

ПРИРОДА СТАТИСТИЧНОСТИ КВАНТОВОГО ОПИСАНИЯ И ПОЛЕВАЯ ПАРАДИГМА МИ–ЭЙНШТЕЙНА

Ю.П. Рыбаков

*Российский университет дружбы народов
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6*

Аннотация. Обсуждается природа статистического описания в квантовой теории и показывается, что в рамках полевого подхода Ми–Эйнштейна, в котором частицы рассматриваются как сгустки некоторого материального поля, подчиняющегося нелинейным уравнениям, такое описание является естественным и необходимым, так как невозможно задать начальные условия для протяженной частицы-солитона. Кроме того, показывается, что на основе солитонов возможно построение специального стохастического представления квантовой механики, эквивалентного теории нелокальных скрытых переменных.

Ключевые слова: статистическое описание, солитонные конфигурации, скрытые параметры, стохастическое представление волновой функции.

Начиная с первых работ де Бройля [1], Гейзенберга [2] и Шрёдингера [3] по созданию математического аппарата квантовой механики, возникла проблема его осмысления и интерпретации, вызванная абстрактностью и непривычностью этого аппарата с точки зрения классической физики. В первую очередь, это было связано с многочисленными парадоксальными результатами, к которым приводили попытки построения теории измерений на основе статистической интерпретации волновой функции [4–6].

Если следовать логике развития классической статистической физики, то можно назвать две основные причины, по которым возникала необходимость прибегать к услугам теории вероятности и тем самым отказываться от привычного динамического описания. Первую из этих причин указали ещё Ланжевен [7] и Смолуховский [8], которые подчеркивали неотвратимость *случайных воздействий на изучаемые объекты со стороны внешней среды*. Обычно такие случайные силы называют *силами Ланжевена*.

Вторую причину указал Гиббс [9], создатель классической статистической механики, который считал необходимым использовать вероятностное описание из-за *сложности изучаемых систем и неопределенности начальных условий*, хотя и опирался при этом на строгие уравнения динамики Ньютона. Активно пользовался методами Гиббса и основоположник квантовой теории излучения черного тела Планк [10].

Эйнштейн и де Бройль в своем научном творчестве следовали программе, основные идеи которой были сформулированы Густавом Ми [11]. Согласно

программе Эйнштейна, микрочастицы рассматриваются как *сгустки* (*bunched fields, lumps*) некоторого неизвестного материального поля, подчиняющегося нелинейным уравнениям. Впоследствии такие конфигурации нелинейного поля, получившие название *солитонов*, стали предметом пристального интереса как со стороны математиков, так и физиков, поскольку свойства солитонов во многом напоминали свойства микрочастиц.

Поскольку солитоны выступают в рамках программы Эйнштейна как *образы протяженных частиц*, необходимость применять для описания их эволюции статистический аппарат может быть обоснована в равной мере как с точки зрения подхода Гиббса, так и Ланжевена. Впервые такая идея была высказана в работе Я.П. Терлецкого [12]. При этом основная трудность состояла в обосновании правила Борна об интерпретации волновой функции как амплитуды вероятности. Различные подходы к решению этой трудной задачи, позволяющие по-новому взглянуть на природу квантовых закономерностей, предлагались в работах как самого де Бройля [13–14], так и его учеников [15]. История этого вопроса и некоторые итоговые результаты указанных исследований отражены в работах [16–19].

Особенно примечательна, с точки зрения восприятия ключевых положений программы Ми–Эйнштейна, известная дискуссия Бора и Эйнштейна о полноте квантово-механического описания [5], инициированная появлением известной статьи Эйнштейна, Подольского и Розена [20], в которой был сформулирован так называемый *парадокс ЭПР*. Чтобы обозначить позиции сторон, напомним, что речь идет о различной интерпретации ключевого понятия квантовой теории – волновой функции. Известны две физически различные интерпретации, которые обычно связывают с именами Эйнштейна и Бора:

- *статистическая интерпретация* (Эйнштейн) принимает, что волновая функция дает вероятностное описание ансамбля тождественных микросистем, так называемого квантового статистического ансамбля.
- *копенгагенская интерпретация* (Бор) принимает, что волновая функция дает вероятностное описание индивидуальной микросистемы.

