
Физика

УДК 53(093)

Поиск Луи де Бройлем физического смысла корпускулярно-волнового дуализма

А. Ф. Смык

*Кафедра физики
Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)
Ленинградский проспект, д. 64, Москва, 125319, Россия*

Открыв в 1923 г. фундаментальный принцип корпускулярно-волнового дуализма материи, лежащий в основании квантовой механики, Л. де Бройль на протяжении долгого времени занимался поиском физического смысла открытого им принципа. Статья посвящена отдельным вопросам теории Л. де Бройля, получившей название теории двойного решения, в которой сделаны попытки связать движение частицы и ассоциированной с этим движением фазовой волны. Обращается внимание на дискуссию, возникшую после доклада де Бройля на V Сольвеевском конгрессе 1927 г., на затруднения теории и её историческое значение.

Ключевые слова: корпускулярно-волновой дуализм материи, Луи де Бройль, волны материи, теория двойного решения, теория волны-пилота, Сольвеевский конгресс, волна вероятности.

1. Введение

Открыв общий закон природы о том, что любые виды материи обладают как корпускулярными, так и волновыми свойствами, Луи де Бройль навсегда останется в истории физики как один из создателей волновой механики. Открытие де Бройлем фазовых волн послужило началом работы для Э. Шрёдингера над нерелятивистским волновым уравнением, которое описывало движение волн де Бройля, их изменение в пространстве и во времени с учётом силового поля. Л. де Бройль приветствовал работы Шрёдингера, применил его подход для написания релятивистского волнового уравнения, которое было опубликовано в 1926 г. Но, как писал сам де Бройль, «после работ Шрёдингера эта идея витала в воздухе, и почти одновременно со мной релятивистское уравнение было получено де Дондером, Клейном, Гордоном, Фоком и Кударом; в литературе оно обычно называется уравнением Клейна–Гордона» [1].

В течение 1926–1927 гг. Л. де Бройль пишет обзор, опираясь на достижения Шрёдингера, в котором излагает принципы новой волновой механики [2], а также развивает свою теорию. Он публикует её под названием «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения» в «Journal de Physique» [3]. Теория, над которой де Бройль работал в этот период, названа им самим как «Теория двойного решения». Она представляла собой «исследование по физическому истолкованию волновой механики» [1]. Дело в том, что де Бройль в предложенной Шрёдингером форме волновой механики был не согласен с представлением только волны, названной Шрёдингером волной ψ , без рассмотрения связанной с этой волной частицей. Де Бройль писал: «Когда я впервые пришёл к идеям волновой механики, то нисколько не сомневался в необходимости создания таким путём синтетической теории, в которой понятия волны и частицы сохранили бы свой обычный характер» [1]. Кроме того, де Бройля не удовлетворяла вероятностная интерпретация волны ψ , предложенная М. Борном. Открыв корпускулярно-волновой дуализм материи, Л. де Бройль продолжал искать ответ на вопрос, что же означает эта двойственность, как описать совместное сосуществование волн и частиц. Де Бройль неоднократно в своих работах ставил вопрос: «Но что же, в самом деле, означает эта двойственность? Это очень трудный вопрос, который ещё далёк от полного разъяснения» [4]. Сомнения в правильности интерпретации

квантовой теории прозвучали и в речи Л. де Бройля при вручении Нобелевской премии в 1929 г.: «Можно ли все ещё предполагать, что в каждый момент времени частица занимает в волне чётко определённое положение, и что волна при её распространении увлекает частицу подобно тому, как волна на воде увлекает плавающую пробку? Это те трудные вопросы, обсуждение которых завело бы нас в слишком далёкие области философии. Все, что я об этом скажу здесь, — это то, что сегодня имеется тенденция допускать, что невозможно постоянно приписывать частице точно определённое положение в волне» [5].

Работы Л. де Бройля, связанные с поиском физического смысла корпускулярно-волнового дуализма, относятся к двум временным периодам. Первый — с 1925 по 1927 гг. и второй, начиная с 1952 г. В данной статье рассмотрены ранние работы де Бройля, которые привели его к теории двойного решения и от развития которых после Сольвеевского конгресса в 1927 г. де Бройль полностью отказался. Весной 1927 г. де Бройль принял приглашение Х. Лоренца, председательствующего на первых Сольвеевских конгрессах, выступить с докладом о волновой механике на V Сольвеевском конгрессе. Как известно, доклад Л. де Бройля «Новая динамика кванта» [6] на этом конгрессе был посвящён изложению ранних работ самого автора и дальнейшему развитию его идей Шрёдингером и Борном, а также в нем была представлена новая теория волны-пилота, которая, по мнению автора, отвечала на главный вопрос волновой механики — что связывает между собой волны и корпускулы?

