

## Вероятность в физике: истоки и перспективы

П. Н. Николаев\*

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра квантовой статистики и теории поля  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Статья поступила 15.06.2018; Подписана в печать 05.07.2018)*

Рассматривается история вхождения вероятности в физику. Исследуется соотношение статистических и динамических закономерностей. Определено влияние на этот процесс развития методов машинного эксперимента и новых взглядов на представление о макроскопичности систем. Анализируются перспективы использования вероятности в физике.

PACS: 01.65.+g, 01.70.+w УДК: 53

Ключевые слова: история науки, философия науки.

### ВВЕДЕНИЕ

Хотя представление о вероятности в науке восходит к работам Лукреция [1], актуальность данной тематики в последующем вплоть до настоящего времени не стала меньше в науке в целом и в физике в частности [2–4]. Переосмысливаются прежние представления о природе статистических закономерностей в физике и их связи с динамическими закономерностями [5–8]. Это связано с целым рядом факторов, главным из которых стало превращение данной области из места общеполитических дискуссий в область конкретных физических исследований.

Физика стала формироваться как наука, начиная со второй половины XVII века. В 1687 г. выходит основополагающая работа Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии» (Newton, Isaac. *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Londini: Joseph Streater. MDCLXXXVII), название которой по замечанию А. Н. Крылова следовало бы перевести как «Математические основания физики». С именем Ньютона связывают установление основных положений классической механики, ограниченность которой была осознана лишь в начале XX века. Ньютон сформулировал целую научную программу, под влиянием которой физика развивалась в XVIII–XIX веках [7].

В дальнейшем механика как динамическая теория сформировалась в работах Л. Эйлера, Ж. Л. Лагранжа и целого ряда ученых. По этому образцу и подобию формулировались другие области физики.

Вероятностные же представления были введены в физику при разработке молекулярно-кинетической теории газов Максвеллом при выводе закона распределения молекул по скоростям и опубликованы в начале 1860 г. Данная публикация отражала содержание его доклада на заседании Британской ассоциации наук 21 сентября 1859 г., посвященного исследованиям в области молекулярно-кинетической теории газов. Позже эти представления более широко использовались

Большим. Завершением работ Больцмана стала статистическая механика Гиббса, положенная в основу всей статистической термодинамики.

Иногда полагают, что понятие вероятности впервые вошло в теоретическую физику через молекулярную интерпретацию необратимости. Также часто связывают становление статистической картины мира с именем Гиббса. Но все это связано с возникновением и развитием статистической физики.

Возникшая в рамках классической механики эргодическая теория определяла те условия, при которых для рассматриваемой системы при определенных условиях применима термодинамика. В рамках данной теории не учитывается макроскопический характер таких систем. Учет макроскопического характера этих систем приводит к существенному расширению тех классов, для которых статистические закономерности могут быть поняты в рамках динамической теории.

Известно, что в квантовой механике статистические закономерности характерны уже для отдельной частицы, что следует из стандартной интерпретации квантовой механики. При таком подходе вероятностное описание в принципе не может быть сведено к динамическому. Дискуссии по этому вопросу происходят до настоящего времени в рамках обсуждения парадокса Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР), теоремы Белла и целого ряда других вопросов, возникших еще в дискуссиях Эйнштейна и Бора.

Наряду с указанными интерпретациями, во второй половине XX века предложен целый ряд других интерпретаций квантовой механики. В частности М. Б. Менский предлагает подход, основанный на концепции Эверетта, получивший название многомирового.

Сложность рассматриваемой проблемы заключается и в том, что на саму природу вероятностных методов взгляды ученых, как математиков так и физиков, существенно различаются.

Открытия в физике нового времени, связанные с методами машинного эксперимента и новыми представлениями о макроскопичности систем, привели к дальнейшему развитию представлений о статистических и динамических закономерностях, а вместе с тем и о причинности с точки зрения открытых новых законов. В

\*E-mail: nikolaev@phys.msu.ru

настоящей работе данная проблематика рассматривается с точки зрения этих новых результатов, полученных в физике, а также изучается их влияние на дальнейшее использование вероятности в физике.