Если первая точка зрения подчеркивает, что выводы квантовой механики нельзя относить к индивидуальной микросистеме (отдельному электрону или фотону), поскольку они носят статистический характер, то вторая точка зрения предполагает, что волновая функция дает максимально полное описание индивидуального микропроцесса и такое описание не может быть детерминированным. Следует подчеркнуть, что *на опыте обе указанные позиции неразличимы*, так как вероятностные предсказания могут быть проверены только в результате статистической обработки серии наблюдений.

Проиллюстрируем различие этих точек зрения на примере известного опыта по дифракции электронов, который выполнили в 1949 году Л. Биберман, Н. Сушкин и В. Фабрикант [21]. Они использовали чрезвычайно слабый ток, *пропуская электроны через кристаллический образец по одному и регистрируя их попадание на экран в отдельные точки*. Выяснилось, что с течением времени, по мере накопления электронов, на экране

вырисовывалась типичная дифракционная картина. Результаты этих опытов подтверждают гипотезу де Бройля о том, что некоторое волновое поле сопровождает каждый отдельный электрон (или фотон), однако оно обнаруживается лишь статистически. Тем самым выявляется *статистическая природа корпускулярно-волнового дуализма*: волна, сопровождающая частицу, проявляется только в серии испытаний, а не в отдельном наблюдении. Таким образом, электрон, как и любая другая микрочастица, не может считаться ни обычной классической частицей, ни волной, – это нечто третье. Его нельзя считать классической частицей, так как при прохождении через образец он особым, резонансным образом взаимодействует сразу со многими сотнями атомов – в противном случае в серии испытаний не могла бы формироваться дифракционная картина. Его нельзя считать и волной, так как на экране он попадает в какое-то определенное место, локализуется. Все сказанное подтверждает *представление об электроны как солитоне*.

Таким образом, все предсказания квантовой механики относятся к предстоящим измерениям, к будущему, – и в этом согласны между собой сторонники обеих интерпретаций, признавая, что эти предсказания носят только вероятностный характер. Различие в позициях обнаруживается, если поставить вопрос иначе, а именно: если каждый отдельный электрон попадает на экране в какое-то определенное место, то возможно ли другое описание микроявлений, отличающееся от квантовой механики и использующее совсем другие переменные, которые позволят получить дополнительную информацию об индивидуальных микропроцессах?

Сторонники копенгагенской интерпретации отвечают на этот вопрос отрицательно, считая, что квантовая механика дает максимально полное описание микромира. Если же следовать статистической интерпретации, то построение таких более широких теорий возможно, и в их рамках можно будет получить более детальное описание индивидуальных микроявлений, использующее новые переменные, которые получили название *скрытых параметров* (СП). Совершенно ясно, что новая теория должна быть похожа на статистическую механику, и после усреднения по скрытым параметрам должны восстанавливаться все результаты квантовой теории.

Какие же доказательства неполноты квантовой теории предъявили авторы статьи [20]? В этой работе был сформулирован так называемый «парадокс ЭПР». Поскольку предполагается, что все обсуждаемые теоретические построения имеют отношение к действительности, сначала принимаются два определения, касающиеся понятий *полноты физической теории и элемента физической реальности*:

Определение 1. Для того чтобы некоторая теория была полной, необходимо и достаточно, чтобы каждый элемент физической реальности (из области применимости теории) имел соответствие в теории.

Определение 2. Достаточным условием для отождествления некоторого элемента физической реальности является следующее: «Если, никак не возмущая систему, можно с определенностью, то есть с вероятностью,

равной единице, предсказать значение некоторой физической величины, то существует элемент физической реальности, отвечающий этой физической величине».

После этого предлагается некоторый мысленный эксперимент, который для упрощения мы дадим в трактовке Д. Боба. В данном случае рассматривается система двух частиц со спином $\frac{1}{2}$, находящихся в метастабильном состоянии со спином ноль. Соответствующая спиновая волновая функция может быть представлена в виде линейной комбинации одночастичных спиновых функций:

$$\psi_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\psi_{1\uparrow} \otimes \psi_{2\downarrow} - \psi_{1\downarrow} \otimes \psi_{2\uparrow}]. \quad (1)$$

Как известно, с помощью (1) можно вычислить так называемый спиновый коррелятор, то есть среднее вида

$$\langle (\sigma_1 \mathbf{a})(\sigma_2 \mathbf{b}) \rangle = -(\mathbf{ab}), \quad (2)$$

где единичные векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} определяют направления проектирования спинов соответственно первой и второй частиц. Состояния типа (1) получили название *запутанных состояний* (entangled states).