В данной статье проведено исследование материалов V Сольвеевского конгресса, которые связаны с докладом Л. де Бройля и последующими после него дискуссиями. Материалы конгресса, опубликованные в [7], опровергают некоторые установившиеся представления о теории Л. де Бройля, изложенные в многочисленных исследованиях, посвящённых истории квантовой механики. Например, М. Джеммер пишет, что «причинная интерпретация де Бройля фактически даже не обсуждалась на Конгрессе, если не считать нескольких замечаний Паули» [8]. Стенограмма дискуссий сразу после доклада де Бройля и по окончании всех заявленных докладов договорит об определённом интересе к новой теории «волны-пилота», предложенной Л. де Бройлем [7]. В дискуссии приняли участие Х. Лоренц, М. Борн, Э. Шрёдингер, В. Паули, П. Эренфест, Л. Бриллюэн. Она была продолжительной, и в последний день конгресса в общей дискуссии вновь последовало обсуждение корпускулярного и волнового описания движения фотона и электрона. В известных исторических исследованиях Д. Мехры [9] в разделе, посвящённом Сольвеевским конгрессам 1927 г. и 1930 г., о докладе Л. де Бройля автор пишет, опираясь на воспоминания самого де Бройля, а также приводит отзыв о теории волны-пилота, сделанный Паули в письме к Бору накануне конгресса. Паули писал, что предложенная теория — «интересная и вдохновляющая попытка», хотя он находит её «чуждой по духу и сомнительной», так как она поворачивает назад колесо истории [9, С. 1003]. В связи с этим возникают вопросы, на которые автор данной статьи пытается найти ответы. В чем состояла новизна и отличие теории волны-пилота от других теорий, существовавших к тому времени и описывающих поведение микробиъектов? С чем были связаны затруднения этой теории? Каково было отношение к теории со стороны ведущих физиков, участвовавших в V Сольвеевском конгрессе?

2. Новая форма динамики частиц

В 1923 г. в трёх небольших статьях «Волны и кванты», «Кванты света. Дифракция и интерференция», «Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма» [5, С. 193–201] Л. де Бройль изложил представления о корпускулярно-волновом дуализме материи, тем самым заложил основание для дальнейшего развития новой динамики частиц, которая получила название волновой механики. Исходной точкой для создания де Бройлем волновой механики было «желание связать с понятием частицы понятие периодичности, чтобы неразрывно связать движение частицы с распространением волны» [4]. Рассматривая свойство замедления

времени для движущегося наблюдателя из СТО, де Бройль пришёл к выводу, что с механическим движением частицы со скоростью v связано распространение волны, фазовая скорость которой равна $V = c^2/v$. Де Бройль пишет: «Я предположил, что частица аналогична маятнику, т.е. обладает внутренними часами, и что, будучи неразрывно связана с волной, она перемещается с этой волной таким образом, что остаётся постоянно в фазе с нею» [10].

Доклад де Бройля на Сольвеевском конгрессе начинается с изложения основных положений новой динамики, он рассматривает собственные работы, а также работы Э. Шрёдингера и М. Борна.

Новая динамика, которую первым предложил де Бройль, отличается от «старых динамик», к ним он относит и классическую механику Ньютона и релятивистскую механику Эйнштейна. Де Бройль показывает в докладе, что, несмотря на разделяющие их отличия, они исходят из одного принципа — принципа наименьшего действия. Из принципа наименьшего действия, выражаемого формулой

$\delta \int_{t_0}^{t_1} L(q_i, \dot{q}_i, t) dt = 0$, где L — функция Лагранжа, получается уравнение, позволяющее

определять движение частицы как функцию трёх начальных координат и трёх составляющих начальной скорости. Новая динамика, т.е. волновая механика свободной материальной точки, задаётся уравнением

$$\Delta u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{4\pi^2 \nu_0^2}{c^2} u,$$

«некоторые решения которого соответствуют прежним динамикам. Но существуют другие решения . . . они отвечают за возможные состояния движения, не предусмотренные прежними теориями» [5].

В отличие от механики Ньютона, в которой ускорения тел определялись силами, в новой динамике скорость частицы определяется градиентом фазы волны, ассоциированной с частицей:

$$W = h\nu = \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad \vec{p} = \frac{h\nu}{V} = -\text{grad } \varphi.$$

Де Бройль пишет: «Кажется необходимым изменить принцип инерции. Мы предлагаем на базе динамики свободной материальной точки выдвинуть следующий постулат: В каждой точке своей траектории свободное тело движется равномерно вдоль луча своей фазовой волны, т.е. (в изотропной среде) вдоль перпендикуляра к поверхностям равной фазы» [5].

