенсивность электронного пучка увеличивалась на семь порядков и при этом получалась точно такая же дифракционная картина, которая имела место на второй стадии эксперимента.

Итак, эксперимент Фабриканта–Бибермана–Сушкина блестяще подтвердил вероятностную природу каждой отдельно взятой частицы, дал однозначный ответ о принципиальном отличии квантово-механической вероятности от вероятности в классике.

Эксперимент Фабриканта–Бибермана–Сушкина и его интерпретация в терминах вероятностного поведения каждой отдельно взятой частицы представляется весьма убедительным. Однако квантовая механика настолько перевернула сложившиеся веками общепринятые представления о природе, что и сегодня, спустя почти целый век после возникновения квантовой механики и спустя более шести десятилетий после этого эксперимента, продолжаются жаркие споры о природе микромира, а ряд вопросов (такие, например, как нелокальность, несепарабельность, квантово-механическая корреляция и др.) остались до сих пор нерешенными.

В настоящей работе попытаемся, не претендуя на абсолютную полноту, дать некоторый обзор существующих сегодня точек зрения на природу микрочастицы и причинно-следственную связь в микромире.

Первая точка зрения заключается в том, чтобы построить добротное математическое здание вероятностного (статистического) поведения микрочастиц, уходя при этом от обсуждения смысла самой этой вероятности. В начале статьи была приведена цитата из монографии [1], ярко иллюстрирующая эту точку зрения. На наш взгляд, такая позиция на современном этапе развития квантовой механики является абсолютно неприемлемой, любое подобное математическое здание построено на песке и со временем непременно рухнет.

Вторая точка зрения связана с различными попытками в той или иной форме вернуться к классическому пониманию вероятности в духе непознанной необходимости. Подобной точки зрения придерживался, например, Д.И. Блохинцев, который в монографии [3] писал: “Во многих курсах квантовой механики подчеркивается, что волновая функция есть характеристика состояния отдельной частицы. Если это так, то, будьте любезны, укажите такое измерение на отдельной частице, скажем, на электроны, которое позволило бы определить его “персональную” волновую функцию. Такого измерения не существует”.

В несколько иной форме эта точка зрения высказана В.С. Барашенковым [4], который считает, что вероятностное поведение любой частицы обусловлено ее взаимодействием с виртуальными частицами, с частицами, рождающимися при вакуумных флуктуациях. Эта точка зрения, по существу, смыкается с гипотезой скрытых параметров, которая, как известно, была опровергнута теоремой фон Неймана.

Правда, в этой теореме со временем усомнился сам великий Луи де Бройль [5]: “Два распределения вероятностей, для координаты и

для импульса, не существуют одновременно, в чем и состоит ошибочность рассуждений фон Неймана”. В предисловии к этой же книге [5] Ж. Лошак, ученик де Бройля, пишет, что “слабое место — неявное предположение фон Неймана о том, что все распределения вероятностей, предсказываемые квантовой механикой, должны реализоваться одновременно, даже если они относятся к величинам, которые нельзя одновременно измерить”.

Однако нам кажется, что все попытки возврата в квантовой механике к классической интерпретации вероятности, в том числе и гипотеза скрытых параметров, обречены на провал по следующей основной причине. Обычные случайные величины в математической теории вероятности подчиняются распределению Пуассона, Гаусса и т.д. Все попытки привязать сюда интерференционные и дифракционные эффекты, связанные с волновой природой вероятности (если такие попытки вообще возможны), представляются весьма искусственными. Между тем, в квантово-механических экспериментах надежно регистрируются стабильные интерференционные и дифракционные картины.

Третья точка зрения — это так называемая концепция волны-пилота Луи де Бройля. Волна как бы прощупывает всю ситуацию в районе микрочастицы, и в соответствии с полученной информацией “сообщает” микрочастице, как ей себя вести. Мы не будем здесь подробно рассматривать эту концепцию, а подчеркнем лишь, что де Бройль на протяжении своей жизни неоднократно и отказывался от этой идеи, и возвращался к ней вновь. Например, в [5] он пишет: “Тщательное изучение этих трудностей в 1927–1928 гг. привело меня к тому, что я полностью отказался от теории волны-пилота и присоединился к точке зрения Бора и Гейзенберга, в которой отвергаются любые представления о траектории элементарных частиц и детерминированности их движения”. Сегодня трудно сказать, является ли эта идея исчерпанной и закрытой, или нет.