В результате распада системы ее составные частицы разлетаются в разные стороны, и первая частица пропускается через установку Штерна–Герлаха с магнитным полем вдоль оси Z . Поэтому в результате наблюдения получается информация о знаке проекции спина на ось Z , то есть о собственном значении оператора σ_{1z} . Однако полный спин системы равен нулю, и поэтому $\sigma_{2z} = -\sigma_{1z}$ в соответствии с (1). Таким образом, никак не влияя на вторую частицу, которая к моменту наблюдения улетела достаточно далеко, мы получаем информацию о проекции ее спина на ось Z . Поэтому существует элемент физической реальности, задаваемый оператором σ_{2z} .

Однако с таким же успехом мы могли бы выбрать установку Штерна – Герлаха с магнитным полем вдоль оси X и получить информацию о проекции спина $\sigma_{2x} = -\sigma_{1x}$, никак не влияя на вторую частицу. Следовательно, существует элемент физической реальности, задаваемый оператором σ_{2x} . Таким образом, существует и элемент физической реальности, отвечающий паре $\{\sigma_{2z}, \sigma_{2x}\}$. Однако квантовая механика запрещает существование общих векторов состояния у двух некоммутирующих операторов, в данном случае у σ_{2z} и σ_{2x} . Отсюда и делается вывод о неполноте квантовой механики.

Вскоре, однако, выяснилось, что в представленном доказательстве имелся изъян, на который сразу же указали Бор [5] и Мандельштам [22], ознакомившись с вышедшей статьей [20]. В самом деле, из того факта, что в отдельности существуют элементы физической реальности A и B , совсем не следует, что должна существовать пара элементов физической реальности $\{A, B\}$, поскольку они могут исключать друг друга, то есть быть несовместимыми. Именно это и имеет место в разобранным примере, так как измерения

проекций спина на оси Z и X требуют разных установок Штерна–Герлаха с ортогональными ориентациями магнитных полей: в правой части соотношения (2) стоит ноль. Поэтому соответствующие векторы состояний несовместны, что и подчеркивается *принципом дополнительности Бора* (контекстуальность), то есть в квантовой механике можно говорить о состоянии только при наличии соответствующей экспериментальной установки.

Однако, несмотря на ошибочность представленного доказательства неполноты квантовой механики, в статье ЭПР была поднята очень важная проблема, касающаяся возможности обобщения квантовой механики и построения альтернативного описания микромира в рамках теорий со скрытыми параметрами. В дальнейшем, в работах [16–19; 23] было построено *стохастическое представление квантовой механики*, в котором волновая функция записывалась в виде суперпозиции солитонных конфигураций, соответствующих протяженным частицам. Таким образом, подтверждалась выполнимость принципа соответствия *нелинейных полевых моделей* с квантовой механикой при условии, что точность измерения координаты центра частицы-солитона намного меньше собственного размера солитона. Фактически это условие соответствует предположению о точечности частиц. Кроме того, оказывается, что известная квантово-механическая *связь спина со статистикой является следствием протяженности частиц*.

В заключение сделаем несколько замечаний об известных теоремах фон Неймана [4] и Белла [24; 25], касающихся теорий со скрытыми параметрами. Исторически фон Нейман был первым, обратившим внимание на проблему скрытых параметров. Он показал, что *в рамках линейных теорий СП невозможны*. Наконец, Белл построил пример *нелинейной модели СП*, правда, для двумерного гильбертова пространства и вывел *неравенства Белла*, которые справедливы для *локальных СП*, то есть для точечных частиц. Однако опыт показывает [26], что *неравенства Белла нарушаются*, то есть микрочастицы нельзя считать точечными. Все сказанное еще раз убеждает в разумности полевого подхода Ми–Эйнштейна, который совместим с критерием Белла.

