

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ И СОГЛАСОВАННЫЕ АНСАМБЛИ ТРАЕКТОРИЙ

*В. В. Кисиль*¹

Университет Лидса, Лидс, Великобритания

Мы используем некоторые изначальные идеи де Бройля, Шредингера, Дирака и Фейнмана для уточнения ансамблевой интерпретации волновой функции в квантовой механике. Для этого рассматриваются согласованные ансамбли квантовых траекторий в пространстве-времени. Условие согласования основано на фазах, пропорциональных классическому действию, знакомых всем из интеграла по траекториям Фейнмана. Таким образом, предложенная интерпретация в существенном использует только проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя понятия и методы волновой механики. Как и другие ансамблевые интерпретации, данный подход позволяет избежать всех парадоксов, связанных с редукцией волновой функции в процессе измерений. Еще одно следствие, упоминаемое нами, — это ожидаемая бесплодность всех попыток произвести квантовые вычисления или квантовое шифрование на методах, предполагающих, что состояние отдельного кубита описывается полной волновой функцией.

We re-use some original ideas of de Broglie, Schrödinger, Dirac and Feynman to revise the ensemble interpretation of wave function in quantum mechanics. To this end, we introduce coherence (auto-concordance) of ensembles of quantum trajectories in the space-time. The coherence condition accounts for phases proportional to classical action, which are in foundation of the Feynman path integral technique. Therefore, our interpretation is entirely based on well-known and tested concepts and methods of wave mechanics. Similarly to other ensemble interpretations, our approach allows us to avoid all problems and paradoxes related to wave function collapse during a measurement process. Another consequence is that no quantum computation or quantum cryptography method will ever work if it assumes that a particular q-bit represents the entire wave function.

PACS: 03.67.Dd; 03.65.Ca

Прошлое науки — не кладбище с надгробными плитами над навеки похороненными идеями, а собрание недостроенных архитектурных ансамблей, многие из которых не были закончены не из-за несовершенства замысла, а из-за технической или экономической невостребованности.

А. А. Любищев

ВВЕДЕНИЕ

Недавно прошло столетие с публикации нескольких коротких работ де Бройля, которые открыли эру *волновой механики* — одного из наименований *квантовой* теории. Эта двойственность названий отражает предложенный де Бройлем корпускулярно-

¹E-mail: V.Kisil@leeds.ac.uk; Домашняя страничка: <http://v-v-kisil.scienceontheweb.net/>. В отъезде из Одесского университета.

волновой дуализм материи — фундаментальное свойство, прочно утвердившееся с тех пор. Декларация волновых свойств материи была важным рубежом и послужила дальнейшему беспрецедентно быстрому развитию теории, в частности, стимулировала появление *волнового* уравнения Шредингера [1]. Однако, перечитывая работы де Бройля по юбилейному поводу, можно заметить некоторые идеи, которые были оставлены в прошлом даже самим их автором. Тем не менее эти догадки заслуживают быть вновь рассмотренными и, возможно, реабилитированными.

Фундаментальный математический аппарат квантовой механики — теория операторов в гильбертовых пространствах — хорошо разработан математически и занял прочное место в физических исследованиях. Однако остается очень спорный вопрос интерпретации волновой функции и связанных с этим различных допущений вроде *редукции волновой функции* в процессе измерений. Сопутствующие этому сложности продолжают быть предметом незатихающих (хотя и немного периферийных теперь) обсуждений. Эта неустроенность временами порождает весьма экзотические построения вроде многомировой модели [2]. Так как такое лечение хуже самой болезни, то ответная реакция низводит вопросы интерпретации до второстепенных, дескать «не болтай, а вычисляй!» (“shut up and calculate!” [3]). Например, в учебнике [4] основные 11 глав посвящены математическому аппарату квантовой механики и только заключительная двенадцатая глава касается вопросов, связанных с измерениями, локальностью, причинностью, парадоксом Эйнштейна–Подольского–Розена, котом Шредингера и другими весьма неоднозначными темами.