## 1. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Вероятностные представления были введены в физику при разработке молекулярно–кинетической теории газов Максвеллом в работе «Пояснения к динамической теории газов» и опубликованы в 1860 г. [9]. Здесь он получил закон распределения молекул по скоростям. Максвелл пришел к выводу, что «скорости распределяются между частицами по тому же закону, по которому распределяются ошибки между наблюдениями в теории «метода наименьших квадратов»» то есть в соответствии со статистикой Гаусса.

Это ознаменовало новый этап в развитии физики — в описании физических явлений вошла статистика. Максвелл полагал, что отдельные акты столкновения между частицами подчиняются динамическим закономерностям и в этом смысле строго детерминированы. Вероятностные методы используются из-за невозможности точно описать поведение огромного числа частиц для получения общей картины поведения газа. В то время, да и позже, перспективы методов расчета динамических задач для большого числа частиц выглядели туманно.

Позже эти представления более широко использовались Больцманом [10]. В 1872 г. Больцман доказал знаменитую  $H$ -теорему для частного случая при отсутствии внешних сил. Здесь он использует соответствующее кинематическое уравнение для газов.

Получив в 1875 г. общее газокинетическое уравнение, Больцман в 1877 г. в работе «О связи между вторым законом механической теории теплоты и теорией вероятностей» показал для идеального газа пропорциональность  $H$ -функции и энтропии системы. То есть энтропия была связана с вероятностью данного макроскопического состояния. В результате термодинамические свойства вещества можно было связать с его молекулярным строением. Данная концепция стала основой всей статистической физики.

« $H$ -теорема Больцмана вызвала огромную и весьма плодотворную дискуссию, благодаря которой создан ряд новых научных направлений, например, так называемая эргодическая теория» — говорится в докладе Н. Н. Боголюбова и Ю. В. Саночкина, прочитанного 5 сентября 1956 г. на заседании отделения физико–математических наук АН СССР, посвященном 50-летию со дня смерти Л. Больцмана [7].

Истолкование энтропии как величины, пропорциональной логарифму вероятности состояния, является блестящим достижением Больцмана.

Завершением работ Больцмана стала статистическая механика Гиббса, положенная в основу всей статистической термодинамики [11]. Для перехода от механи-

ческого описания системы к вероятностному, статистическому, он ввел понятие статистического ансамбля — совокупности большого числа копий данной механической системы, находящихся в одинаковых с макроскопической точки зрения внешних условиях.

Совокупность аналогичных систем была введена в 1871 г. еще Больцманом для системы с заданной полной энергией под названием эргодов, то есть ансамблей с эргодическим распределением по состояниям. По терминологии Гиббса это микроканонический ансамбль. Понятие статистического ансамбля у Больцмана не получило дальнейшего развития, так как для задач кинетической теории газов, которыми он занимался, достаточно частного понятия статистического ансамбля, соответствующего распределению по координатам и импульсам отдельных молекул.

Вместе с тем И. Пригожин утверждал, что «понятие вероятности впервые вошло в теоретическую физику через молекулярную интерпретацию необратимости» [12], что является скорее данью уважения Больцману и его вкладу в развитие вероятностных методов в физике, чем исторической истине.

Для функции распределения в фазовом пространстве Гиббс вводит основное уравнение статистической механики, которое в настоящее время принято называть уравнением Лиувилля. Сам по себе переход от уравнений Гамильтона к уравнению Лиувилля не приводит к статистической физике. Статистическое описание появляется на основе введения дополнительных допущений («размытость» начальных условий и т.п.).

Работы Гиббса произвели сильное впечатление, как на его современников, так и на последующие поколения. Н. Винер даже говорил о переходе от ньютоновского мира к вероятностному [13]. Он писал, что «именно Гиббсу, а не Альберту Эйнштейну, Вернеру Гейзенбергу или Максуду Планку мы должны приписать первую великую революцию в физике XX века» [13, 14]. Вместе с тем представление о вероятности, соотношении статистических и динамических закономерностей, вызывает острые дискуссии. Вопрос о природе вероятности многие исследователи до сих пор считают открытым.

Имеются различные точки зрения по вопросу о вхождении вероятности в физику. Но можно с уверенностью сказать, что это связано с возникновением и развитием статистической физики [15, 16].