Литература

1. Broglie L. de Recherches sur la Théorie des Quanta. Paris: Fondation Louis de Broglie, 1992.
2. Гейзенберг В. Физические принципы квантовой теории. Л. – М.: ГТТИ, 1932.
3. Шредингер Е. Четыре лекции по волновой механике. Харьков – Киев: ОНТИ, Гос. науч.-техн. изд-во Украины, 1936.
4. Нейман И. фон. Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964.
5. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. М.: ИЛ, 1961.
6. Piron C. Foundations of Quantum Physics. London: W.A. Benjamin, Inc., 1976.
7. Ланжевен П. Физика прерывности // П. Ланжевен. Избранные произведения. М.: ИЛ, 1949. С. 255–298.

8. Смолуховский М. К кинетической теории брауновского молекулярного движения и суспензий // Брауновское движение: А. Эйнштейн, М. Смолуховский. Л.: ОНТИ, 1934. С. 133–165.
9. Гиббс Дж.В. Основные принципы статистической механики. М.- Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1946.
10. Планк М. Теория теплового излучения. Л.- М.: ОНТИ, 1935.
11. Mie G. Grundlagen einer Theorie der Materie // Ann. d. Physik. 1912. В. 39. Heft 1. S. 1–40.
12. Терлецкий Я.П. К статистической теории нелинейного поля // ДАН СССР. 1960. Т. 133. № 3. С. 568–571.
13. Broglie L. de Étude critique des bases de l'interprétation actuelle de la Mécanique ondulatoire. Paris: Gauthier-Villars, 1963.
14. Broglie L. de La Thérmodynamique de la particule isolée. Paris: Gauthier-Villars, 1971.
15. Destouches J.-L. La Quantification en Théorie Fonctionnelle. Paris: Gauthier-Villars, 1958.
16. Rybakov Yu.P. Topological Solitons in the Skyrme – Faddeev Spinor Model and Quantum Mechanics // Gravitation and Cosmology. 2016. Vol. 22. No. 2. P. 179–186.
17. Рыбаков Ю.П. Солитоны и квантовая механика // Динамика сложных систем. 2009. № 4. Т. 3. С. 3–15.
18. Rybakov Yu.P. On the Causal Interpretation of Quantum Mechanics // Found. Phys. 1974. Vol. 4. No. 2. P. 149–161.
19. Rybakov Yu.P. La Théorie Statistique des Champs et la Mécanique Quantique // Ann. Fond. L. de Broglie. 1977. Т. 2. № 3. P. 181–203.
20. Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. Can Quantum – Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? // Phys. Rev. 1935. Vol. 47. P. 777–780.
21. Биберман Л., Сушкин Н., Фабрикант В. Дифракция поочередно летящих электронов // ДАН СССР. 1949. Т. 66. № 2. С. 185–186.
22. Манделштам Л. И. Лекции по оптике, теории относительности квантовой механике. М.: Наука, 1972.
23. Rybakov Yu.P., Kamalov T.F. Bell's theorem and entangled solitons // Intern. J. Theor. Physics. 2016. Vol. 55. No 9. P. 4075–4080.
24. Bell J.S. Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics. New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1996.
25. Bell J.S. On Einstein – Podolsky – Rosen Paradox // Physics. 1964. Vol. No. 3. P. 195–199.
26. Aspect A., Grangier Ph., Roger G. Experimental Realization of Einstein Podolsky – Rosen – Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 49. No. 2. P. 9–94.

STATISTICAL ORIGIN OF QUANTUM DESCRIPTION AND MIE–EINSTEIN FIELD PARADIGME

Yu.P. Rybakov

RUDN University

6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Abstract. We discuss the statistical origin of quantum theoretical description and show that within the scope of the Mie–Einstein field approach, with particles being considered as lumps of some material field satisfying nonlinear equations, such a description appears to be natural and inevitable since it is impossible to specify initial conditions for the extended particle-soliton. Beside this, it is shown that on solitons' basis, the special stochastic representation of quantum mechanics can be constructed, the latter one being equivalent to the theory of nonlocal hidden variables.

Keywords: statistical description, soliton configurations, hidden parameters, stochastic representation of the wave function.