Одним из способов избежать проблем редукции волновой функции является ее *ансамблевая интерпретация*, которую часто отсылают к Эйнштейну [5] или другим физикам, см. [6]. Обратимся, однако, к заключительному пассажиру статьи де Бройля 1922 г. [7, 8]: «С точки зрения квантов света явления интерференции кажутся связанными с существованием совокупностей атомов света, движущихся не независимо, а когерентно. Отсюда естественно предположить, что если когда-нибудь теория квантов света сможет объяснить интерференцию, она должна будет ввести в рассмотрение подобные объединения квантов». Легко заметить, что де Бройль связывает волновые свойства материи с групповым поведением согласованного (когерентного) ансамбля частиц еще за несколько лет до появления волновой функции. Такая ансамблевая (или *статистическая*) интерпретация в дальнейшем многократно переоткрывалась и переосмысливалась многими авторами, см. [9, 10] и упомянутые ранее обзоры [5, 6]. Однако предлагаемые формулировки зачастую оставляли пространство для неустанной критики с позиции копенгагенской интерпретации квантовой механики, в частности, и такими видными физиками, как В. А. Фок [11–13]. Наиболее уязвимым звеном оставалось само понятие квантового ансамбля и то, каким образом определялась его согласованность. Этот момент мы и рассмотрим ниже.

1. КВАНТОВЫЕ АНСАМБЛИ

Начнем прояснять имеющиеся затруднения, используя некоторые наблюдения из работ первооткрывателей:

1. Изначально в [14] де Бройль выводил волновые свойства квантов из наличия у каждого из них *внутреннего периодического процесса*. Этот же мотив с индивидуальными «часами» использовался Фейнманом в популярном изложении интегралов

по траекториям [15]. Дополнительное рассмотрение [16, 17] показывает, что именно *периодичность* функции $\exp(i\omega t)$ лежит в основе квантовой механики, а вовсе не некоторая «некоммутативность квантовых наблюдаемых», как было постулировано Дираком в [18].

2. В той же работе [14] де Бройль рассматривает *фиктивную* пространственную волну, такую, что в каждой точке пространства-времени ее фаза совпадает с фазой внутреннего периодического процесса каждого кванта, находящегося в этой точке. Это предположение *стабильности* (также можно сказать *согласованности* или *когерентности*) позволило де Бройлю впервые вывести правила квантования Бора, которые до этого приходилось постулировать.

3. Из предыдущего правила согласования фиктивной волны и внутреннего периодического процесса мы также можем заключить, что два кванта из согласованного ансамбля, прибывшие в одну пространственно-временную точку разными траекториями, должны иметь там одну и ту же фазу. Сходным образом два кванта, расходящиеся из одной точки по разным траекториям, начинают свои пути с общей для них фазой.

4. Идеи де Бройля были использованы Шредингером в [1] для обоснования волнового уравнения, носящего его имя. Основываясь на оптико-механической аналогии Гамильтона [8, 19], которая связывает классическую механику с геометрической оптикой лучей¹, Шредингер предположил, что квантовая механика аналогична более физической волновой оптике. Обсуждение этой аналогии в [1] подсказывает, что частота внутреннего периодического процесса кванта является функцией времени и ее производная по времени пропорциональна лагранжиану частицы.

5. Если частота колебаний пропорциональна лагранжиану L , то изменение фазы вдоль траектории γ будет пропорционально функции действия $S = \int_{\gamma} L dt$. В явном виде это уже высказано Дираком в работе [21] и впоследствии стало основой метода интегралов по траекториям Фейнмана [15, 22]. Хорошо известно, что первоначально подход Фейнмана был холодно встречен сторонниками копенгагенской интерпретации из-за использования запрещенного понятия «траектория». Неприятие было ослаблено только в рамках соглашения, что отдельные траектории являются лишь вычислительными фикциями и «в действительности» каждый квант путешествует по ним всем одновременно. Конечно, в академическом издании [22] не могло быть и речи, что фаза S/\hbar может быть приписана какому-либо внутреннему периодическому процессу отдельного кванта, проходящего конкретную траекторию. Тем не менее именно такой образ создают «вымышленные часы, запускаемые на время, пока летит фотон» в популярном изложении [15], которое было не так сильно сковано официальными рамками.