В докладе де Бройль отмечает, что новая концепция механики приводит к новой статистической механике, которая позволяет объединить кинетическую теорию газов и теорию излучения абсолютно чёрного тела в единое учение.

Завершение новой концепции механики, предложенная де Бройлем, получила благодаря работам Э. Шрёдингера. Шрёдингер исходил из положения, утверждённого де Бройлем: «Новая динамика свободной материальной точки выступает по отношению к прежней динамике (включая динамику Эйнштейна) так же, как волновая оптика по отношению к геометрической оптике» [5, там же, с. 197]. В докладе на конгрессе де Бройль излагает основные достижения Шрёдингера в этом направлении. Фундаментальная идея Шрёдингера заключалась в следующем: новая механика должна начинаться с волновых уравнений. Уравнения были получены таким образом, что фаза волны в решении должна быть решением уравнения Якоби в приближении геометрической оптики ($\lambda \rightarrow 0$). Волны в этой механике представлены в виде

$$\psi = a \cos \frac{2\pi}{h} \varphi,$$

где амплитуда a является постоянной величиной.

В случае движения одной частицы в постоянном поле, задаваемом потенциальной функцией $F(x, y, z, t)$, Шрёдингер получил нерелятивистское волновое уравнение

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m_0}{h} (E - F)\psi = 0.$$

Шрёдингер предположил, что волновые функции должны быть конечными, однозначными и непрерывными, и получил набор функций для амплитуды, который представляет различные состояния атома. Де Бройль поднимает вопрос: поскольку «мистер Шрёдингер рассматривал непрерывные волны, т.е. волны, амплитуды которых не имеют особенностей. Как тогда можно представить материальную точку?» [6].

Частицу Шрёдингер рассматривает как группу волн с близкими частотами исходя из доказанного ранее де Бройлем равенства скорости движения частицы и групповой скорости фазовых волн. «Материальная точка тогда не будет реальным подобием точки, она будет занимать область пространства порядка величины её длины» — отвечает на свой поставленный вопрос де Бройль. В случае атома, имеющего те же размеры, что и длина волны, частицу определить нельзя, нельзя говорить о положении или скорости электрона в атоме. Далее в докладе де Бройль анализирует решение Шрёдингера для системы N частиц и обращает внимание на трудности концептуального плана: «Конфигурационное пространство сформировано с помощью координат точек, и, тем не менее, мистер Шрёдингер полагает, что в атомных системах материальные точки не имеют точно определяемого положения. Кажется немного парадоксальным создавать конфигурационное пространство с координатами точек, которые не существуют» [6]. Де Бройль указывает, что получено разными авторами релятивистское волновое уравнение новой механики, а также упоминает работу де Дондера, связывающую волновую механику с общей теорией относительности.

Далее де Бройль переходит к предложению Борна рассматривать новую динамику, которую Борн называет «квантовая динамика», как сплав механики и статистики. Борн, отвергая концепцию волнового пакета, предложил рассматривать волны ψ как статистическое представление явления. В качестве примера де Бройль рассматривает соударение электрона и атома: упругое, которое не изменяет внутреннего состояния атома, и неупругое, когда атом переходит из одного стабильного состояния в другое. «Идеи мистера Борна, кажется нам, содержат большую долю истины и рассмотрение, которое мы собираемся провести, покажет это», — заключает де Бройль в конце обзора известных работ.

Основная часть доклада де Бройля называется «Вероятностное толкование непрерывных волн ψ » и посвящена ответу на вопрос: Что связывает между собой волны и корпускулы? Он рассматривает сначала движение одиночного электрона в электромагнитном поле и записывает уравнение скорости частицы:

$$\vec{v} = -c^2 \frac{\text{grad } \varphi + e/c \vec{A}}{\partial\varphi/\partial t - e\gamma}. \quad (1)$$

Затем переходит к рассмотрению облака корпускул, одинаковых и без взаимодействия, и утверждает, что плотность облака позволяет определить вероятность присутствия частицы в объёме пространства:

$$\pi d\tau = K a^2 \left(\frac{\partial\varphi}{\partial t} - e\gamma \right) d\tau. \quad (2)$$

Для случая равномерного и прямолинейного движения частиц облако можно представить плоской волной, и частица имеет некоторую вероятность пребывать в любой точке облака. Де Бройль делает вывод: «Волна ψ появляется и как пилот-волна, и как волна вероятности» [6, там же, с. 18]. Де Бройль в докладе постулирует основные уравнения динамики волны-пилота, которые полностью определяют движение частицы, если известно её положение в начальный момент