В работе «О некоторых проблемах, связанных с обоснованием статистической механики», Н. Н. Боголюбов пишет: «Как известно, основным постулатом статистической механики, обеспечивающим ее применимость к термодинамике, является следующее допущение: если рассматриваемая динамическая система является макроскопической системой, изолированной от внешних влияний и заключенной в некотором макроскопическом объеме  $V$ , то наблюдаемые значения макроскопических динамических величин стремятся при  $t \rightarrow +\infty$  к постоянным значениям, представленным средними этих величин, взятыми по

равновесному распределению Гиббса» [5, с. 3].

В рамках классической механики возникла глубокая эргодическая теория, определяющая те условия, при которых для рассматриваемой системы при определенных условиях применима термодинамика [17]. Н. Н. Боголюбов обратил внимание на то, что в рамках данной теории рассматриваются динамические системы, изолированные от внешних влияний, с компактным фазовым пространством, и при этом не учитывается макроскопический характер таких систем [5].

Но с точки зрения статистической механики только для макроскопических систем и нужно устанавливать приближение временной средней к пространственно средней. Поэтому классическая эргодическая теория налагает слишком сильные ограничения на рассматриваемые системы. Это отчасти связано с тем, что в рамках общей динамической теории трудно ввести понятие макроскопичности.

Эргодичность не является универсальным свойством механических систем. Некоторые из простейших наиболее важных систем не эргодичны. К ним относятся, в частности, идеальный газ, система гармонических осцилляторов [17]. Для рассмотрения неэргодических систем используются различные подходы, в частности либо переход от полного фазового пространства к его частям, которые являются метрически неразложимыми, либо выбор из всех переменных тех, которые являются эргодичными (второй подход был введен Хинчиным). Это позволяет устранить слишком сильные ограничения, которые вносятся стандартным требованием эргодичности.

## 2. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

В начале XX века было установлено, что классическая механика имеет ограниченную область применимости. В ней описание частиц осуществляется путем задания их координат и скоростей в зависимости от времени. Такому описанию соответствует движение частицы по вполне определенной траектории. Однако опыт показал, что это не всегда справедливо, особенно для частиц с малой массой.

Хотя начальные квантовые представления были введены еще в 1900 г. М. Планком, первый вариант квантовой механики — матричная квантовая механика — создан В. Гейзенбергом в 1925 г. В. Гейзенберг исследовал спектральные закономерности, а также теорию дисперсии. Еще в 1923 г. он принял точку зрения, согласно которой «модельные представления принципиально имеют только символический смысл, они являются аналогами «дискретной» квантовой теории» [7]. Теория атомных явлений по Гейзенбергу должна ограничиваться установлением соотношений между величинами, которые непосредственно наблюдаются в экспериментальных исследованиях — частотой излучения спектральных линий, их интенсивностью, поляризацией и т. п. «Ненаблюдаемые» величины, такие как коор-

дината электрона, его скорость, траектория, по которой он движется, не должны использоваться в теории атома. Реализация этой программы позволила Гейзенбергу получить квантовые матричные уравнения. Усилиями Борна, Йордана, а также Дирака, математический аппарат матричной квантовой механики приобрел законченный вид.

Несколько позже в 1926 г. Э. Шредингер формулирует волновой вариант квантовой механики. До этого в 1923 г. Луи де Бройль высказывает идею о волновой природе материальных частиц. Используя идеи де Бройля, а также оптико-механическую аналогию, Шредингер получает волновое уравнение.

В рамках данного подхода состояние микрочастицы описывается волновой функцией. Достаточно быстро им же было установлено, что его подход и матричное описание математически эквивалентны. Эта эквивалентность следует из определения линейного дифференциального оператора.

Шредингер на первом этапе считал электрон не точечной частицей, а электрическим зарядом, размазанным в пространстве. При этом, используя волновую функцию, можно определить плотность заряда.

Но данная интерпретация встретила целый ряд сложностей. Особенно это касалось многоэлектронных атомов. Не получило развитие и представление об электроны как пакете волн де Бройля — этот пакет слишком быстро расплывался.

Теория Шредингера сразу стала популярной. С математической точки зрения она была более удобна, чем матричная механика. На первом этапе казалось, что этот подход дает возможность интерпретировать закономерности атомной физики без непонятных квантовых скачков, без отказа от наглядных представлений. В 1926 г. М. Борн предложил вероятностное толкование волновой функции. Данная интерпретация волновой функции получила широкое признание и стала общепринятой. Но вместе с ней возник вопрос о природе статистических закономерностей в квантовой механике.

