

А. Ф. СМЫК

ГЕНЕЗИС ИДЕИ КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОГО ДУАЛИЗМА МАТЕРИИ ЛУИ ДЕ БРОЙЛЯ

Имя Луи де Бройля, Нобелевского лауреата по физике (1929), стоит в одном ряду с именами величайших физиков XX в., создателей квантовой механики. Аристократическое происхождение, уединенный образ жизни, а также образование, в котором блестяще сочетались глубокое знание истории и теоретической физики, плюс научный гений сделали его одним из наиболее оригинальных умов, когда-либо проявивших себя в науке. В статье прослеживается процесс формирования волновой концепции де Бройля, ставшей базой для развития волновой механики. На генезис его идей о корпускулярно-волновом единстве материи оказали влияние множество факторов, среди которых можно выделить главные: французская научная мысль, оптико-механическая аналогия Гамильтона, гипотеза А. Эйнштейна о квантах света и теория относительности, модель атома Бора – Зоммерфельда, экспериментальные исследования природы рентгеновского излучения.

Ключевые слова: Л. де Бройль, квантовая механика, рациональная программа Декарта, корпускулярно-волновой дуализм, принцип Мопертюи, принцип Ферма, кванты света, релятивистская инвариантность, фазовая волна.

В истории физики имя Луи де Бройля широко известно благодаря высказанной им идее о связанности корпускулярных и волновых свойств материи, из которой родилась волновая механика. Председатель Нобелевского комитета по физике К. В. Озеен при вручении Нобелевской премии де Бройлю в 1929 г. отмечал:

Де Бройль открыл совершенно новый аспект природы материи, о котором ранее никто не подозревал. Блестящая догадка де Бройля разрешила давний спор, установив, что не существует двух миров, один – света и волн, другой – материи и корпускул. Есть только один общий мир ¹.

Если представить себе квадрат, в противоположных вершинах которого находятся излучение (свет) – вещество, волна – частица (рис. 1), то в нем именно де Бройль был последним звеном – ученым, кто связал волны и вещество.

¹ Финкельштейн А. М., Ноздрачев А. Д., Поляков Е. Л., Зеленин К. Н. Нобелевские премии по физике 1901–2004. СПб., 2005. С. 368.

Благодаря его работам 1923–1924 гг. в науку вошло представление о корпускулярно-волновом дуализме материи как ключевом элементе физической картины мира. Исследование гносеологических корней этого теоретического достижения – та цель, которую ставил перед собой автор настоящей статьи.

Впервые идеи о существовании у материи волновых свойств, которые стали одной из основ волновой механики, де Бройль изложил в 1923 г. Он постулировал существование волны, которую впоследствии назвал фазовой, связанной с движением частицы, обладающей определенными корпускулярными характеристиками – значениями энергии E и импульса $\vec{p}$. Путем рассуждений, основанных на преобразованиях Лоренца, де Бройль показал, что частота ω и длина λ этой фазовой волны связаны с динамическими характеристиками частицы – энергией и импульсом: $E = \hbar\omega$, $\vec{p} = \hbar\vec{k}$. Связь волновых и корпускулярных характеристик для частиц и волн материи у де Бройля имела такой же вид, как и для фотона и световой волны, полученный ранее А. Эйнштейном. Тем самым был установлен единый – для частиц материи и для света – вид дуализма. С помощью фазовых волн де Бройль смог перевести условие квантования стационарных орбит в модели атома Бора на язык резонанса фазовой волны, т. е. он показал, что на стационарных орбитах длина волны укладывается целое число раз. Тем самым условия квантования в модели атома Бора приобрели ясный физический смысл. Еще одним важным результатом теории, предложенной де Бройлем, было предсказание возможности наблюдения волновых явлений, связанных с распространением в пространстве волн материи, таких как интерференция и дифракция. Явление дифракции электронов обнаружили в 1927 г. в США К. Дэвиссон и Л. Джермер, которые вычислили длину волны исходя из результатов своих опытов, и она соответствовала длине волны де Бройля $\lambda = h/mv$. После этих и многочисленных других экспериментов, которые подтверждали существование дифракции волн материи, становление квантовой механики пошло быстрыми темпами. К этому времени уже появились теории В. Гейзенберга (1925) и Э. Шредингера

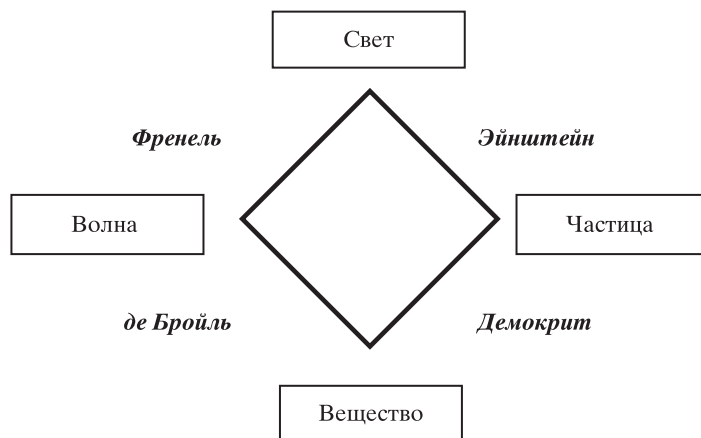


Рис. 1. Квадрат материя – форма (Wheaton, B. R. *Atomic Waves in Private Practice // Quantum Mechanics at the Crossroads* / Eds. J. Evans, A.S. Thorndike. Berlin, 2006. P. 44)

(1926), которые описывали закономерности явлений в атомах, методологически разные: Шредингер получил уравнение для волн де Бройля – волновое уравнение, а Гейзенберг открыл путь матричной механики, в которой не было места классическим представлениям об электронных траекториях.