Четвертая точка зрения — многомировая интерпретация, выдвинутая Эвереттом в 1957 г. [6]. Эта интерпретация вводит представление о том, что при измерении осуществляется не одна из вероятностей, а набор всевозможных вероятностей, только каждая из них — в разных вселенных, число которых растет. Обратим здесь внимание на то, что эта интерпретация (эвереттика) в какой-то мере стыкуется с антропоцентрическим принципом, завоевавшим себе уже некоторое право на существование (мы наблюдаем нашу Вселенную потому, что другие вселенные существуют без наблюдателей).

Конечно, эвереттика по самой своей идее весьма необычна, и в ней существует огромное количество трудностей, в частности, вопрос об источнике энергии для рождающихся вселенных. Остается открытым

и вопрос о самой возможности ее экспериментальной проверки. Тем не менее, сегодня ссылки на эвереттику попадают в литературе все чаще (см., например, [7, 8]).

В связи с введением понятия вероятности в микромире возник вопрос о том, а детерминистично ли поведение микрочастицы вообще, есть ли у того или иного события-следствия соответствующее событие-причина или нет?

И в атмосфере эйфории, в которой на трон была возведена вероятность или, говоря иначе, его Величество Случай, появилась *пятая точка зрения*, состоящая в том, что в микромире детерминизм, причинно-следственная связь полностью потеряли свой смысл. Эта точка зрения утверждает абсолютный индетерминизм микромира, беспричинное, случайное происхождение тех или иных событий (см., например, [9–13]). Приведем несколько высказываний самых великих создателей квантовой механики.

Вернер Гейзенберг [11, 12]: “Квантовая механика окончательно опровергла закон причинности. . . Современная атомная физика отменяет закон причинности и следствия”.

Поль Дирак [13]: “В квантовой теории имеет место принципиальный индетерминизм”.

Макс Борн [10]: “В силу самой своей природы физика лишена детерминизма и по этой причине является законным и безраздельным владением статистики”.

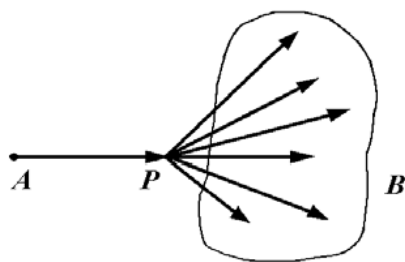
На наш взгляд, несмотря на все величие приведенных только что имен, данная точка зрения является серьезным преувеличением и не соответствует действительности.

Автор настоящей статьи является сторонником той *точки зрения* — *шестой*, что детерминизм, причинно-следственная связь не отменяются в квантовой механике, а лишь существенно дополняются вероятностным элементом. На наш взгляд, в микромире причинно обусловленным является не конкретное численное значение того или иного параметра (или, иначе, динамической переменной) квантово-механического объекта в некоторый момент времени, а вероятность данного значения этого параметра, причем имеет место целый набор значений, и каждое из них — со своей вероятностью. Эта точка зрения наиболее четко изложена, пожалуй, в работах Г.Я. Мякишева [14], где он называет ее “вероятностная причинность”, а мы добавим: “вероятностный детерминизм”.

Согласно этой точке зрения состояние микрочастицы (системы) в данный момент однозначно определяется начальными условиями (т.е. состоянием в предшествующий момент или отрезок времени) и внешними условиями, однако способ описания состояния становится

вероятностным. В соответствии с изложенной точкой зрения классическая картина представляется до предела простой: $A \rightarrow B$, где A — причина, B — следствие.

А квантово-механическая причинно-следственная связь становится более сложной, как это символически изображено на рисунке. Здесь A и B — по-прежнему причина и следствие, а P — некий генератор вероятности, который ставит в соответствие одной причине A целый набор (множество) следствий B . Это множество может быть как дискретным, так и непрерывным, как ограниченным, так и бесконечным. При этом генератор вероятности P следует понимать чисто символически, он, видимо, не существует как отдельный конкретный элемент в нашем мире. Итак, одна причина A может вызывать множество следствий B и каждое со своей вероятностью.



Символическое изображение причинно-следственной связи в квантовой механике

Разумеется, эта картина в пределе должна переходить в картину классическую. Понять такой переход достаточно просто: с макроскопической точки зрения множество B становится пренебрежимо малым, практически сжимается в точку, и мы возвращаемся к классической причинно-следственной связи $A \rightarrow B$. При этом все стрелки, направленные от P к B , естественно, сливаются в одну.