В квантовой механике статистические закономерности характерны уже для отдельной частицы, что следует из стандартной борновской интерпретации квантовой механики. При таком подходе вероятностное описание в принципе не может быть сведено к динамическому.

Другое представление о сущности квантовой механики было у А. Эйнштейна, который пришел к выводу, что «квантовая механика описывает ансамбль систем, но не отдельные системы» [18, с. 621]. Дискуссия по этому вопросу происходит до настоящего времени в рамках обсуждения парадокса Эйнштейна–Подольского–Розена (парадокс ЭПР) и целого ряда других проблем, возникших в результате длительной дискуссии Эйнштейна и Бора о фундаментальных проблемах квантовой механики.

Предложен также целый ряд других интерпретаций квантовой механики, отличных от борновской. В част-

ности, М. Б. Менский предлагает подход, основанный на концепции Эверетта, получивший название многомирового. Он полагает, что «концептуальные проблемы квантовой механики возникают не из практических потребностей, таких как расчет реальных систем, и не из эксперимента, но из желания сделать теорию более логичной и последовательной» [19].

Сложность рассматриваемой проблемы заключается и в том, что на саму природу вероятностных методов взгляды ученых существенно различны. На это обратил внимание Поппер, который писал: «Нигде субъективистская эпистемология не распространяется столь сильно, как в области исчисления вероятностей» [20, с. 482].

Общепринятая в настоящее время статистическая интерпретация квантовой механики, получившая экспериментальное подтверждение, позволила значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих как в микромире, так и в макромире. При этом во второй половине двадцатого века появляются экспериментальные работы, посвященные локализации отдельных микрочастиц и их изучению.

В 1989 г. Х. Демельт и В. Пауль были удостоены Нобелевской премии по физике «за разработку метода удержания одиночных ионов» [21, 22]. Свою речь при получении Нобелевской премии Х. Демельт закончил словами: «В заключение я бы хотел процитировать строку из Уильяма Блейка «Увидеть мир в песчинке» и намекнуть на возможную параллель — увидеть мир в электроде». Здесь на первый план выступает еще один аспект рассматриваемой проблемы: те частицы, которые при создании квантовой механики считались «элементарными», являются на самом деле сложными объектами.

При рассмотрении системы из многих частиц, состояния которых определяются законами квантовой механики, необходимо вводить статистические описания для системы объектов, которые уже подчиняются вероятностным законам.

Если в классических системах наблюдаемые величины есть вещественные функции, определяемые в фазовом или конфигурационном пространстве системы, то в квантовых системах каждой наблюдаемой величине соответствует самосопряженный оператор, действующий в гильбертовом пространстве состояний системы. В классической статистической механике для определения среднего по ансамблю используют вероятностную меру в фазовом или конфигурационном пространстве системы. В квантовой статистической механике для этой цели служит матрица плотности, определенная в гильбертовом пространстве состояний системы. Описание состояний системы с помощью матрицы плотности было введено независимо в 1927 г. Ландау и Блохом [23, 24].

Матрица плотности была введена для описания систем, являющихся частью некоторой изолированной системы. При этом предполагалось, что состояние изолированной системы можно описать волновой функ-

цией. Описание с помощью матрицы плотности является наиболее общим описанием системы, когда мы имеем смешанные состояния. Если же матрица плотности сводится к произведению волновой функции и ее комплексной сопряженной, то состояние системы описывается волновой функцией, и мы имеем чистое состояние.

Матрица плотности подчиняется уравнению Неймана, являющемуся квантовым аналогом уравнения Лиувилля [25, 26]. Идеи фон Неймана [27] были восприняты в 30-х годах XX века московской школой физиков-теоретиков, которую в то время возглавлял Л. И. Мандельштам.

Данное направление было в дальнейшем существенно развито К. В. Никольским [28], который оказал влияние на Д. И. Блохинцева. Последний развивает интерпретацию квантовой механики как теории квантовых статистических ансамблей и использует прямое обобщение классической статистической механики [29]. По мнению Д. И. Блохинцева, «такой подход к основам квантовой механики имеет преимущество перед традиционным ее изложением на основе волновой функции, так как позволяет включить как главу квантовой механики теорию квантовых измерений» [29, с. 5].