Эволюции основных идей квантовой механики посвящено значительное количество работ². В большинстве из них ключевым шагом, приведшим де Бройля к формулированию идеи корпускулярно-волнового дуализма материи, считается распространение им на любые материальные частицы представлений Эйнштейна о квантах света. Доказывается, что истоком рассуждений де Бройля была оптико-механическая аналогия, развитая в середине XIX в. У. Гамильтоном. Проблема природы света уходит своими корнями к представлениям Р. Декарта о протяженной материи, и то, что Луи де Бройль подошел к ее решению, говорит о его прочной связи с идеями рационализма, характерными для французской научной мысли. Эта связь практически не рассматривается в известных работах. С другой стороны, в некоторых немногочисленных публикациях построение де Бройлем его теории связывается с известными экспериментальными работами по изучению рентгеновских (X -) и γ -лучей, открытых в конце XIX в. Именно старший брат, Морис де Бройль, впервые наблюдавший фотоэффект для рентгеновского излучения, привлек в 1919 г. Луи де Бройля в свою лабораторию и обсуждал вместе с ним самые острые вопросы того времени, связанные с природой коротковолнового электромагнитного излучения – X - и γ -лучей. Интенсивная экспериментальная работа с этим видом излучения велась в различных европейских научных центрах. Практически одновременно в 1923 г. были опубликованы статьи, авторы которых предполагали корпускулярно-волновую природу этого излучения. В марте П. Дебай в своей статье³ предположил, что рентгеновский квант теряет энергию при столкновении с электроном, в апреле А. Комптон в другой статье⁴ писал о том, что квант рентгеновского излучения несет с собой импульс, а также энергию. А в сентябре 1923 г. Л. де Бройль публикует подряд три статьи, где он объясняет новое представление о квантах света, отличное от выдвинутой ранее гипотезы Эйнштейна:

Атом света, эквивалентный по своей полной энергии излучению с частотой ν , является источником внутреннего периодического процесса и, с точки зрения неподвижного наблюдателя, имеет в каждой точке про-

² Очерки развития основных физических идей / Ред. А. Т. Григорян, Л. С. Полак. М., 1959; Ельшиевич М. А. От возникновения квантовых представлений до становления квантовой механики // Успехи физических наук. 1977. Т. 122. Вып. 4. С. 679; 50 лет квантовой механике / Ред. Л. С. Полак. М., 1979; Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М., 1985; Хунд Ф. История квантовой теории. Киев, 1980; Quantum Mechanics, a Half Century Later / Eds. J. L. Lopes, M. Paty. Dordrecht, 1977; Quantum Mechanics at the Crossroads / Eds. J. Evans, A. S. Thorndike. Berlin, 2006; Wheaton, B. R. The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism. Cambridge, 1983; Bacciagaluppi, G., Valentini, A. Quantum Theory at the Crossroads. Cambridge, 2009.

³ Debye, P. Zerstreuung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie // Physikalische Zeitschrift. 1923. Bd. 24. S. 161–166.

⁴ Compton, A. H. A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements // Physical Review. 1923. Vol. 22. P. 483–502.

странства ту же фазу, что и волна с частотой ν , распространяющаяся в том же направлении, со скоростью, почти равной (хотя чуть большей) постоянной, называемой скоростью света ⁵.

М. Джеммер в своем исследовании обращает внимание также на статьи М. Бриллюэна по гидродинамической модели колеблющегося атома, о которых знал Л. де Бройль и которые предшествовали его работам.

Практически все известные исследования, посвященные анализу идеи де Бройля о корпускулярно-волновом единстве материи, делают акцент на каком-нибудь одном из ключевых факторов, оказавших влияние на оформление этой идеи. В настоящей статье впервые дается интерпретация, учитывающая различные факторы. Рассматриваются такие источники теоретических построений де Бройля, как французские научные и научно-философские традиции, экспериментальные исследования в лаборатории М. де Бройля по выяснению природы рентгеновских лучей, специальная теория относительности и гипотеза о квантах света Эйнштейна, квантовая теория Бора – Зоммерфельда, оптико- механическая аналогия.

Особенности личности и мировоззрения Луи де Бройля

Удивительно, но во Франции существует только одно-единственное достаточно полное биографическое исследование жизни и научного творчества Л. де Бройля, выполненное его учеником и единомышленником Ж. Лошаком ⁶. Сам этот факт говорит об отношении французского научного сообщества к ученому. Лошак пишет, что де Бройль встречал неприятие со стороны большинства физиков, «он был как будто из иной реальности: по научному мировоззрению, происхождению, воспитанию и характеру». П. Джермен, который стал непрямым секретарем Французской академии наук после смерти де Бройля, сказал: «Кажется, Луи де Бройль никогда реально не вписывался в научное сообщество» ⁷. Независимость мышления была наиболее характерной чертой его творчества. При жизни он получил репутацию ретрограда несмотря на то, что всегда руководствовался семейным девизом «Ради будущего», заботился о будущем поколении физиков.

