

ВОЛНЫ ВЕРОЯТНОСТИ В СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

С.В. Демин

In double-slit experiment in random-walk of the macroparticles waves of probability are discovered. A preferred values of energy of these particles corresponds to them. Describing these phenomenas, author tries to apply laws of quantum mechanics, replacing constant \hbar by the parameter, which is a characteristic of the physical system.

1. Введение

В последние годы в физике активизировалось обсуждение проблем интерпретации квантовой механики. Способствовало этому экспериментальное подтверждение предсказанных еще в первой половине прошлого века парадоксов, из которых, быть может, наиболее известен парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена [1]. Из множества современных работ, посвященных этой теме, можно привести, например, статью [2]. Зарегистрированные в недавних экспериментах эффекты противоречат и постулатам теории относительности, и обыденному здравому смыслу, что проявляется, в частности, в нарушении принципа причинности¹. Однако считается, что это противоречие, по крайней мере, не выходит за рамки законов микромира, несмотря на макроскопический характер наблюдаемых эффектов, и что сверхсветовая передача сигналов, а также передача сигналов обратно во времени с помощью квантовых корреляций невозможна [3]. По мнению большинства физиков, способностями к такому «сверхъестественному общению» наделены только микрочастицы, и эти их способности не могут быть использованы в создаваемых нами технических устройствах.

Парадоксы, иллюстрирующие проявления нелокальности² через регистрацию неклассических (квантовых) корреляций пространственно-временных [5,6], вытекают из ортодоксальной интерпретации квантовой механики. Именно поэтому многие пытаются решить возникшие проблемы, предлагая

© 2001 С.В. Демин

E-mail: asup_man@xl.ru

¹Будущее не может влиять на прошлое.

²Нелокальность - влияние двух удаленных измерительных приборов друг на друга, обычно связывается с нарушением неравенств Белла [4].

обратиться к альтернативным интерпретациям. Однако ни теоретическая дискуссия наподобие той, что велась между Эйнштейном и Бором, ни экспериментальное подтверждение в общем-то давно известных парадоксов, как видно, не в состоянии существенно повлиять на ситуацию, сложившуюся на сегодня в физике. Пожалуй, к каким-либо кардинальным изменениям в этой науке могло бы привести появление новых опытных данных, не вписывающихся в устоявшиеся физические концепции. Возможно, описанные в статье эксперименты указывают на ту область, в которой следует искать такие данные.

Толчком к опытам, которые были начаты автором статьи много лет назад, послужил крамольный, с точки зрения ортодоксальной физики, вопрос: нарушается ли принцип макроскопической причинности? Влияет ли будущее состояние макрообъекта при каких-то условиях на его состояние в прошлом? Именно результаты опытов, которые можно было рассматривать в качестве утвердительного ответа на этот вопрос ³, заставили автора статьи искать у макрообъектов свойства, напоминающие квантово-волновые свойства микрочастиц, что привело к наблюдению явлений, подобных интерференции в двухщелевом эксперименте, а также к регистрации «дискретных» (или, правильнее, предпочтительных?) энергетических состояний макросистемы, соответствующих наблюдаемым «интерференционным» явлениям.

2. Постановка задачи

Обнаружить закономерности, подобные квантово-механическим, в движении макрообъектов проще всего, изучая случайные процессы. К этому выводу приводят элементарные рассуждения. Во-первых, волновые свойства частиц предполагают либо принципиальное отсутствие траектории их движения (что трудно себе наглядно представить, но на чем настаивает большинство физиков), либо хоть какую-то ее неопределенность, имеющую место, например, при случайном движении. Во-вторых, чтобы нарушения принципа причинности, которые могут возникать в силу временной нелокальности протекающих процессов, не приводили к неразрешимым логическим парадоксам, всякое такое нарушение должно находить разумное объяснение. Допустим, причина некоего явления находится в будущем. Если это явление можно рассматривать как флуктуацию в каком-либо стохастическом процессе, то подобное объяснение вполне удовлетворяет и требованию разумности, и классическому пониманию реальности. Правда, в этом случае появляются противоречия с некоторыми общепринятыми положениями устоявшейся научной парадигмы, касающимися повторяемости результатов и независимости их от времени и места проведения опыта. Но в этой статье мы лишь слегка коснемся этого большого вопроса.