Во избежание недоразумений подчеркнем, что здесь индетерминизм понимается как такая картина мира, в которой события происходят вообще без всякой причины, абсолютно непредсказуемо. В квантовой механике есть и причина, и предсказуемость вероятности события, и, следовательно, говорить об отмене детерминизма не приходится.

Кстати, детерминизм ведет к фатализму, к абсолютной предопределенности будущего, а индетерминизм — к полной непредсказуемости событий. Таким образом, детерминизм отнимает у человека свободу воли, а индетерминизм не дает возможности ничего планировать, действовать целесообразно. При полном индетерминизме, например, при повороте руля автомобиля вправо сам автомобиль может повернуть в любую сторону или продолжать ехать по прямой.

В этом плане можно сказать, что природа мудро выбрала нечто среднее, нечто промежуточное и при этом в жизни имеют место и свобода воли, и предсказуемость событий.

Планирование своего будущего и, в определенных рамках, воздействие на него, является важнейшим элементом человеческой деятельности, человеческого мозга, сознания. И это планирование возможно

только при одновременном наличии двух элементов: с одной стороны, свободы воли, а с другой — определенных закономерностей, которым подчиняется природа. Зная эти закономерности, используя их и обладая в определенных границах свободой воли, мы и планируем будущее.

Теперь, сделав обзор различных точек зрения на природу микрочастицы и причинно-следственную связь в микромире и изложив нашу точку зрения, рассмотрим некоторые аспекты, связанные с волновой функцией в квантовой механике, которые обычно остаются вне поля зрения большинства авторов.

Волновая функция в квантовой механике описывает волну вероятности. Здесь одинаково важны оба аспекта — и вероятностный, и волновой. Причем если волновой аспект быстро получил всеобщее признание, в первую очередь благодаря дифракционным экспериментам Дэвиссона–Джермера, то вероятностный входил в физику долго и трудно и дискуссии на эту тему продолжают до сих пор. Приведем на эту тему хронологию, связанную с тремя главными действующими лицами.

Луи де Бройль в 1923 г. связал с движением частицы распространение волны, получил Нобелевскую премию в 1929 г. Эрвин Шредингер в 1926 г. вывел свое уравнение, получил Нобелевскую премию в 1933 г. Макс Борн выдвинул идею вероятностной интерпретации волновой функции в 1926 г., получил Нобелевскую премию в 1954 г. Итак, промежутки времени между открытием и Нобелевской премией: Луи де Бройль — 6 лет, Эрвин Шредингер — 7 лет, Макс Борн — 28 лет!

Что же такое волна вероятности и какова ее природа? Прежде всего, это не материальная, не физическая волна в том смысле, что она вообще не имеет никакого материального носителя, не переносит никакой энергии. Это чисто математическая волна, в которой колеблется скалярная комплексная величина — волновая функция.

Тем не менее, эта волна вполне реальна, так же, как реальны наши мысли, информация, наше сознание, вся духовная сфера жизни человечества. Реальность всего вышеперечисленного состоит, в частности, в том, что все это оказывает влияние на наш материальный мир. В частности, волна вероятности определяет поведение микрочастицы, интерференционные и дифракционные явления, туннельный эффект и многое другое.

Поскольку в волне вероятности колеблется скалярная величина, то к ней неприменимы понятия продольной или поперечной волны, а поляризационные эффекты могут появляться только при наличии спина (или спиральности).

Вопрос об источнике волны вероятности, видимо, не имеет смысла (так же, как и вопрос о фронте этой волны). Один из доводов в пользу этого соображения следующий. Практически во всех курсах квантовой механики рассматривается плоская волна, и эта волна превосходно описывает физическую реальность. Но в плоской (и только в идеально плоской) волне амплитуда является константой, не зависит от расстояния до источника. Никакие реальные источники такую волну не излучают. Второе соображение на эту тему связано с тем, что волна вероятности — волна не материальная, она не переносит никакой энергии.

Введем теперь классификацию микрочастиц, причем характерным признаком для такой классификации выберем размеры области, в которой существует эта частица.

1. Инфинитная микрочастица в макромире (например, электрон в кинескопе).

2. Финитная микрочастица в макромире (например, электрон в твердом теле).

3. Финитная микрочастица в микромире, входящая в состав атома или ядра (электроны, нуклоны).

4. Финитная микрочастица в микромире, входящая в состав других частиц (кварки в адронах).