Многие особенности личности де Бройля – независимость, уверенность в себе, достоинство – объясняются его аристократическим происхождением. В числе его предков были депутаты Национальной ассамблеи и министры, маршалы и члены Французской академии наук, все рожденные в семье де Бройлей носили титулы принцев, а старшему сыну в семье передавался титул герцога. После смерти старшего брата Мориса титул седьмого герцога перешел к Луи де Бройлю. Что означает быть аристократом в век науки? Ответ на этот вопрос можно найти в исследовании аристократической культуры начала

⁵ Бройль Л., де. Избранные научные труды. М., 2010. Т. 1. С. 194.

⁶ Лошак Ж. Принц в науке // Бройль, де. Избранные научные труды... Т. 1. С. 11–178.

⁷ Цит. по: Nye, M. J. Aristocratic Culture and the Pursuit of Science: The de Broglies in Modern France // Isis. 1997. Vol. 88. No. 3. P. 399.

XX в. во Франции⁸. Выбор таких областей приложения своих сил, как медицина, преподавание связывался со словом «работа», что было неприемлемо для членов аристократических семей. Аристократы занимались политикой, дипломатией, государственным управлением или управлением финансами на самом высоком уровне. Эти ценности сохранялись и в семье де Бройлей. Но среди типичных аристократических семей Франции она выделялась тем, что трое из пяти детей – Луи, его брат Морис и сестра Полина – выбрали в качестве основной своей деятельности науку, и именно занятие наукой прочно связывало их на протяжении всей жизни, обеспечивало их духовную близость. Морис защитил докторскую диссертацию «Исследования наэлектризованных центров малой подвижности в газах» в 1908 г., Луи – докторскую диссертацию также по физике в 1924 г., а Полина де Бройль – докторскую диссертацию по литературоведению в 1938 г.

Б. Г. Кузнецов описывает встречу с Л. де Бройлем в 1980 г., во время которой тот напомнил ему о своем первоначальном гуманитарном образовании и о постоянном интересе к истории культуры, к прошлому науки. «Мне даже кажется, – сказал Луи де Бройль, – что за последние 30 лет я прочел больше книг по истории, чем по физике». Кузнецов пишет:

Слушая де Бройля, я как бы невольно прислушивался к непрекращающемуся разговору мыслителей разных эпох о проблемах, в течение тысячелетий стоящих перед познанием⁹.

Получив сначала высшее гуманитарное (историческое) образование, де Бройль сохранил на протяжении всей своей жизни привязанность к истории, особенно к истории науки. Эволюцию научных идей начиная с XVII в. он изложил в историческом обзоре своей докторской диссертации, решая одну из острейших проблем начала XX в. – проблему синтеза двух оптических теорий волн и квантов. Лошак писал:

Вопреки своей репутации Луи де Бройль не был философом. Он мало читал классиков философии и не находился под влиянием современных философов, среди которых ценил только философа науки Мейерсона. Он считался последователем Бергсона, но на самом деле не был им. Им руководила не философия, а история, и главным образом – история наук, которую он хорошо знал и [...] интересовался, скорее, эволюцией идей, их противостоянием, примирением, забвением и возрождением¹⁰.

Французский философ Э. Мейерсон был близок де Бройлю в понимании философии прежде всего как эпистемологии, логики и методологии научного познания. Де Бройль считал так же, как и Мейерсон, что наука исторична, что она наследует предшествующие достижения не столько как готовое знание, сколько как материал, подлежащий переоформлению в новую схему с учетом изменившейся перспективы видения.

⁸ Там же. Р. 397–421.

⁹ Кузнецов Б. Г. Беседа с Луи де Бройлем // Вестник АН СССР. 1982. Т. 8. С. 107.

¹⁰ Лошак. Принц в науке... С. 82.

Решая те или иные специальные задачи физики, де Бройль всегда уделял внимание размышлениям о сущности, источниках и путях научного познания, законах его развития. Им написаны около десяти книг по философии науки, и не случайно сборник статей известных ученых XX в., посвященный шестидесятилетию юбилею де Бройля, назван «Физик и философ»¹¹. Представления, которых придерживался де Бройль, названы им самим как «научный реализм». Под этим он понимал признание реального, т. е. независимого от субъекта, существования тел и явлений, изучаемых наукой, их движения в объективных пространстве и времени. С этим де Бройль связывает и представление об объективной закономерности, причинности и детерминизме. Ссылаясь на Мейерсона, де Бройль подчеркивает:

Физик всегда инстинктивно является «реалистом» в философском смысле этого слова и сомнительно, чтобы он смог с пользой вести свою работу, отказавшись от своей веры в объективную реальность¹².

Рассмотренные особенности происхождения, образования и научного мировоззрения сделали де Бройля одним из наиболее оригинальных умов, проявивших себя в науке. Среди своих современников он имел репутацию «странного человека»:

Некоторые успокаивали себя тем, что идеи волн материи пришли в голову ученому, возможно, случайно: казалось невероятным, чтобы настолько странный человек мог быть великим физиком¹³.

С его именем связана масса вопросов, на которые еще предстоит ответить или переосмыслить существующие ответы¹⁴. Разобраться в этих вопросах поможет изучение основополагающих трудов де Бройля. Отечественным исследователям эту задачу облегчит недавний выход из печати двух первых томов избранных трудов ученого на русском языке¹⁵.

Французская научная мысль как отправная точка научной деятельности Луи де Бройля

Для того чтобы понять ход мыслей ученого, которые привели его к созданию революционных теорий, необходимо посмотреть назад, на истоки его творчества, на его учителей и предшественников. Для де Бройля такой питательной почвой, несомненно, была французская научная мысль, представленная Р. Декартом, Ж. Лагранжем, О. Френелем, А. Пуанкаре. В формирова-

¹¹ Louis de Broglie. Physicien et penseur / Ed. A. George. Paris, 1953.