Вообще говоря, строго детерминированное движение, которое описывается законами классической механики, является идеализацией, и в природе в любом реальном процессе можно найти элементы случайности. Для эксперимента по поиску подобия квантовых закономерностей в стохастических процессах было

³В данной статье содержание этих опытов не описано.

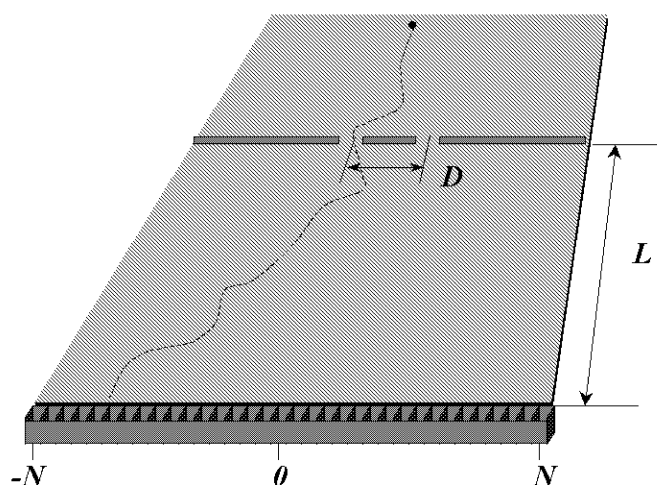


Рис. 1. Наклонная доска для исследования волновых явлений в стохастических процессах

выбрано блуждающее движение шариков по наклонной плоскости – некий аналог известной доски Гальтона (см. рис.1). Шарик, поверхность которого не является идеально сферической, скатывался по плоскости, наклоненной под определенным углом, по случайной траектории, расположенной внутри некоторого конуса, после чего попадали в расположенные в нижней части плоскости ячейки. При этом распределение шариков по ячейкам, как известно, должно подчиняться закону Гаусса (см. рис.2). Характер случайных отклонений от теоретически рассчитанной кривой нормального распределения составил основной предмет изучения в данной работе.

3. Экспериментальные данные

Для моделирования явлений, подобных интерференционным, в средней части наклонной плоскости устанавливалось препятствие с двумя узкими отверстиями, через которые скатывающиеся шарик могли попадать на нижнюю половину плоскости (см. рис.1). Расстояние между отверстиями D в разных опытах составляло 32, 40 и 22 мм. В первом опыте через отверстия прошли 1860 шариков, во втором – 2561, в третьем – 9697. Распределение этих шариков по ячейкам аппроксимировалось нормальным распределением:

$$f_a(n) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(na-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где n – номер ячейки от $-N$ до N , σ – стандартное отклонение, a – ширина ячейки.

После этого были найдены разности между экспериментальными значениями и значениями, рассчитанными в результате аппроксимации (см. гист. F на рис.3 и 4):

$$F(n) = f_e(n) - f_a(n).$$

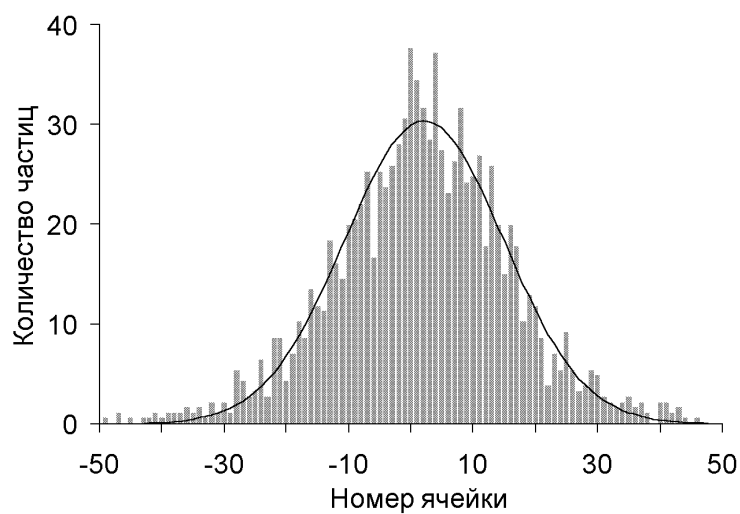


Рис. 2. Пример распределения частиц, скатившихся по наклонной доске. Сплошной линией показана аппроксимация распределением Гаусса.