В подходе, предложенном Д. И. Блохинцевым, отпадают парадоксы, связанные со скачкообразным изменением волновой функции в результате измерения. Следует отметить, что концепция квантовых ансамблей, выдвинутая еще в 1934 г. фон Нейманом, принципиально отличается от концепции классических статистических ансамблей: в первом случае это когерентные ансамбли, во втором — некогерентные. Когерентный ансамбль в квантовой механике выступает как максимально упорядоченный коллектив с нулевым значением энтропии, имеющим максимально возможную информацию.

Следует отметить, что для матрицы плотности можно поставить задачу Коши. Таким образом, динамические закономерности и в данной области сочетаются со статистическими при описании систем многих частиц [30].

### 3. СТАТИСТИКА И ДИНАМИКА

Открытия в физике нового времени, связанные с методами машинного эксперимента — методом молекулярной динамики (ММД) и методом Монте-Карло, новыми представлениями о физическом вакууме, а также изменением представления о макроскопичности системы, привели к дальнейшему развитию представлений о статистических и динамических закономерностях, а вместе с тем и о причинности с точки зрения открытых новых законов.

Физическая теория вначале сформировалась как наука, в основе которой были положены динамические закономерности. Дальнейшее ее развитие привело к тому, что в физической науке стали широко ис-

пользоваться и методы, основанные на вероятностных законах.

Начиная с середины 50-х годов XX века компьютерные методы, используемые в физике, начинают значительно прогрессировать. Если в классической физике до сих пор точно решенной проблемой является проблема двух тел, то с середины 50-х годов численному расчету стали поддаваться системы, состоящие из десятков и даже сотен частиц. Эти числа постоянно росли, а с начала текущего столетия сама скорость роста стала быстро возрастать.

Метод молекулярной динамики состоит в решении системы уравнений Ньютона для системы  $N$  тел. Вначале его рассматривали как некоторый технический прием, облегчающий анализ сложных систем. Но после того как в 1957 г. с помощью данного подхода удалось обнаружить принципиально новое явление — фазовый переход в системе твердых сфер [7], отношение к нему изменилось.

По существу возникла физика нового времени, основанная на компьютерных методах. Отличие от старого подхода заключалось не только в том, что компьютеры считали быстрее, но и тем, что находится не полное, а частичное решение задачи. Задачи ставит физик и определяет ее границы. Поэтому стали говорить о машинном эксперименте и моделировании.

В настоящее время моделируются как системы, состоящие из нескольких десятков частиц, так и существенно более сложные системы, например, сложные физико-химические процессы, системы состоящие из многих очень сложных многокомпонентных частиц и т.д.

Возможности современной вычислительной техники позволяют решать не только классические, но и квантовые многочастичные задачи. При этом статистические закономерности, как показывают расчеты, возникают при существенно меньшем числе частиц в системе, чем это предполагалось на заре возникновения статистической механики.

В расчетах по методу молекулярной динамики было показано, что достаточно быстро (за время, при котором происходит порядка нескольких столкновений) распределение по скоростям в системе становится максвелловским. Равновесные термодинамические свойства систем многих частиц уже давно рассчитываются по методу молекулярной динамики с большой точностью. Таким образом, равновесные статистические закономерности могут быть получены из динамических закономерностей классической механики.

Полная механическая информация о частицах системы не изменяет ни вероятности микросостояний, ни законов термодинамики. Статистические закономерности появляются из динамических, но для этого мы из всех состояний выбираем лишь те, которые соответствуют термодинамическому поведению макросистемы. В этом смысле статистические закономерности не сводятся к динамическим — метод молекулярной динамики позволяет понять их природу.

В последние десятилетия метод молекулярной динамики стал успешно использоваться для исследования и неравновесных термодинамических свойств системы. Сам В. Гиббс неравновесные свойства рассмотрел лишь в общих чертах. Создание же неравновесной статистической физики тормозил тот факт, что по существу до работ Л. Онзагера не была развита даже неравновесная термодинамика.