¹² Бройль Л., де. По тропам науки. М., 1962. С. 172.

¹³ Лошак. Принц в науке... С. 15.

¹⁴ Первые шаги в этом направлении предпринял автор данной статьи, см.: Смык А. Ф. Луи де Бройль и история физики XX века // История науки и техники. 2011. № 5. С. 26–39; Смык А. Ф. Доклад Луи де Бройля «Новая динамика кванта» на V Сольвеевском конгрессе по физике // История науки и техники. 2011. № 10. С. 24–39.

¹⁵ Бройль Л., де. Избранные научные труды. М., 2010. Т. 1. 2011. Т. 2.

нии идеи дуализма материи де Бройля им принадлежит особая роль. Вклад французской науки в современную физику огромен: физические теории, экспериментальные факты современной физики нельзя изложить без ссылок на французских мыслителей. Исследованию «французской революции» в физике посвящена работа Вл. П. Визгина¹⁶. Что отличает научную мысль, характерную для французской физики и математики начиная с XVII в.? Одной из особенностей Франции XVII в. было развитие здесь рационализма. В рамках французского рационализма была создана картина мироздания, основанная на эмпирическом опыте без апелляции к религиозному Откровению как источнику истины.

А. Койре писал:

Семнадцатый век с полным правом был назван веком гениев. Декарт выразил идеал – или мечту? – науки Нового времени, «грезу сведения науки к геометрии»¹⁷.

Уже стало избитой истиной представление о геометризации физики, об отождествлении пространства и вещества, места и тела как об исходной идее физики Декарта («Вся моя физика – это только геометрия»¹⁸).

Декарт, начавший с чисто рациональной физической программы («в моей физике нет ничего, чего не имелось бы уже в геометрии»), кончает созданием чисто воображаемой физики, неким философским романом, как назовут его творение Гюйгенс и Лейбниц¹⁹.

Античная атомистика была первой попыткой свести качественные различия тел к пространственным свойствам составляющих эти тела бескачественных частиц, к числу, величине и форме атомов. Здесь и возникло противопоставление «бытия» (бескачественной материи) и «небытия» (пустое пространство). Каким образом можно отличить тело от занятого им места? Декарт отвечает на этот вопрос: тело и его место неотличимы. Тело и место, материя и пространство тождественны.

Де Бройль через тридцать лет после создания волновой механики говорил об «узком» и «широком» смысле требования Декарта – описания природы «посредством фигур и движений».

Узкое истолкование декартовской программы состоит в следующем: весь физический мир нужно представить как состоящий из тел, которые изменяют свое положение под влиянием их взаимодействия согласно законам механики, законам, о которых в эпоху Декарта начало создаваться более точное представление. Можно говорить о других сторонах представлений

¹⁶ Визгин Вл. П. «Французская революция» в физике // Исследования по истории физики и механики 1995–1997. М., 1999. С. 15–18.

¹⁷ Койре А. Очерки истории философской мысли (о влиянии философских концепций на развитие научных теорий). М., 2003. С. 15.

¹⁸ Цит. по: Кузнецов Б. Г., Погребысский И. Б. Французская наука и современная физика. М., 1967. С. 12.

¹⁹ Койре. Очерки истории философской мысли... С. 205.

такого рода, а именно о том, в каком отношении к ним находятся представления о силах или действия на расстоянии, но эти представления всегда сводились к «механическому» истолкованию физической реальности, что заставляло рассматривать механику как основную науку, из которой должна выводиться вся остальная физика. Механика довольно естественно приводила к рассмотрению вещества в целом как совокупности бесконечного числа движущихся и взаимодействующих частиц²⁰.

Более широкое толкование (оно же более абстрактное) предполагает описание физической реальности величинами, определенными в пространстве и времени, но при этом не требуется сводить описание к образам частиц.

В истории физики есть еще один представитель французской научной мысли, на труды которого опирался де Бройль, – Огюстен Френель, основатель волновой оптики, теории интерференции и дифракции, один из тех, кто серьезно повлиял на открытие де Бройлем волновой механики. Френель родился в 1788 г., на 100 с лишним лет раньше Луи де Бройля, в родовом поместье де Бройлей – Бройли, в Нормандии. Интересно, что предок Луи де Бройля пригласил для управления замком и его территориями бывшего адвоката Франсуа Мериме, на дочери которого женился архитектор Жак Френель, и в этом браке родился Огюстен Френель. Луи де Бройль был чувствителен к таким совпадениям и видел в них знак судьбы. Он часто писал о Френеле и держал в своем кабинете в академии его беломраморный бюст.

Цитируя Френеля во время научных дискуссий, он не мог оставаться нейтральным, его выдавал голос, в котором звучали дружеские нотки. Он испытывал теплые, товарищеские и даже братские чувства. Луи де Бройль словно взывал к Френелю, когда, не произнося имени, указывал жестом на его бюст и говорил: «Он меня бы хорошо понял»²¹.

Френель, начав экспериментальное изучение интерференционных явлений, известных еще с XVII в., показал, что эти явления полностью описываются волновой теорией света²². Из его теории следовало прямолинейное распространение света в однородной среде. С помощью введенной им гипотезы о поперечности колебаний в световой волне он дал полную теорию поляризации и двойного лучепреломления, разработал теорию распространения света в анизотропных средах. Де Бройль с восхищением писал: «Эти работы – настоящие шедевры теоретической физики»²³.