Введенное в п. 3 условие согласования квантового ансамбля является достаточно жестким. В реальной ситуации точное совпадение фаз может быть ослаблено до всего лишь их *достаточной* близости. Соответственно, можно ввести меру рассо-

¹ Для нас, обучавшихся по прекрасной книге Арнольда [20, § 46], может быть несколько неожиданным, что Шредингер называет вывод формализма Гамильтона из оптической аналогии «почти забытым в наше время». Однако мы не будем этому сильно удивляться, если заметим, что обоснование волнового уравнения, сделанное Шредингером, сейчас также отсутствует в учебниках — оно или сразу постулируется, или обосновывается такими же постулируемыми «правилами квантования».

гласования ансамбля, суммируя все различия фаз в точках пересечения траекторий. Также возможно рассмотреть взаимодействие квантов при столкновениях, которое будет приводить к увеличению согласованности всего ансамбля подобно движению физического тела к термодинамическому равновесию.

Таким образом, мы приходим к определению:

Квантовый ансамбль состоит из траекторий, проходящих через некоторую область пространства-времени. Каждой точке траектории соответствует фаза, пропорциональная функции действия. В достаточно *согласованном ансамбле* фазы любых двух траекторий, встречающихся в какой-либо точке пространства-времени, должны быть достаточно близки.

Хорошо известно, что интегрирование по траекториям позволяет вычислить волновую функцию квантового объекта, совпадающую с результатами квантования по Шредингеру или Гейзенбергу–Дираку [22, § 3.4]. Более того, подавляющее число траекторий взаимно уничтожает свои вклады в волновую функцию потому, что они прибывают в одну и ту же точку пространства-времени с практически противоположными фазами. Таким образом, та же самая волновая функция получается, если такие взаимно компенсирующие пути будут совместно исключены из рассмотрения. Оставшиеся пути в каждой точке будут иметь фазы, близкие к фазе результирующей волновой функции, и поэтому ансамбль будет достаточно согласован. Это рассуждение показывает, что *для любой волновой функции существует достаточно согласованный ансамбль, который производит эту волновую функцию суммированием по Фейнману.*

Противники ансамблевой интерпретации часто приводят пример *сильно разреженных* ансамблей. Например, для интерференции электрона на двух щелях обсуждают прохождение электронов «по одному»: источник не испускает очередной электрон до тех пор, пока не будет поглощен предыдущий [23]. Действительно, в этом случае отсутствуют пересечения путей квантов между собой и нет необходимости (да и возможности) согласовывать их напрямую. Однако в таком опыте всегда присутствует экспериментальная установка, в частности, ее часть, вызывающая интерференцию. Ее мировая линия пересекает траектории всех квантов и потому должна быть частью условия согласования ансамбля. Концептуальная возможность возникновения волновых эффектов для разреженных ансамблей, помещенных в такой экспериментальный контекст, была показана в работах [24–26].

2. ОБСУЖДЕНИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Корпускулярно-волновой дуализм материи остается камнем преткновения различных подходов к квантовой механике. Среди предлагаемых решений можно найти достаточно радикальные, например, вообще отказать корпускулярным свойствам света в физическом существовании и объявить «фотон» неудачной фикцией вроде «эфира» XIX в. [27].

В этой заметке мы предложили наполнить ансамблевую интерпретацию волновой функции некоторыми изначальными догадками де Бройля и усилить их более поздними методами из фейнмановского интеграла по путям. Перечислим некоторые непосредственные следствия предложенного подхода.

1. Наблюдение волновых явлений у квантовых (дискретных) объектов всегда носит статистический характер, и потому оно есть совокупное свойство согласованных ансамблей. Волновые свойства никак не могут быть проявлены одной частицей или группой совсем никак не согласованных частиц. Сходным образом, скорость одной молекулы газа не содержит информации о тепловом распределении в рассматриваемом объеме, хотя такая молекула и вносит свой вклад в общую картину. Эта аналогия может оказаться не такой уж и поверхностной, если взглянуть на уравнение Шредингера как на уравнение теплопроводности с комплексным временем.

2. Волновая функция соответствует согласованному ансамблю квантовых объектов, а именно ее амплитуда определяется плотностью пространственно-временной локализации объектов. Фаза волновой функции совпадает с фазой кванта в данной точке расширенного конфигурационного пространства и, по сути, совпадает с «фиктивной волной» де Бройля из [14].

3. Акт наблюдения (измерения) одного квантового объекта выявляет его отдельные физические характеристики, например, пространственно-временную локализацию. Это может привести к незначительному возмущению в ансамбле, но никакой полной редукции волновой функции (соответствующей всему ансамблю) при единичном измерении не происходит.