В работах 1946 г. Н. Н. Боголюбов вводит частичные функции распределения и получает для них неравновесную цепочку уравнений. Он же разработал метод решения цепочки уравнений. Это стало возможным на основе введения представлений об иерархии релаксационных процессов и принципа ослабления корреляций. В результате удалось не только получить уравнения Больцмана и Власова, но и сформулировать процедуру их дальнейшего улучшения, что имело весьма важное значение, так как и подход Больцмана, и подход Власова имели на первых этапах своего развития как сторонников, так и противников.

Но уже в 60-х годах XX века были обнаружены трудности при рассмотрении приближений высших порядков в подходе Боголюбова [7]. Оказалось, что интегралы столкновений, определяющие в кинетических уравнениях диссипативные процессы, при учете взаимодействия четырех и большего числа частиц становятся расходящимися. Причину этих сложностей и пути их преодоления удалось понять позже.

В настоящее время существует целый ряд теоретических подходов к изучению неравновесных процессов в рамках статистической механики. Вместе с тем общее решение проблемы далеко до своего разрешения. В этом смысле метод молекулярной динамики является той путеводной нитью, которая помогает сделать правильный выбор. То есть динамический и статистический подходы в данном случае дополняют друг друга.

Вопрос о соотношении статистических и динамических закономерностей неоднократно ставился как в физике, так и в более широком познавательном, философском смысле. Особое значение имеет исследование природы этих закономерностей, что позволяет свести поведение сложных систем (например, биологических, социальных и т.п.) к поведению более простых систем.

В рамках физики в понимании статистических закономерностей был сделан существенный прогресс, основанный, в первую очередь, на исследовании молекулярной динамики для исследования систем, состоящих из большого числа частиц. Удалось понять, как число частиц влияет на характер поведения системы, и на каком этапе появляются закономерности, которые принято называть статистическими. При этом характер этой зависимости оказался существенно сложнее, чем предполагалось на начальном этапе развития статистической механики.

В результате были подтверждены основные положения статистической физики. Но это было не просто сведение статистических закономерностей к динамическим в рамках классической статистической физи-

ки, а определение именно их природы, то есть условий, при которых статистические закономерности имеют место в динамических системах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникшая физическая теория вначале сформировалась как наука, в основе которой были положены динамические закономерности. Дальнейшее ее развитие привело к тому, что в физической науке стали широко использоваться методы, основанные на вероятностных законах.

Причины вхождения вероятности в физику представлялись на разных этапах развития науки самыми разнообразными. На первом этапе самым простым объяснением было то, что при наличии большого числа частиц нет никакой возможности решить данную сложную механическую задачу. Но предпринимались многочисленные попытки вывести статистические закономерности из механики. Несмотря на то, что все они в то время не увенчались успехом, возникло представление об эргодических системах, которое позволило развиваться теории обоснования статистической механики.

Вопрос о соотношении статистических и динамических закономерностей неоднократно ставился и ставится как в физике, так и в более широком познавательном, философском смысле. Особое значение имеет исследование природы этих закономерностей, что позволит свести поведение сложных систем (например, биологических, социальных и т.п.) к поведению более простых систем.

Позже в рамках физики в понимании статистических закономерностей был сделан существенный прогресс, основанный в первую очередь на применении методов машинного эксперимента для исследования систем, состоящих из многих частиц. В результате были подтверждены основные положения статистической физики. Но это было не просто сведение статистических закономерностей к динамическим в рам-

ках классической статистической физики, а определение именно их природы, то есть условий, при которых статистические закономерности имеют место в динамических системах.

Общепринятая в настоящее время статистическая интерпретация квантовой механики, получившая экспериментальное подтверждение, позволила значительно продвинуться в понимании процессов, происходящих как в микромире, так и в макромире. Если при создании квантовой механики целый ряд частиц считались «элементарными», в дальнейшем было установлено, что имеют сложную структуру.

Для изучения этой структуры было проведено множество экспериментов. Для этого предложено огромное количество принципиально новых подходов для решения задач физики атомного ядра и элементарных частиц. Это связано с потребностью продвинуться вглубь мироздания. Представления квантовой механики перестали носить мистический характер. Этому способствовало не только развитие уровня нашего знания, но развитием практики: создание сверхмощных ускорителей, использование данных из области физики космических лучей, развитие методов локализации микрочастиц и их последующего изучения.