Спустя сорок лет Максвелл дает волнам Френеля электромагнитную интерпретацию и сводит всю оптику к электромагнетизму. Его гениальная идея, позволяющая рассматривать свет как электромагнитное возмущение, была для де Бройля одним из примеров синтеза, которые давало ему изучение истории развития физики. Он делает вывод:

²⁰ Бройль, де. По тропам науки... 1962. С. 166.

²¹ Лошак. Принц в науке... Т. 1. С. 18.

²² Френель О. Избранные труды по оптике. М., 1955.

²³ Бройль Л., де. Революция в физике // Бройль Л., де. Избранные научные труды. М., 2011. Т. 2. С. 65.

Оставаясь полностью верной общей схеме классической физики, теория Максвелла, казалось, довольно плохо согласовывалась с декартовым идеалом объяснения посредством фигур и движений: она представляла собой первый шаг на пути все более и более возрастающей абстракции²⁴.

Картина взаимодействий, картина поля стала в XIX в. картиной физической реальности более общей, чем механическое представление о непроницаемых телах. Де Бройль пишет:

Вместо этого строгого истолкования формулы Декарта, которое в течение длительного времени принималось большинством теоретиков, можно выдвинуть более широкое и абстрактное истолкование, согласно которому физическая реальность может быть описана величинами, вполне определенными в любой точке пространства и изменяющимися с течением времени по математическим законам, не предполагая, что это описание должно использовать только строго механические законы. Однако это истолкование, более далекое, чем предыдущее, от первоначальной идеи Декарта, точно так же допускает представление посредством фигур и движений, если только понимать, что оно ограничивается точной картиной физического мира в априори заданных рамках пространства и времени²⁵.

В XIX в. физика распалась на две части: механика развивалась на основе «узкого истолкования» программы Декарта, которая получила дальнейшее развитие в работах Ньютона, – это классический идеал механики дискретных тел, а электродинамика, которая имела дело с новой физической реальностью – полем – и не могла быть описана на языке взаимодействующих, обменивающихся импульсами дискретных тел, – на основе «широкого истолкования». Эти два истолкования и были названы «программой Ньютона» и «программой Максвелла».

Кузнецов писал:

Несводимость «программы Максвелла» к «программе Ньютона», несводимость оптики (и вообще электродинамики) к механике была важнейшим итогом физической мысли в конце XIX века²⁶.

Еще в молодости Луи де Бройль в большой степени благодаря своему старшему брату познакомился с основными проблемами, связанными с корпускулярно-волновым дуализмом в оптике, изучил доклады, сделанные на Первом Сольвеевском конгрессе в 1911 г. Х. Лоренцом, М. Планком, А. Эйнштейном. В докладе Планка, в частности, рассматривалось противоречие между выдвинутой Эйнштейном гипотезой квантов света и теорией электромагнитного поля Максвелла, т. е. противоречие между описаниями непрерывной и дискретной природы света. Де Бройль, по его словам, уже тогда начал по-

²⁴ Бройль, де. По тропам науки... С. 10.

²⁵ Там же. С. 166.

²⁶ Кузнецов, Погребыский. Французская наука... С. 65.

нимать, что «сосуществование волн и частиц при излучении, предсказываемое квантовой теорией света Эйнштейна, есть фундаментальный факт природы», и стал размышлять над его природой. Стремление объединить две программы, стремление реализовать «широкое истолкование» программы Декарта как логически связанное с «узким», т. е. обобщить, модифицировать картезианскую традицию, двигало де Бройлем в его размышлениях, и он обращался к основным идеям оптики и механики XVII–XVIII вв. Он исходил из известных с XVII в. оптико-механических аналогий – принцип Ферма в оптике и принцип Мопертюи в механике, но его интересовало не формальное сходство основных классических принципов. Физически содержательное сближение двух программ вело де Бройля за пределы классической физики. Он писал:

Гениальное обобщение Максвелла хотя и изменило представление о природе световых волн, но оставило нетронутой веру, что свет образован волнами с непрерывным распределением энергии ²⁷.

Сам де Бройль так объяснял выбор темы своих будущих исследований:

Со всей страстностью, свойственной молодости, я решил посвятить все свои силы выяснению истинной природы введенных [...] в теоретическую физику Максом Планком таинственных квантов [...] В то время я понял, что для изучения этого вопроса очень большое значение имеет знание классических теорий аналитической механики, в частности, теорий Гамильтона и Якоби, и начал углублять свои знания в этой области ²⁸.

Задача, которую поставил перед собой еще никому не известный де Бройль, говорит о его склонности к рассмотрению глобальных научных проблем и поисков их наиболее общих решений. Его всестороннее и глубокое образование позволило усмотреть физические аналогии там, где другие их не замечали. Многие физики в начале 1920-х гг. считали спорными представления о световых квантах Эйнштейна, и обращение де Бройля к этой теории свидетельствует о независимости суждений и самостоятельности мышления молодого физика. Де Бройль был учеником П. Ланжевена ²⁹, ведущего французского физика-теоретика, который был знаком с Эйнштейном и высоко ценил его работы. Теория относительности Эйнштейна была для де Бройля путеводной звездой в установлении корпускулярно-волнового синтеза. Взяв за основу представления о «световых квантах» Эйнштейна, а также следствие из теории относительности о том, что энергия обладает массой, а масса представляет собой энергию, он принимает за основную гипотезу равенство: $h\nu_0 = m_0 c^2$ и добивается того, чтобы это уравнение сохранялось в любой инерциальной системе отсчета. В заключительной статье, посвященной разработке новой

²⁷ Бройль Л., де. Останется ли квантовая механика индетерминистской? // Вопросы философии. 1954. Вып. 4. С. 105.