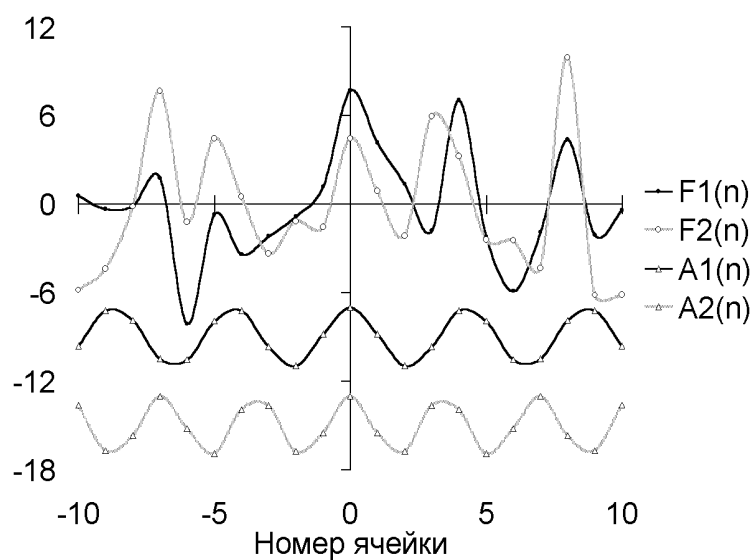


Рис. 3. Отклонение реального распределения от распределения Гаусса при расстоянии между отверстиями 32мм – $F1(n)$ и 40мм – $F2(n)$. Кривые $A1(n)$ и $A2(n)$ показывают теоретически рассчитанное положение максимумов для интерференции волн длиной 2мм.

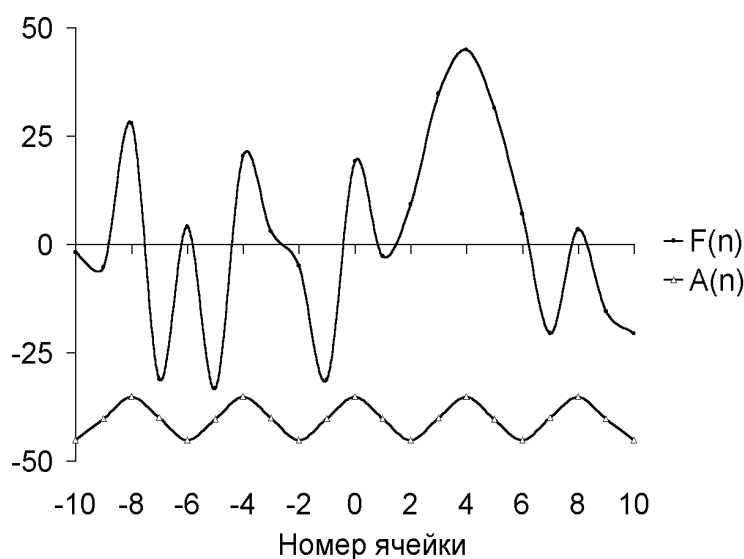


Рис. 4. Отклонение реального распределения от распределения Гаусса при расстоянии между отверстиями 22 мм во втором эксперименте – $F(n)$. Кривая $A(n)$ – теоретически рассчитанное положение максимумов для интерференции волн длиной 1,04 мм.

Поскольку полученные отклонения от нормального распределения выглядели более или менее периодическими, была сделана попытка оценить длину волны, которая при прохождении через соответствующие отверстия давала бы интерференционную картину с аналогичным положением максимумов и минимумов. Для этого к полученным рисункам были добавлены графики функций, положение экстремумов которых точно соответствует расчетному при интерференции волн той или иной длины. Амплитуда этих функций вычислялась по формуле (3).

$$A(n, \lambda) \sim \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{\left(na + \frac{D}{2} \right)^2 + L^2} - \sqrt{\left(na - \frac{D}{2} \right)^2 + L^2} \right) \right),$$

где λ – длина волны, n – номер ячейки от $-N$ до N , a – ширина ячейки, D – расстояние между щелями, L – расстояние от препятствия со щелями до ячеек.