Рассмотрим вопрос об эволюции состояния микрочастицы в указанных случаях. Состояние инфинитной частицы эволюционирует в соответствии с волной вероятности, что блестяще подтверждено экспериментально в опытах Фабриканта.

Состояние любой финитной микрочастицы может эволюционировать так, что при этом она либо стабильно остается в данной области, либо выходит из нее. Электрон может оставаться в твердом теле либо выходить из него (термоэлектронная, автоэлектронная эмиссия и др.).

Стабильное ядро может жить сколь угодно долго без внешних воздействий, сохраняя в своем составе нуклоны. Нестабильное ядро испытывает радиоактивное превращение с испусканием микрочастиц.

Стабильные микрочастицы, если они не вступают в какую-либо реакцию, живут неопределенно долго, нестабильные — распадаются на другие частицы.

При этом выход частиц из любой системы определяется, как и для инфинитной частицы, волной вероятности. В самом деле, это может быть либо надбарьерное прохождение, либо туннельный эффект, но и то и другое связано с волной вероятности, а поэтому любой вид радиоактивности или распад микрочастиц является процессом статистическим.

И в этом плане следует обратить внимание на то, что в мире существует, в определенном смысле, уникальная частица — нейтрон. В свободном состоянии нейтрон распадается на протон, электрон и электронное антинейтрино. Среднее время жизни нейтрона 15,3 мин, или период полураспада — 10,5 мин. Это фантастически огромное время по масштабам микромира. Но в связанном состоянии в ядре нейтрон совершенно стабилен, живет неопределенно долго.

Конечно, эта своеобразная ситуация связана с сильным взаимодействием как нейтрона с другими нуклонами в ядре, так и кварков внутри нейтрона. Наверняка, здесь большую роль играет дефект масс, который в этих двух случаях существенно различается по порядку величин. Исследований на эту тему много, но вряд ли вопрос можно считать решенным. Однако если бы его удалось решить до конца, то можно было бы провести следующую параллель: с одной стороны — распадающийся свободный нейтрон и стабильный нейтрон в составе ядра, с другой — радиоактивное ядро и это же ядро, но стабилизированное в составе некоторой системы. Что это за система — сегодня предсказать трудно. Однако ее реальное воплощение, если это вообще возможно, имело бы огромное значение для всей ядерной энергетики мира, позволило бы, может быть, ликвидировать последствия ядерных катастроф, решить проблему радиоактивных отходов и т.д. Скорее всего, такую систему нужно будет попытаться построить методами нанотехнологии, возможно, введением каких-то примесей и др.

Мы заканчиваем эту статью несколько необычно — не конкретным результатом, а постановкой вопроса, но вопрос этот может иметь такое огромное значение, что уже даже сама его постановка имеет определенный смысл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хо л е в о А. С. Вероятностные и статистические аспекты квантовой теории. — М.: Наука, 1980. — С. 13.
2. Б и б е р м а н Л., Су ш к и н Н., Ф а б р и к а н т В. // ДАН СССР. — 1949. — Т. 66. — С. 185–190.
3. Б л о х и н ц е в Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики. — М.: Наука, 1966. — С. 63–64.
4. Б а р а ш е н к о в В. С. Проблемы субатомного пространства и времени. — М.: Атомиздат, 1979. — С. 79–81.
5. Л. д е Б р о й л ь. Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. — М.: Мир, 1986. — С. 280. — С. 24–25.
6. E v e r e t t H. Rev. of Mod. Physics. — 1957. — V. 29. — P. 254–260.
7. М а р к о в М. А. О трех интерпретациях квантовой механики. — М.: Наука, 1991. — С. 101–109.
8. М е н с к и й М. Б. Человек и квантовый мир. — М.: Фрязино, 2007. — С. 156–178.
9. М а т в е е в А. Н. Атомная физика. — М.: Высш. шк., 1989. — 413 с.

10. Б о р н М. Атомная физика. – М.: Мир, 1967. – С. 126.
11. H e i s e n b e r g W. Uber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik // Z. Phys. – 1927. – Bd. 43. – S. 172.
12. H e i s e n b e r g W. In: Universitas. – 1954. – Hf. 3. – S. 225.
13. Д и р а к П. А. М. Основы квантовой механики. – М.: ГИТТЛ, 1937. – С. 12.
14. М я к и ш е в Г. Я. Динамические и статистические закономерности в физике. – М.: Наука, 1973.

Статья поступила в редакцию 16.04.2012