времени. «Короче говоря, в нашей гипотезе каждая волна ψ определяет „класс движений“ и каждое из них даётся уравнением (1), когда известно начальное положение частицы. Если не учитывать это начальное положение, то формула (2) даёт вероятность присутствия частицы в элементе объёма $d\tau$ в момент t Так как движение корпускулы точно определено уравнением (1), то нам не кажется, что существуют причины отказываться верить в детерминизм движения отдельных корпускул» — вывод де Бройля [6]. При нерелятивистском приближении, когда $\partial\varphi/\partial t - e\gamma \approx m_0c^2$, уравнения (1) и (2) приобретают вид:

$$\vec{v} = -\frac{1}{m_0} \left(\text{grad} + \frac{e}{c} \vec{A} \right),$$

$$\pi = \text{const} \cdot a^2.$$

В области свободной от всех полей облако корпускул может быть представлено однородной плоской волной

$$\psi = a \cos \frac{2\pi}{h} W \left(t - \frac{vx}{c^2} \right),$$

где a — константа, что означает некоторую вероятность пребывания частицы в любой точке облака.

Де Бройль обращается к объяснению интерференции в случае, когда ψ является световой волной, релятивистские уравнения (1) и (2) в этом случае приобретают вид:

$$\vec{v} = \frac{c^2}{h\nu} \text{grad}\vec{\varphi}$$

$$\pi = \text{const} \cdot a^2.$$

Таким образом, светлые и тёмные полосы интерференции, предсказываемые новой теорией, будут совпадать с результатами классических теорий.

Основная часть доклада де Бройля заканчивается следующими выводами: «Пока мы рассматривали частицы как „внешние“ по отношению к волне ψ , их движение определялось только распространением волны. Это, несомненно, только предварительная точка зрения: правильная теория атомной структуры вещества и излучения будет включать в себя корпускулы в волновое явление при рассмотрении сингулярных решений волновых уравнений» [6].

3. Дискуссия по докладу де Бройля

В дискуссии после доклада де Бройля наибольшее число вопросов касалось рассеяния частиц — упругого и неупругого. Вопросы задавали М. Борн и В. Паули, с подробным разъяснением в поддержку де Бройля выступил Л. Бриллюэн. Значение формул де Бройля Бриллюэн продемонстрировал на примере отражения фазовой волны де Бройля от плоского зеркала (рис. 1).

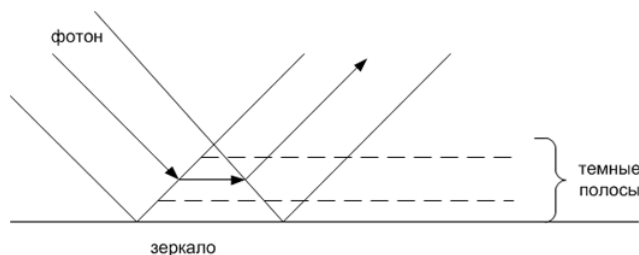


Рис. 1. Отражение фазовой волны де Бройля от плоского зеркала

Траектория фотона сначала прямолинейна в падающем узком пучке, затем искривляется в области, где происходит интерференция из-за наложения двух пучков света (падающего и отражённого), затем фотон уходит, следуя направлению отражённого луча света. Частицы, на самом деле, не ударяются о зеркало из-за интерференции, тем не менее, зеркало испытывает давление. Такой вопрос, — Каким образом стенка при падении на неё частиц испытывает давление? — де Бройль задавал в статье «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения» [5]. «Это возможно только посредством напряжений, которые действуют в области интерференции. Из-за этих напряжений стенка должна испытывать такое же давление, которое производили бы на неё частицы, сообщая импульс при отражении от её поверхности. И это именно показывает вычисление, проведённое с применением формул Шрёдингера» — отвечал на свой вопрос де Бройль [5].

Много вопросов было задано де Бройлю по поводу давления, которое оказывает падающее излучение на плоское зеркало. Например, Крамерс интересовался, как возникает давление, когда оно вызвано единственным фотоном в интерференционной зоне. А. Эйнштейн задал единственный вопрос: Предполагается, что фотоны движутся параллельно зеркалу со скоростью $c \sin \vartheta$, но что случится, если падение перпендикулярно? Будут ли фотоны иметь нулевую скорость, как того требует формула ($\vartheta = 0$)? Ланжевен получил развёрнутый ответ де Бройля на свой вопрос: В интерференционной зоне фотоны не имеют скорости, равные скорости света. Таким образом, они не всегда имеют скорость c ?

В выступлении Паули не было вопроса, это было, скорее, замечание в связи с математическим базисом теории де Бройля при рассмотрении частиц, движущихся по определённым траекториям. Он указал, «что построение де Бройля основано на законе сохранения заряда, . . . в этом случае всегда формально можно ввести вектор скорости, зависящий от пространства и времени, вдоль линий этого вектора будут следовать частицы. Подобное построение выполнено Слетером, когда световые кванты следуют вдоль линий вектора Пойнтинга. Аналогичное представление сделано де Бройлем для материальных частиц. В любом случае, я не верю, что это представление может быть развито удовлетворительным образом» [7].