Какое значение длины волны при этом выбрать, первоначально определялось простым подбором. Затем с целью подтверждения правильности сделанного выбора был вычислен коэффициент ковариации между функциями, моделирующими интерференцию при всевозможных длинах волн $A(n, \lambda)$, и функциями $F(n)$, рассчитанными из реальных гистограмм распределения. Зависимость полученного коэффициента ковариации от длины волны λ в разных опытах показана на рис.5. Для того чтобы оценить распределение кинетической энергии шариков, замерялось время их прохождения от одной отметки до другой. Зная расстояние между отметками и массу шариков, легко рассчитать их среднюю скорость и далее кинетическую энергию. На представленных на рис.6 и 7 гистограммах показано распределение количества шариков по их скорости при различной величине наклона плоскости.

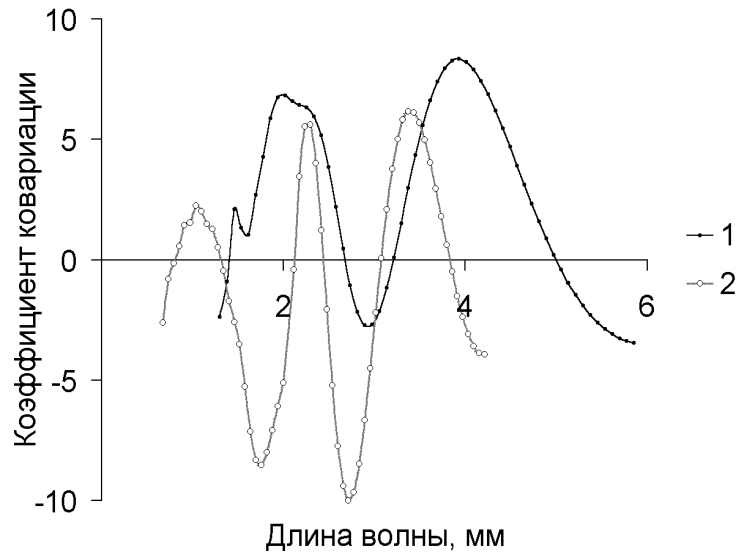


Рис. 5. Определение вероятной длины волны при двухщелевой интерференции по коэффициенту ковариации между экспериментально полученной и теоретически рассчитанной зависимостями. Данные по двум экспериментам. Линии сглажены.

4. Обсуждение

Даже беглый взгляд на представленные диаграммы вызывает желание спросить: а какова достоверность полученных результатов? И соответственно: а имеют ли место вообще эти результаты и есть ли предмет для разговора? Не стоило ли проявить большую аккуратность при постановке опытов или хотя бы просто увеличить количество измерений? Корректно ли вообще делать какие-либо выводы на такого рода материале, тем более выводы, претендующие на фундаментальность?

Возможно, в основе всей данной работы лежит ответ именно на этот вопрос.

Механика Ньютона прекрасно описывает движение макроскопических тел. Наивно ожидать, что результаты простейших экспериментов, подобных описанным выше, придут с ней в открытое противоречие. Такого рода противоречия наверняка были бы замечены много ранее. Следует, однако, заметить, что эта механика имеет дело исключительно с детерминистским аспектом движения. Даже описание случайных процессов в классической физике в конечном итоге сводится к строгому определению границ, в которые должна попасть та или иная физическая величина. Само выражение «погрешность измерения» говорит об отношении физиков ко всему тому, что происходит в мире за рамками этих строгих границ. Считается аксиомой то, что шум, сопровождающий любой эксперимент, не может нести в себе никакой полезной информации, и главная задача экспериментатора в том, чтобы избавиться от этого шума, произведя, например, достаточное количество измерений.