²⁸ Бройль, де. По тропам науки... С. 347.

²⁹ Старосельская-Никитина О. А. Поль Ланжевен. М., 1962.

теории волн материи, «Попытка построения теории световых квантов», де Бройль подчеркивает значение концепции световых квантов Эйнштейна:

Многие из этих идей могут подвергнуться критике и, может быть, изменены, но представляется, что в настоящее время не может оставаться сомнений в реальности существования световых квантов. Более того, если наши взгляды будут приняты, то, поскольку они основываются на относительности времени, все многочисленные экспериментальные доказательства реальности «квантов» будут свидетельствовать в пользу концепций Эйнштейна³⁰.

В отзыве на диссертацию де Бройля, подписанном Ланжевенем и Ж. Переном 25 ноября 1924 г., дана высокая оценка основной идее, которая вытекает из общих принципов. В нем также отмечается, что

на первый взгляд парадоксальная теория все более соответствует природе вещей и способна впечатляющим образом объединить концепции, которые до этого казались противоречивыми³¹.

В этом отзыве, вопреки распространенному мнению о том, что никто во Франции не понял глубины идеи де Бройля и «экзаменационная комиссия не присудила бы ему докторской степени, если бы Ланжевен не догадался послать экземпляр Эйнштейну»³², можно прочитать:

Господин де Бройль продемонстрировал здесь с удивительной уверенностью исследование, которое должно победить трудности настоящего периода, в котором мы находимся. Оригинальность и глубина идеи, замечательная согласованность, которую она представляет, подтверждают принятие этой работы как достойной диссертации доктора наук.

Теория де Бройля была порождена кризисом, который возник в физике вследствие открытия квантов в начале XX в. Его идеи, позволившие объединить механику и оптику, волны и корпускулы, очень скоро стали общепризнанными. Всего через год Шредингер развил представления фазовой волны де Бройля, нашел волновое уравнение и опубликовал серию статей, которые утвердили волновую механику. Визгин писал о восприятии волновой механики в СССР:

Буквально за несколько месяцев волновая механика [...] «захватила мир физиков». Я. И. Френкель и И. Е. Тамм уже в 1924–1925 гг. высоко оценили волновую концепцию де Бройля³³.

³⁰ Бройль Л., де. Попытка построения теории световых квантов // Вариационные принципы механики / Ред. Л. С. Полак. М., 1959. С. 634.

³¹ Rapport sur la thèse de Mr. Louis de Broglie Victor, Pierre, Raymond «Recherches sur la théorie des quanta» (1924) // Fondation Louis de Broglie, Paris (неопубликованный отзыв на диссертацию Л. де Бройля, хранящийся в фонде его имени).

³² Абрагам А. Время вспять, или физик, физик, где ты был. М., 1991. С. 68.

³³ Визгин Вл. П. Восприятие волновой механики Шредингера в СССР // Эйнштейновский сборник 1986–1990. М., 1990. С. 447.

«Долгое и далеко идущее размышление»: оптико-механическая аналогия

М.-А. Тоннела, участница семинара де Бройля в Институте Анри Пуанкаре, в своем очерке жизни и творчества де Бройля, вошедшем в сборник «Луи де Бройль. Ученый и мыслитель», поставила в качестве эпиграфа следующие строки Паскаля:

Написать слово без долгого и далеко идущего размышления – это еще очень далеко от того, чтобы увидеть в этом слове изумительную серию дальнейших выводов и выдвинуть четкий принцип, находящий себе опору во всей физике в целом ³⁴.

Важность идеи, ее роль в создании физической теории подчеркивал Эйнштейн:

В создании физической теории существеннейшую роль играют фундаментальные идеи. Физические книги полны сложных математических формул. Но началом каждой физической теории являются мысли и идеи, а не формулы. Идеи должны позднее принять математическую форму количественной теории, сделать возможным сравнение с экспериментом ³⁵.

Именно такой была великая идея о волновых свойствах материи, которую де Бройль сформулировал в трех статьях ³⁶, опубликованных в еженедельных «Докладах Парижской академии наук» в 1923 г., и позже в более развернутом виде в диссертации «Исследования по теории квантов» ³⁷. Эта идея родилась не случайным образом, ей предшествовали глубокие размышления, подготовленная почва. В основе исследований де Бройля была историко-научная проблема. Он не раз в своих воспоминаниях указывал на истоки первоначальных размышлений. Введение Эйнштейном понятия световых квантов сначала для объяснения фотоэффекта света, позже для фотоэффекта рентгеновских лучей, и наличие в условиях квантования Бора целых чисел интуитивно подсказывали де Бройлю, что нечто волнообразное должно вмешаться в движение электронов, что электроны могут транспортироваться волной. Эту интуицию надо было переводить в более точную математическую форму.

Л. С. Полак в исследовании вопросов возникновения волновой механики отмечает:

Воспользовавшись оптико-механической аналогией и сформулировав ее на основе математического аппарата теории относительности, де Бройль

³⁴ Louis de Broglie. Physicien et penseur... P. 457.

³⁵ Эйнштейн А. Эволюция физики. М., 2005. С. 231.