Во второй половине XX века было установлено, что требование эргодичности сильно ограничивает класс систем, в которых можно использовать статистическую механику. Для целого ряда систем, которые при стандартном подходе не являются эргодическими, использование статистических законов оправдано. И здесь на первый план, как и на заре возникновения статистической механики, выступает требование макроскопичности системы. Но это уже то требование, которое основывается на данных машинного эксперимента, которое существенно слабее требования статистического предельного перехода.

Статистические и динамические способы описания не исключают друг друга, а взаимно дополняют. Только используя их совместно можно исследовать проблемы, стоящие перед современной физикой.

- 
- [1] *Лукреций*. О природе вещей. М.: издательство АН СССР, 1958.
- [2] *Karczewski M., Markiewicz M., Kurzycki P.* Phys. Rev. Lett. 2018. **120**. 080401.
- [3] *Spielman I. B.* Nature. 2017. **545**. P. 293.
- [4] *Jiang S.-H., Xu Z.-P., Su H.-Y., Pati A.K., Chen J.-L.* Phys. Rev. Lett. 2018. **120**. 050403.
- [5] *Боголюбов Н. Н.* История и методология естественных наук. Вып. 30. Физика. М.: Издательство Московского университета, 1983. С. 3.
- [6] *Базаров И. П., Николаев П. Н.* Вопросы философии. 1986. № 7. С. 142.
- [7] *Николаев П. Н., Николаева О. П.* Природа статистических и динамических закономерностей в физике. В кн.: *Николаев П. Н.* Михаил Васильевич Ломоносов и развитие физики в Московском университете. М.: 2013, С. 106.
- [8] Nature. 2017. **550**. P. 185.
- [9] *Кудрявцев П. С.* Максвелл. М.: 1956.
- [10] *Больцман Л.* Лекции по теории газов. М.: ГИТТЛ, 1956.
- [11] *Гиббс Дж. В.* Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982.
- [12] *Пригожин И.* От существующего к возникающему. М.: 1985.
- [13] *Винер Н.* Кибернетика и общество. М.: 1958.
- [14] *Сачков М. В.* Вопросы философии. 2006. № 1. С. 80.
- [15] *Уленбек Г.* УФН. 1971. **103**. С. 275.
- [16] *Кадомцев Б. Б.* Динамика и информация. М.: 1997.
- [17] *Penrose O.* Rep. Prog. Phys. 1979. **42**. N 12. P. 1939.

- [18] *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т. 3. М., 1966.  
[19] *Менский М. Б.* Вопросы философии. 2004. № 6. С. 64.  
[20] *Поппер К.* Логика и рост научного знания. М.: 1983.  
[21] *Hans Dehmelt* Nature. 2018. 545. P. 290.  
[22] *Демельт Х.* УФН. 1990. **160**. С. 129.  
[23] *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Квантовая механика. М.: Наука, 1974.  
[24] *Боголюбов Н. Н.* Избранные труды в трех томах. Т. 2. Киев, Наукова думка, 1970.  
[25] *Кунн Ф. М.* Статистическая физика и термодинамика. М.: Наука, 1981.  
[26] *Рюэль Д.* Статистическая механика. Строгие результаты. М.: Мир, 1971.  
[27] *Фон Нейман И.* Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964.  
[28] *Никольский К. В.* Квантовые процессы. М.: Гостхиздат, 1940.  
[29] *Блохинцев Д. И.* Квантовая механика. М.: Атомиздат, 1981.  
[30] *Боголюбов Н. Н.* Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1979. **9**. Вып. 4. С. 501.

---

## Probability in Physics: Origins and Perspectives

**P. N. Nikolaev**

*Department of Quantum Statistics and Field Theory, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia  
E-mail: nikolaev@phys.msu.ru*

The history of the appearing of probability in physics is considered. The ratio of statistical and dynamic regularities is investigated. The influence on this process of machine experiment methods development and of new views on the concept of systems macroscopicity is determined. Perspectives for the use of probability in physics are analyzed.

PACS: 01.65.+g , 01.70.+w .

*Keywords:* history of science, philosophy of science.

*Received 15 June 2018.*

### Сведения об авторе

Николаев Павел Николаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-12-90, e-mail: nikolaev@phys.msu.ru.

---