Эта работа написана для тех, кто готов заглянуть за кулисы законов Ньютона, зайти на территорию, которая всегда в науке считалась запретной. На самом деле, готовы ли мы представить себе законы природы, которые бы действовали

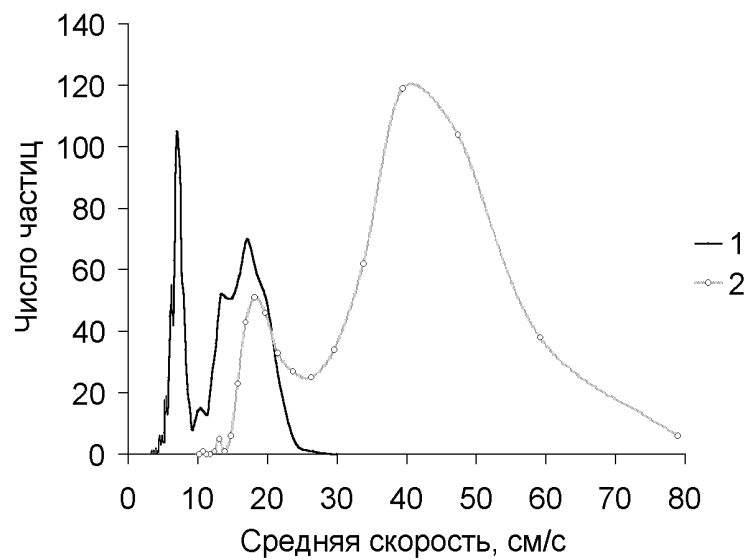


Рис. 6. Распределение частиц диаметром 2мм по скоростям в двух экспериментах с различной величиной наклона плоскости.

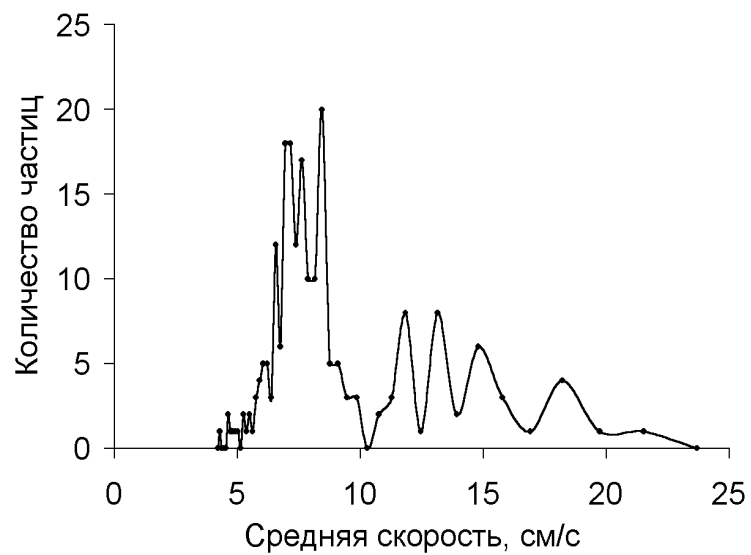


Рис. 7. Распределение количества частиц по скоростям при минимальном наклоне плоскости

исключительно на уровне погрешности измерений, сколько бы этих измерений ни было произведено. Такое допущение сразу приводит к необходимости признания макроскопической временной нелокальности протекающих физических процессов, потому что повторные измерения должны быть связаны между собой таким образом, чтобы при их суммировании достоверность результата не могла бы выходить за некий предел. Многим это покажется противоречащим и опыту, и здравому смыслу. С другой стороны, нелокальности и нарушения принципа причинности не противоречат квантовым законам, которые мы пытаемся применить к макроскопическим процессам.

Разумеется, речь здесь может идти лишь о внешнем сходстве с известными законами квантовой механики или, в крайнем случае, о разных проявлениях неких общих закономерностей. Прежде всего квантовые законы подразумевают наличие волновых свойств у частиц. Применение известной формулы (1), связывающей волновые характеристики частицы с ее энергией, дает для макротел бесконечно малые значения длин волн.

$$E = \hbar\omega. \quad (1)$$

Это объясняется тем, что слишком мало значение постоянной Планка, входящей в данную формулу. Подобие квантовым закономерностям, которое здесь будет предложено, состоит в том, чтобы, сохранив общий вид зависимостей, аналогичных (1), поставить на место постоянной \hbar некий произвольный параметр z , который будет являться квантовой характеристикой системы взаимодействующих макротел. Тогда, используя соотношение де Бройля, можно записать:

$$\lambda = \frac{z}{mv}.$$

После этого остается обнаружить проявления волновых свойств макротел по классическим тестам на дифракцию или интерференцию и, сопоставив вычисленную длину волны со значениями импульса использованных в эксперименте объектов, оценить величину параметра z .