³⁶ Бройль Л., де. Волны и кванты // Бройль, де. Избранные научные труды... Т. 1. С. 193; Бройль Л., де. Кванты света. Дифракция и интерференция // Там же. С. 196; Бройль Л., де. Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма // Там же. С. 198

³⁷ Бройль Л., де. Исследования по теории квантов // Бройль, де. Избранные научные труды... Т. 1. С. 253.

получил уравнения, которые позволили развить основные гипотезы его теории³⁸.

Идея оптико-механической аналогии восходит к XVII в.

Большое число открытых световых явлений требовало создание теории, способной рассматривать их с единой точки зрения. Именно эту задачу поставил перед собой Х. Гюйгенс. Передающийся от частицы к частице импульс Декарта принимает у Гюйгенса конкретную форму волны. В своем «Трактате о свете» он все явления рассматривает именно с волновой точки зрения, исходя из конечности скорости распространения волн и сформулированного им принципа огибающей волны³⁹.

Оптика Гюйгенса не получила в XVII в. того признания, которого она заслуживала. И у этого факта есть свои объяснения: с одной стороны, «Трактат о свете»⁴⁰ был написан в духе Декарта, а его идеи имели уже незначительное влияние по сравнению с Ньютоном, который отстаивал корпускулярную точку зрения, с другой – оставались вопросы в оптике (например, объяснение цвета, прямолинейность распространения света), которые волновая теория Гюйгенса на тот момент не могла решить. Вслед за Ньютоном в XVII в. большинство ученых поддерживали и развивали корпускулярные взгляды на природу света, и волновая теория Гюйгенса была забыта.

Во времена Гюйгенса, около 1660 г., французский математик П. Ферма сформулировал принцип, согласно которому свет, представляющий собой распространение волны со скоростью u , выбирает такой путь, прохождение которого требует наименьшего времени. Принцип кратчайшего времени пробега света, принцип Ферма, говорит о том, что луч света, выходящий из заданной точки A и попадающий в заданную точку B , затрачивает при прохождении своего действительного пути время более короткое, чем то, которое понадобилось бы ему для прохождения от A до B по любому другому пути. Для неоднородной среды, в которой волновая скорость u меняется от точки к точке, получается соотношение: интеграл обратного значения волновой скорости, взятый по пути AB , имеет минимум:

$$\int_A^B \frac{ds}{u} = \min$$

Это соотношение связано с принципом Мопертюи в механике, согласно которому для действительного движения материальной точки от A к B интеграл

³⁸ Полак Л. С. Возникновение волнового аспекта квантовой механики // 50 лет квантовой механики... С. 43.

³⁹ Френк А. М., Спасский Б. И. Из истории оптики в XVII веке (к оптике Гюйгенса) // История и методология естественных наук. М., 1971. Вып. 10. Физика. С. 192.

⁴⁰ Гюйгенс Х. Трактат о свете, в котором объяснены причины того, что с ним происходит при отражении и при преломлении, в частности, при странном преломлении исландского шпата. М., 1935.

механической скорости v , взятый по пути AB , должен иметь минимум:

$$\int_A^B v ds = \min$$

П. Мопертюи утверждал: «путь, которого он (свет. – A . C .) придерживается, является путем, для которого количество действия будет наименьшим» ⁴¹. «Количество действия» у Мопертюи измеряется произведением mvs , где m – масса, v – скорость, s – путь, пробегаемый телом. Решающую роль в развитии принципа наименьшего действия сыграл Ж. Лагранж ⁴². Он показал, что действие не всегда является минимальным, оно может быть и максимальным, поэтому принцип Мопертюи правильнее назвать экстремальным принципом.

В этих двух принципах бросается в глаза разное поведение скорости механического движения v и волновой скорости u : оптическая длина пути обратно пропорциональна скорости, а действие прямо пропорционально скорости. Согласно принципу Ферма и теории Гюйгенса, свет распространяется в вакууме быстрее, чем в преломляющих средах, а согласно Мопертюи и корпускулярной теории – наоборот.

В принципах Мопертюи и Ферма, между механикой и оптикой, существовала аналогия математической формы записи условий движения материальной точки и световой волны при следовании из начальной в конечную точку. На эту аналогию обратил внимание де Бройль и выдвинул гипотезу о том, что каждой частице материи нужно сопоставить некий колебательный процесс так, чтобы квант энергии этого колебания равнялся энергии самой частицы, т. е. произведению массы частицы на квадрат скорости света. Но до этого момента в представлениях о свете с переменным успехом побеждала волновая или корпускулярная точка зрения.

В конце XVIII в. благодаря работам Т. Юнга (его работы по волновой оптике были встречены чрезвычайно враждебно приверженцами корпускулярной теории, «он почти в полном одиночестве защищал свои взгляды», – пишет Полак ⁴³) и позднее теоретическому объяснению Френелем явлений, наблюдавшихся Юнгом, начинается новый триумфальный этап в истории волновой теории света. При этом существовала и корпускулярная теория со своим объяснением экспериментальных фактов. В своей работе Полак отмечал:

Создавалось представление, что обе теории, описывающие совокупность оптических явлений, не затрагивают их сущности, что можно применять ту или иную в каждом конкретном случае в зависимости от характера рассматриваемой задачи или просто считать, что вопрос об истинности этих двух теорий остается до поры до времени открытым. Можно было говорить о существовании дуализма – волнового и корпускулярного – в

⁴¹ Мопертюи П. Согласование различных законов природы, которые до сих пор казались несовместимыми // Вариационные принципы механики... С. 26.