На стороне де Бройля выступил Л. Бриллюэн, хорошо знакомый с его теорией: «Мне кажется, что нет серьёзных причин отвергать точку зрения Л. де Бройля. Борн может отклонять реальное существование траекторий, вычисленных де Бройлем, и заметьте, что никогда невозможно наблюдать их. Но это не доказывает, что эти траектории не существуют. Здесь не существует противопоставления точки зрения де Бройля и других авторов, в докладе де Бройль показал нам, что его формула находится в точном согласии с формулой Гордона, которую принимают все физики» [7].

4. Теория двойного решения и её затруднения

Докладу де Бройля на Сольвеевском конгрессе предшествовала большая статья «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения», опубликованная в мае 1927 г. на французском языке [3]. В ней изложена теория двойного решения: наряду с гладкой непрерывной волной, рассматриваемой Шрёдингером, должна быть другая волна, содержащая сингулярность — очень высокую и острую точку, представляющую частицу. У этой теории есть своего рода предшественник в виде концепции Эйнштейна «волны-призрака». Статья Эйнштейна называлась «Волновая механика Шрёдингера определяет движение системы полностью или только в смысле статистики?» и была направлена в печать, а затем отозвана автором. Опираясь на рукописную версию этой статьи, хранящуюся в архиве Эйнштейна, авторы книги [7] подробно рассматривают основные положения предложенной им теории. Выдвигая гипотезу о световых квантах, Эйнштейн поставил вопрос: нельзя ли считать световые волны очень слабыми, не обнаруживаемыми из-за того, что переносят ничтожно малое количество

энергии? Он назвал их «волнами-призраками» и считал, что их роль сводится к переносу фотонов и управлению движением фотонов.

Теория двойного решения де Бройля предполагала, что частица представляет собой малую область, в которой содержится большое количество энергии. Л. де Бройль объяснял позже физический смысл двух решений: «Такая область является как бы особенностью волны, и волна должна вести, направлять эту особенность так, чтобы вероятность присутствия частицы в некоторой точке в некоторый момент времени соответствовала бы распределению интенсивности в явлениях интерференции и дифракции» [11].

Хотя в теории де Бройля содержится много моментов, схожих с исследованиями Эйнштейна в этот же период, Эйнштейн не ссылается на работы де Бройля и остаётся в тени, когда теория де Бройля обсуждается на V Сольвеевском конгрессе. В статье Эйнштейна, которая открывает сборник, посвящённый 60-летию Л. де Бройля, можно прочитать: «... я хочу написать несколько слов ... Это слова оправдания. Они должны показать, почему я в годы относительной молодости, наблюдая с восхищением гениальное открытие Луи де Бройля о внутренней связи между дискретными квантовыми состояниями и состояниями резонанса, однако непрерывно искал способ, чтобы решить загадку квантов по-другому. Эти исследования были основаны на глубоком противоречии принципиального характера, которые мне внушили основы статистической квантовой теории. Это чувство, я знаю, не было чуждо и самому Луи де Бройлю» [12]. Исследования Эйнштейна в 1927 г. были сконцентрированы на рассмотрении проблемы движения частиц в общей теории поля. Цель де Бройля — получить ясную картину о корпускулярно-волновом дуализме, согласующуюся с классическими представлениями о пространстве и времени. Он задаётся вопросом: Как примирить два противоположных представления о волне и частице? Де Бройль пишет: «... я попытался развить идею о том, что уравнения волновой механики всегда допускают два сопряжённых решения; одно решение, допуская особенность, реально представляло бы собой существующую частицу, включённую в волновое явление, тогда как другое решение, с непрерывно меняющейся амплитудой, давало бы лишь статистическую сторону перемещения облака частиц» [1].

В 1926 г. Э. Маделунг опубликовал на немецком языке статью «Квантовая теория в гидродинамической интерпретации» [13], в которой волновая функция представляет ламинарный поток некоторой «несжимаемой жидкости». Де Бройль, опираясь на идею Маделунга, предлагал рассматривать интенсивность волны ψ как плотность фиктивной жидкости, перемещающейся в пространстве с течением времени. Он пишет: «я пришёл к гидродинамическому истолкованию Маделунга, но дополненному структурной картиной волн с корпускулярными особенностями» [1]. Желая примирить противоположные представления о волне, связанной с частицей, де Бройль развивает идею о том, что «уравнения волновой механики всегда допускают два сопряжённых решения; одно решение, допуская особенность, реально представляло бы существующую частицу, включённую в волновое явление, тогда как другое решение, с непрерывно изменяющейся амплитудой, давало бы лишь статистическую сторону перемещения облака частиц» [1]. В докладе на Сольвеевском конгрессе де Бройль высказывал более осторожную точку зрения, рассматривая частицу, которую увлекает за собой распространяющаяся волна. «В этой менее чёткой форме моя теория отказывалась ... от включения частицы в волну и ограничивалась констатацией волново-корпускулярной двойственности, не пытаясь больше уточнить её природу» [1] — вспоминал позднее де Бройль.