Как же выглядят, с этой точки зрения, приведенные выше экспериментальные данные? Прежде всего хочется сказать, что, как и ожидалось, никакой принципиальной разницы в результатах опытов со ста, тысячу или десятью тысячами измерений замечено не было. В двухщелевом эксперименте, с одной стороны, с первых же измерений наблюдались отклонения от нормального распределения, которые выглядели более или менее периодическими, напоминая картину интерференционных максимумов и минимумов, а с другой стороны, по мере накопления данных эти отклонения постепенно уменьшались, впрочем, так окончательно и не исчезая. Некоторые из симметричных локальных экстремумов на гистограммах были очень устойчивы и соответствовали довольно значительным по величине отклонениям от значений, полученных в результате аппроксимации экспериментальной гистограммы колоколообразной кривой нормального распределения. При изменении расстояния между щелями экстремумы первого и второго порядка в основном вели себя именно так, как и положено по законам интерференции: чем ближе щели, тем больше расстояние

между максимумами. В этой статье приводятся не самые убедительные в этом отношении данные, потому что ее объем не позволяет привести все полученные результаты.

Трудно делать какие-либо выводы на основании качественных результатов, представленных на рис.3 и 4. Можно ли считать относительную периодичность следования пиков на гистограммах достаточно убедительным свидетельством того, что мы имеем дело с неким подобием интерференционных явлений? Скорее всего нет.

Иное отношение к этим результатам складывается при взгляде на зависимость коэффициента ковариации между моделирующей интерференцию функцией $A(n, \lambda)$ и экспериментальной кривой $F(n)$ от длины волны λ , по которой строилась моделирующая функция (см. рис.5). Можно предположить, что максимальные значения коэффициента ковариации соответствуют длинам волн различных макрочастиц, присутствующих в потоке. Тогда, исходя из формулы (1), следовало бы ожидать соответствующего «квантования» значений энергии этих частиц.

Пожалуй, именно построение распределения скатывающихся частиц по их средней скорости дало наиболее неожиданные результаты. Внешне движение шариков выглядело совершенно хаотичным, и трудно было себе представить, по какой причине их средняя скорость могла бы иметь два ярко выраженных предпочтительных значения (см. рис.6). И даже, если предположить, что это явилось следствием того, что форма шариков была более близка к эллипсоиду, чем к идеальному шару, то и в этом случае остается совершенно непонятным, почему наиболее гладкая кривая получилась при наибольшей скорости. Кажется бы, уменьшение угла наклона плоскости, приводящее к тому, что траектория движения шариков становилась менее прямолинейной и, соответственно, более случайной, а их скорость в любой точке траектории могла измениться произвольным образом, должно было размыть кривую распределения их по скоростям. В действительности при этом на кривой распределения появились дополнительные пики, которые при достаточно большом числе измерений (1500 частиц) стали совершенно отчетливыми и, вне всякого сомнения, достоверными, далеко выходящими за пределы случайных отклонений (см. гист.1 на рис.6). Еще более ярко это выразилось при минимально возможном наклоне плоскости (см. рис.7).

С другой стороны, такое поведение физической системы хорошо укладывается в первоначально высказанное предположение о том, что квантовые закономерности проявляются в макромире исключительно в стохастических процессах. Чем больше элемент случайности, тем ближе поведение системы к тому, что мы привыкли наблюдать в микромире. К этому позитивному взгляду на полученные результаты можно добавить и попытку оценить величину параметра z , стоящего в формуле (5). В приведенных опытах использовались шарики радиусом 1 мм и массой 6 мг. С учетом этого был рассчитан параметр z при различных длинах волн и предположительно соответствующих им скоростях частиц. В таблице 1 приведены результаты этих расчетов.