4. Из интерпретации исчезают такие парадоксы, как мгновенная передача информации в эксперименте Эйнштейна–Подольского–Розена и дилемма «жив ли кот Шредингера или он скорее мертв»?

5. Физический смысл имеют фазы (например, как соответствующие каким-то внутренним периодическим процессам) отдельных квантов, продвигающихся своим путем. Напротив, волновая функция является всего лишь интегральным показателем всех таких фаз в согласованном ансамбле. Поэтому нет нужды вводить некий физический носитель вроде поля, который представляет волновую функцию (см. упомянутую выше аналогию с тепловым распределением в физическом теле).

6. Также нет необходимости в каких-либо дополнительных «пилотных волнах», чтобы сделать обратный переход от волновой функции к индивидуальной траектории отдельного кванта. Такие конструкции «двойных решений» [28] потребовались де Бройлю после того, как он был вынужден отказаться от своих первоначальных идей под давлением сторонников копенгагенской интерпретации [29, гл. 6; 8, гл. I.6].

Легко заметить, что все предложенные рассуждения базируются на традиционных методах квантовой механики: волновом уравнении Шредингера и интеграле по траекториям Фейнмана, подсвеченных некоторыми ранними предложениями де Бройля. Это избавляет нас от необходимости делать здесь тщательную проверку на соответствие нашей интерпретации устоявшемуся математическому формализму волновой механики.

Заметим также, что в главном наше рассмотрение переключается с подходом А. Хренникова к ансамблевой интерпретации, см. [5]: вначале ввести некоторую базовую «доквантовую» теорию, обладающую реализмом и детерминизмом, а потом получить вероятностное описание процесса путем редукции к волновой функции. Однако мы (в отличие от [5]) не вводим какой-либо новой доквантовой теории, а вместо этого пытаемся пересобрать конструкцию из элементов, уже давно присутствующих в теме.

Несмотря на то, что мы обсуждаем здесь «всего лишь» вопросы интерпретации, это имеет непосредственное практическое значение. Сейчас активно исследуются возможности квантового шифрования или квантовых вычислений, которые существенно базируются на предположении, что единичный квантовый объект (кубит) способен вместить в себя всю полноту волновой функции. На эти исследования, учитывая их анонсированные приложения в финансовых и военных сферах, были уже (вы)брошены огромные ресурсы. Поэтому отсутствие каких-либо осязаемых результатов, воплощенных в практических устройствах, уже можно засчитать *экспериментальной проверкой* различных теоретических возражений, высказанных ранее [26,30–32]. В частности, такие технологии в принципе не будут работоспособны, если окажется, что волновая функция действительно является только совокупным свойством целого согласованного ансамбля. Поэтому отсутствие функционального квантового компьютера косвенно подтверждает ансамблевую интерпретацию подобно тому, как закон сохранения энергии выводится из многочисленных (зачастую остроумных, но) бесплодных попыток построить вечный двигатель.

Заключительное наблюдение, которое мы можем сделать из истории с идеями де Бройля, расширяет список причин научного недостроя, указанных в эпиграфе: некоторые элементы не находят подходящего им места еще и по вполне субъективным обстоятельствам.

Благодарности. Автор выражает благодарность анонимному рецензенту за полезные замечания, направленные на улучшение текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schrödinger E.* An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules // *Phys. Rev.* II. Ser. 1926. V. 28. P. 1049.
2. *Everett H.* “Relative State” Formulation of Quantum Mechanics // *Rev. Mod. Phys.* 1957. V. 29. P. 454.
3. *Mermin N.D.* Could Feynman Have Said This? // *Phys. Today.* 2004. V. 57. P. 10; https://pubs.aip.org/physicstoday/article-pdf/57/5/10/8317097/10_1_online.pdf.
4. *Griffiths D.J., Schroeter D.F.* Introduction to Quantum Mechanics. 3rd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2018.
5. *Khrennikov A.* Växjö Interpretation of Wave Function // *AIP Conf. Proc.* 2012. V. 1508. P. 244; arXiv:1210.2390.
6. *Печенкин А. А.* Ансамблевые интерпретации квантовой механики в США и СССР // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 7. Философия.* 2004. Т. 6. С. 103.
7. *de Broglie L.* Sur les Interférences et la Théorie des Quanta de Lumière // *Compt. Rend.* 1922. V. 1975. P. 811.
8. *де Бройль Л.* Избранные научные труды. Т. 1. Становление квантовой физики. Работы 1921–1934 годов. М.: Логос, 2010.
9. *Блохинцев Д. И.* Критика идеалистического понимания квантовой теории // *УФН.* 1951. Т. 45. С. 195.
10. *Ballentine L.E.* The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics // *Rev. Mod. Phys.* 1970. V. 42. P. 358.
11. *Фок В. А.* К статье Никольского «Принципы квантовой механики» // *УФН.* 1937. Т. 17. С. 552.