В своей книге «Введение в волновую механику» де Бройль указывает три причины, из-за которых он считает теорию волны-пилота неудовлетворительной. Основная трудность теории заключается в том, что в новой механике определение функции φ не является независимым от определения функции a . Поэтому в уравнении (2) движение частицы будет зависеть не только от начального положения, но и от его вероятности.

Второе затруднение де Бройль объясняет на примере частицы, падающей на не вполне отражающее зеркало: часть сопряжённой волны проходит сквозь зеркало,

часть отражается. Это означает, что частица обладает некоторой вероятностью пройти сквозь зеркало и некоторой вероятностью отразиться. Рассуждая, далее де Бройль приходит к выводу: если частица обнаружена в прошедшем пучке, то вероятность нахождения частицы в отражённом пучке равна нулю, а значит, отражённый пучок должен обладать нулевой интенсивностью. Из этого можно сделать заключение: «волна не является физическим явлением в старом смысле слова, это некоторое символическое представление вероятности в пространстве и времени. . . Но если волна есть только символическое представление вероятности, то управление частицы волной становится менее понятным и менее согласованным со старыми физическими представлениями» [4].

Ещё одна трудность теории волны-пилота связана с тем, что для элементов вероятности законы сохранения энергии и импульса не имеют места. Например, если внешнее поле равно нулю, из теории волны-пилота следует, что энергия и импульс частицы в момент времени t имеют вид $\partial\varphi/\partial t$ и $-\text{grad}\varphi$, и они изменяются сложным образом с течением времени и, заключает де Бройль, «полученное движение частицы очень мало правдоподобно» [4].

Рассматривая фотоны как вполне локализованные точки с помощью теории волны-пилота, де Бройль приходит к новому затруднению — скорость фотонов в тёмных полосах интерференции при отражении от несовершенного зеркала будет больше скорости c .

5. Возвращение к идеалам детерминизма

В пятидесятые годы XX века Луи де Бройль вновь возвращается к поиску другой интерпретации, более близкой к идеалу классической физики: «Интерпретация Бора и Гейзенберга не только сводит всю физику к вероятности, но и даёт этому понятию совсем новый научный смысл. В то время как великие умы классической эпохи, начиная от Лапласа и кончая Анри Пуанкаре, всегда провозглашали, что явления природы детерминированы и что вероятность, когда она вводится в научные теории, является результатом нашего незнания или нашей неспособности проследить слишком сложный детерминизм. В интерпретации, принятой квантовой физикой сегодняшнего дня, мы имеем дело с „чистой вероятностью“, которая не является результатом скрытого детерминизма» [14].

Де Бройль задаёт себе вопросы: зачем изменять современную интерпретацию, если она достаточна, для того чтобы разобраться во всех наблюдаемых явлениях, зачем вводить все эти бесполезные усложнения двойного решения, решения с особенностью? И сам на них отвечает: возвращение к ясным картезианским концепциям, соблюдающим законность рамок пространства и времени, позволило бы не только устранить смущающие возражения Эйнштейна и Шрёдингера, но и избежать некоторых странных следствий современной интерпретации. Интерпретация, описывающая квантовые явления с помощью непрерывной функции, имеющей статистический характер, логически приводит к «субъективизму», родственному идеализму, и стремится к отрицанию существования физической реальности, независимой от наблюдателя. «А ведь физик инстинктивно остаётся „реалистом“ и на это у него имеются серьёзные причины: субъективистские интерпретации будут всегда вызывать у него болезненные впечатления» — пишет де Бройль в статье, объясняющей его возвращение к детерминистической интерпретации [14]. При этом он снова обращается к истории наук, к тем периодам науки, когда определённые концепции, рассматриваемые в виде догмы, оказывали тираническое влияние на прогресс науки, и призывает периодически подвергать глубококому исследованию принципы, которые стали принимать без обсуждения.

В материалах V Сольвеевского конгресса 1927 года остались слова победного доклада Борна и Гейзенберга: «Следует отказаться от детерминизма, который до сих пор считался основой точных наук. Мы утверждаем, что квантовая механика является полной теорией, а её основные физические и математические гипотезы более не нуждаются в модификации» [7]. Теория волны-пилота, как порождённая

Луи де Бройлем в 1927 году, так и детально разработанная Д. Бомом в 1952 году, теперь принята как альтернативная формулировка квантовой теории.