Видно, что параметр, стоящий на месте постоянной Планка, действитель-

Таблица 1.

Номер эксперимента	Длина волны, см (рис.5)	Скорость в пиках, см/с (рис.6)	Параметр z , г см/с ²
1	0,2	17,14	0,021
	0,4	8,28	0,020
2	0,104	42	0,026
	0,227	18	0,025
	0,338	13	0,026

но может быть характеристикой физической системы, в которой происходят случайные процессы. То, что его величина получилась примерно одинаковой для двух длин волн, зарегистрированных в первом опыте, и трех длин волн во втором, говорит в пользу того, что сопоставление предпочтительных значений импульса частицы с этими длинами волн не является случайным.

5. Заключение

Простота поставленных опытов позволяет надеяться на то, что выводы, которые из них следуют, сделаны не на пустом месте и не являются следствием тех или иных недостатков, которые, конечно же, имели место в силу слабого материального обеспечения экспериментов. После просмотра всего представленного материала остается впечатление, что, несмотря на маловероятность следующих из него выводов, вероятность того, что он отражает реально существующие закономерности, все же больше вероятности того, что в его основе лежат многократно повторенные совпадения и незамеченные ошибки.

Другая сторона вопроса состоит в том, что волновые свойства макроскопического объекта, который движется пусть по случайной, но все же совершенно определенной траектории, должны иметь какой-то физический смысл. Разумеется, можно в очередной раз сказать, что подчиненность стохастического движения макротел некоторой абстрактной волновой функции является новым странным свойством мира, которое следует принимать как есть, не обращая внимания на то, можно ему дать наглядную интерпретацию или нет. Однако этот трюк, давший однажды положительные результаты, вряд ли удастся применить к макроскопическим процессам. Описывать законы движения никогда и никем не видимых элементарных частиц – это одно, а вводить нематериальную волновую функцию, которой непостижимым образом вдруг окажутся подчинены все случайности нашей обыденной жизни, – совсем другое.

Если позволить себе немного пофантазировать, то в качестве альтернативного подхода, основанного на том отношении к физической реальности, которому в свое время симпатизировал Эйнштейн, можно предложить модель мира, имеющего дополнительное временное измерение, в направлении которого не проис-

ходит свободного переноса вещества и энергии, а взаимодействие осуществляется только через волны вероятности. В рамках этой модели видимая траектория частицы представляет собой одну из проекций движения многомерного объекта на четырехмерную пространственно-временную область, в которой производится измерение. Можно сказать, что по другим возможным траекториям данная частица или, вернее, ее продолжение движется в пространствах, смещенных во времени относительно нашего пространства на тот или иной интервал. Все возможные пути частицы, описываемые волновой функцией, таким образом, становятся реальными, существующими в скрытых или ненаблюдаемых измерениях.

И пусть это пока всего лишь фантастическая гипотеза. Главное, что она дает хоть сколько-нибудь приемлемое объяснение и описанным результатам, и тем, что остались за рамками данной статьи, например, противоречащей здравому смыслу реакции физической системы на воздействие, которое еще только произойдет через пару часов. Отбросить эти результаты как недостоверные и случайные проще всего, но гораздо труднее найти путь к истине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. // *Phys. Rev.* 1935. V.47, P.777; УФН. 1936. V.16. P.440.
2. Widom A., Srivastava Y.N., Sassaroli E. *Correlation between future and past photon events.* // *Phys. Lett. A.* 1995. V.203, N.5–6. P.255–259.
3. Scherer H., Busch P. *Problem of signal transmission via quantum correlation and Einstein incompleteness in quantum mechanics.* // *Phys. Rev. A.* 1993. V.47, N.3. P.1647–1651.
4. Bell J.S. // *Physics.* 1964. V.1. P.195.
5. Lamoreaux S.K. *Review of the experimental tests of quantum mechanics.* // *Int. J. Mod. Phys. A.* 1992. V.7, N.27. P.6691–6762.
6. Shih Y.H., Sergienko A.V., Rubin M.H. *Einstein-Podolsky-Rosen state for space-time variables in a two-photon interference experiment.* // *Phys. Rev. A.* 1993. V.47, N.2. P.1288–1293.