12. Фок В. А. О так называемых ансамблях в квантовой механике // Вопр. философии. 1952. Т. 4. С. 170.
13. Фок В. А. Об интерпретации квантовой механики // УФН. 1957. Т. 62. С. 461.
14. *de Broglie L.* Ondes et Quanta // Compt. Rend. 1923. V. 177. P. 507.
15. Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. М.: Наука, 1988. С. 144.
16. Кисиль В. В. Является ли коммутация наблюдаемых главным отличием классической механики от квантовой? // Изв. Коми науч. центра УрО РАН. Физ.-мат. науки. 2012. Т. 3, № 11. С. 4; arXiv:1204.1858.
17. *Kisil V. V.* Symmetry, Geometry and Quantization with Hypercomplex Numbers // Geom. Integr. 2017. V. 18. P. 11–76; arXiv:1611.05650.
18. *Dirac P. A. M.* On the Theory of Quantum Mechanics // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1926. V. 112. P. 661.
19. *de Broglie L.* Sur le Parallélisme entre la Dynamique du Point Matériel et l'Optique Géométrique // J. Phys. Rad. 1926. V. 7. P. 1.
20. Арнольд В. И. Математические методы классической механики. 3-е изд. М.: Наука, 1989.
21. *Dirac P. A. M.* The Lagrangian in Quantum Mechanics // Phys. Z. Sowjetunion. 1933. V. 3. P. 64.
22. *Feynman R. P., Hibbs A. R.* Quantum Mechanics and Path Integral. New York: McGraw-Hill Book Comp., 1965.
23. *Aspect A., Grangier P.* Wave-Particle Duality for Single Photons // Hyperfine Interact. 1987. V. 37. P. 1.
24. *Kisil V. V.* Two Slits Interference Is Compatible with Particles' Trajectories // Quantum Theory: Reconsideration of Foundations. Mathematical Modelling in Physics, Engineering and Cognitive Science. V. 2. Växjö Univ. Press, 2002. P. 215–226; arXiv:quant-ph/0111094.
25. *Khrennikov A. Y., Volovich Y. I.* Numerical Experiment on Interference for Macroscopic Particles. arXiv:quant-ph/0111159.
26. *Hodgson D. R., Kisil V. V.* Deterministic Actions on Stochastic Ensembles of Particles Can Replicate Wavelike Behaviour of Quantum Mechanics: Does It Matter? // Algorithms as a Basis of Modern Applied Mathematics. Cham: Springer, 2021. P. 293–304; arXiv:1811.05240.
27. *Lamb W. E.* Anti-Photon // Appl. Phys. B. 1995. V. 60. P. 77.
28. *de Broglie L.* The Reinterpretation of Wave Mechanics // Found. Phys. 1970. V. 1. P. 5.
29. *Lochak G.* Louis de Broglie. Un Prince de la Science. Flammarion, 1999.
30. *Kisil V. V.* Computation and Dynamics: Classical and Quantum // AIP Conf. Proc. 2010. V. 1232. P. 306; arXiv:0909.1594.
31. *Dyakonov M. I.* State of the Art and Prospects for Quantum Computing // Future Trends in Microelectronics. Wiley-Blackwell, 2013. P. 266–285; arXiv:1212.3562.
32. Дьяконов М. И. Будет ли у нас когда-нибудь квантовый компьютер? В защиту науки // Бюл. Комиссии РАН по борьбе с лженаукой и фальсификацией научных исследований. № 21. М.: ПРОБЕЛ-2000, 2018. С. 90–99.