В конце своей научной жизни Луи де Бройль сделал набросок программы, в которой он видел завершение своих идей и направление своей мысли [15]. Первоначальная идея де Бройля состояла в объединении экстремальных принципов Мопертюи и Ферма, в котором оптические лучи отождествляются с траекториями классической механики. Новая идея де Бройля состояла в объединении трёх принципов экстремума — принципов Ферма, Мопертюи и Карно — принципов кратчайшего оптического пути, наименьшего механического действия и максимума энтропии, соответствующего термодинамическому равновесию. Тогда геометрическая оптика, механика Лагранжа и Гамильтона и термодинамика неравновесных состояний образуют единое целое. Термодинамика как наука, оперирующая, в основном, понятиями энергии, заключённой в телах, количествами совершенной ими работы и тепла, оставляет большую свободу для описания различных элементарных процессов. «С точки зрения конструктивного развития современных теорий термодинамика может в каком-то смысле играть направляющую роль, ограничивая число приемлемых гипотез, но, не указывая, конечно, тот или иной определённый путь развития» — на это обратил своё внимание де Бройль ещё в 1936 г. [16]. Об этой не получившей завершения попытке Л. де Бройля писал его ученик Ж. Лошак: «Если принять сторону волн, сохраняя принцип максимума энтропии, то получится волновая механика; если принять сторону термодинамики, но отказаться от волн, то получится необратимая классическая механика, остающаяся ньютоновской, но больше не подчиняющаяся принципу наименьшего действия; наконец, если принять одновременно волны и термодинамику, то получится новая квантовая (или волновая) механика, которая будет неравновесной, и позволит описывать квантовые переходы и рождение, и аннигиляцию частиц в качестве быстрых, но не мгновенных явлений» [17].

6. Заключение

На Сольвеевском конгрессе в 1927 г. выступление Л. де Бройля рассматривалось ведущими физиками того времени наравне с докладами М. Борна и В. Гейзенберга «Квантовая механика» и Э. Шрёдингера «Волновая механика» и вызвало интерес. Вопросы, которые возникли в ходе дискуссии, требовали дальнейшего развития теории. После знакомства с материалами конгресса встаёт закономерный вопрос, почему де Бройль оставил свою теорию, на который он позднее ответил сам: «её развитие было связано с математическими трудностями, которые мне казались непреодолимыми» [1].

В историко-научной литературе можно встретиться с критикой поиска де Бройлем физического смысла открытого им корпускулярно-волнового дуализма материи. Эта точка зрения преподносится как «механистическая» и направленная на возвращение к чисто классическим представлениям. Исследование работ де Бройля в период разработки им теории двойного решения показывает, что это не так. Де Бройль не стремился свести квантовые закономерности к механике Ньютона. Его не устраивало положение, что волновая механика, в основе которой лежала его мысль о сосуществовании волн и частиц, приводила к теории, в которой утрачивается как понятие частицы, как некоего объекта, локализованного в каждый момент времени, так и понятие волны — физического явления, распространяющегося в пространстве с течением времени.

Поиск Л. де Бройлем физического смысла сосуществования волн и частиц представляет определённый интерес как для историков науки, так и для исследователей различных интерпретаций квантовой механики. Ещё одну сторону теории волн-пилота де Бройля, которая спустя 25 лет получила своё развитие в работах Д. Бома, указал в своей книге А. Садбери: «Важность рассматриваемой теории состоит вовсе не в том, что она может действительно рассматриваться как серьёзный кандидат на детерминированную теорию микрочастиц, а в том, что самим своим существованием она демонстрирует, что действительно можно

создать теорию со скрытыми параметрами, полностью совместную с квантовой механикой» [18].

Значение теории двойного решения подчеркнул и Ж. Лошак: «Конечно, теория двойного решения наталкивалась на трудности, но она заслуживала (и заслуживает) уважение уже потому, что она была логическим продолжением предпосылок квантовой механики. Этот путь, приведший к грандиозному результату, не следует забывать, ведь кто знает: вдруг однажды он приведёт к новым результатам. Плодотворные физические образы слишком редки, чтобы быть попросту отброшенными» [5].

Литература

1. *de Broijl L.* По тропам науки. — М.: Иностр.лит., 1962. — С. 408. [*de Broijl L.* Po troпам nauki. — М.: Inostr.lit., 1962. — С. 408.]
2. *de Broglie L.* Les principes de la nouvelle mécanique ondulatoire // *Journal de Physique.* — 1926. — Pp. 321–337.
3. *de Broglie L.* La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement // *Journal de Physique.* — 1927. — Pp. 225–241.
4. *de Broijl L.* Введение в волновую механику / под ред. Иваненко. Д. Д. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. — С. 232. [*de Broijl L.* Vvedenie v volnovuyu mekhaniku / под ред. Ivanenko. D. D. — М.: Knizhniy dom «LIBROKOM», 2010. — С. 232.]
5. *de Broijl L.* Избранные научные труды. — М: Логос, 2010. — Т. 1, С. 560. [*de Broijl L.* Izbranniye nauchniye trudih. — М: Logos, 2010. — Т. 1, С. 560.]
6. *Смык А. Ф.* Доклад Луи де Бройля «Новая динамика кванта» на Сольвеевском конгрессе // *История науки и техники.* — 2011. — № 10. — С. 24–39. [*Smikh A. F.* Doklad Lui de Broijlya «Novaya dinamika kvanta» na Soljveevskom kongresse // *Istoriya nauki i tekhniki.* — 2011. — No 10. — S. 24–39.]
7. *Vaccigaluppi G., Valentiny A.* Quantum Theory at the Crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay Conference. — Cambridge: Cambridge University Press, 2009. — P. 530.
8. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. — М.: Мир, 1985. — С. 380. [*Dzhemmer M.* Evolyuciya ponyatij kvantovoy mekhaniki. — М.: Mir, 1985. — С. 380.]
9. *Mehra J.* The Golden Age of Theoretical Physics. — London: World Scientific, 2001. — Vol. 1, P. 1778.
10. *de Broijl L.* К истории возникновения и интерпретации волновой механики // *ВИЕТ.* — 1974. — № 2. — С. 3–8. [*de Broijl L.* K istorii vozniknoveniya i interpretacii volnovoy mekhaniki // *VIET.* — 1974. — No 2. — S. 3–8.]
11. *de Broijl L., Loshak Zh.* Теория двойного решения. Сосуществование фотонов и волн в электромагнитном излучении // *Техника — молодежи.* — 1965. — № 5. — С. 14–18. [*de Broijl L., Loshak Zh.* Teoriya dvoynogo resheniya. Sosuthestvovanie fotonov i voln v ehlektromagnitnom izluchenii // *Tekhnika — molodezhi.* — 1965. — No 5. — S. 14–18.]
12. *Einstein A.* Remarques préliminaires sur les concepts fondamentaux/ Louis de Broglie. Physicien et penseur. / Ed. by G. A. — Paris: Albin–Michel, 1953. — Pp. 4–10.
13. *Madelung E.* Quantumtheorie in Hydrodynamische Form // *Zts. f. phys.* — 1926. — Vol. 40. — Pp. 322–326.
14. *de Broijl L.* Останется ли квантовая механика индетерминистской? // *Вопросы философии.* — 1954. — № 4. — С. 105–118. [*de Broijl L.* Ostanetsya li kvantovaya mekhanika indeterministskoj? // *Voprosih filosofii.* — 1954. — No 4. — S. 105–118.]
15. *de Broglie L.* La thermodynamique de la particule isolée. — Paris: Gauthier–Villars, 1964.

16. *де Бройль Л.* Революция в физике // Бройль Л., де. Избранные научные труды. — М.: МГУП, 2011. — Т. 2, С. 162. [*de Broijlj L. Revolyuciya v fizike* // Бройль Л., де. Izbrannihe nauchnihe trudih. — М.: МГУП, 2011. — Т. 2, С. 162.]
17. *Лошак Ж.* Геометризация физики. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. — С. 280. [*Loshak Zh. Geometrizaciya fiziki.* — М.–Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2005. — С. 280.]
18. *Садберу А.* Квантовая механика и физика элементарных частиц. — М.: Мир, 1989. — Т. 2, С. 320. [*Sadberi A. Kvantovaya mekhanika i fizika ehlementarnihkh chastic.* — М.: Mir, 1989. — Т. 2, С. 320.]

UDC 53(093)

Louis de Broglie's Search of Physical Meaning of the Wave-Particle Duality

A. F. Smyk

Physics Department

*Moscow Automobile and Road Construction Institute (State Technical University)
64, Leningradskiy prospect, 125319 Moscow, Russia*

Having opened in 1923, the fundamental principle of wave-particle duality of matter, which lies at the base of quantum mechanics, Louis de Broglie has long been engaged in search of the physical meaning of this principle. The article deals with certain questions of the theory of de Broglie, called the theory of double solutions, in which he attempts to relate the motion of the particle and associated with particle movement of matter waves. Attention is drawn to the discussion that has arisen after the de Broglie's report on the V Solvay Congress 1927, to the difficulties of the theory and its historical significance.

Key words and phrases: wave-particle duality of matter, Louis de Broglie, matter waves, the theory of double solutions, pilot-wave theory, Solvay Congress, probability wave.