⁴² Анализ работ Лагранжа см. в: Полак Л. С. Вариационные принципы, их развитие и некоторые применения в физике (1662–1926). Автореф дис. ... док. физ.-мат. наук. М., 1957.

⁴³ Полак Л. С. Из истории волновой теории света // ВИЕТ. 1956. Вып. 2. С. 76.

физических представлениях как о природе света, так и о наблюдаемых экспериментальных физических явлениях⁴⁴.

Оптико-механическая аналогия впервые появилась в работах У. Гамильтона, начиная с 1827 г. он публикует ряд работ по «теории систем лучей». В основу своего исследования Гамильтон положил принцип Ферма. Он обратил внимание на сходство между распространением лучей в оптически неоднородной среде и движением частицы в заданном потенциальном поле и придал этому сходству строгий математический вид. Он доказал,

что оба принципа – Мопертюи и Ферма, приводят к одним и тем же выводам относительно оптических лучей при условии, что скорость корпускул, фигурирующая в принципе Мопертюи, изменяется обратно пропорционально скорости волн, фигурирующей в принципе Ферма и в теории волн Гюйгенса – Френеля⁴⁵.

Позднее этой проблемой заинтересовался один из крупнейших математиков XIX в. Ф. Клейн. Он писал, что

геометрическая оптика имеет дело с понятием светового луча и [...] подчиняется дифференциальному уравнению в частных производных первого порядка второй степени:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 = 0$$

В силу этого она сначала представляется совершенно отличной от физической оптики, в центре которой стоит дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка первой степени:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0$$

Однако геометрическая оптика может считаться предельным случаем физической, когда рассматриваются бесконечно малые длины волн⁴⁶.

Подробный анализ оптико-механической аналогии и динамики Гамильтона сделан Полаком⁴⁷.

Оптико-механическая аналогия Гамильтона, которая основывалась на совпадении форм законов движения механической частицы и луча, как нормали к волновой поверхности, не отождествляла этих двух процессов.

⁴⁴ Полак. Возникновение волнового аспекта квантовой механики... С. 24.

⁴⁵ Лошак Ж. Геометризация физики. М.; Ижевск, 2005. С. 62.

⁴⁶ Клейн Ф. О новых английских работах по механике // Вариационные принципы механики.... С. 513.

⁴⁷ Полак Л. С. Вариационные принципы механики, их развитие и применение в физике. М., 1960.

Она как бы намекала на возможную связь движения частицы с движением волны ⁴⁸.

Луч света может быть истолкован и как нормаль к некоторой волновой поверхности, и как траектория потока световых частиц (рис. 2).

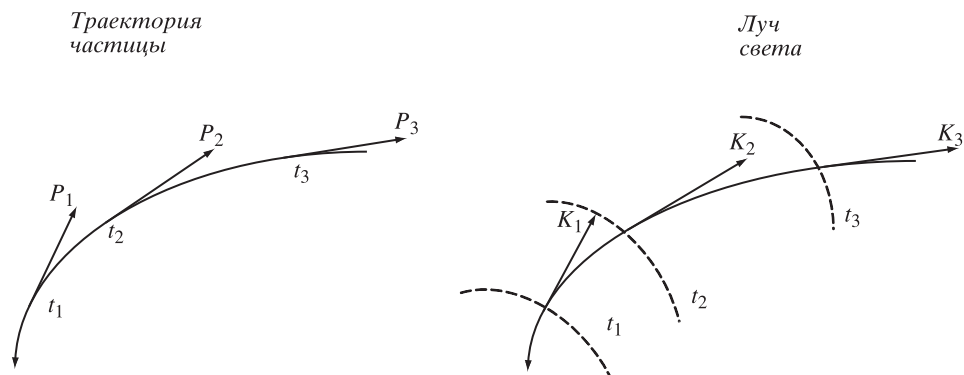


Рис. 2. Аналогия между частицей и лучом свет

Оптико-механическая аналогия Гамильтона оставалась не востребовавшей. Лошак пишет:

Однако следует признать, что эти аналогии и не были пригодны для использования и что они представляли собой лишь формальное сближение, самое лучшее доказательство эквивалентности теорий, которые оставались разделенными ⁴⁹.

Кванты света и СТО как отправная точка рассуждений де Бройля

В 1905 г. в статье «Об одной эвристической точке зрения, касающейся получения и превращения света» Эйнштейн высказал гипотезу о том, что световой поток состоит из дискретных корпускулярных квантов энергии $h\nu$. Де Бройль писал, вспоминая начало своей работы по созданию волновой механики: «...я много размышлял над уже известными работами Эйнштейна о квантах света» ⁵⁰. Отношение среди физиков к этой гипотезе долгое время оставалось скептическим. Особый интерес эта гипотеза представляла для объяснения явления фотоэффекта для света, а также фотоэффекта, вызванного рентгеновскими лучами. Представления Эйнштейна о квантах света были первым шагом к корпускулярно-волновому синтезу, осуществленного де Бройлем в 1923 г.

⁴⁸ Полак Л.С. Вариационные принципы механики //Вариационные принципы механики...С. 537.

⁴⁹ Лошак. Геометризация физики... С. 63.

⁵⁰ Бройль, де. По тропам науки... С. 349.

Идея о кванте действия, который послужил бы соединительным звеном между корпускулярными и волновыми представлениями о частицах вещества, родилась только после выдвижения квантовой гипотезы Планка и создания специальной теории относительности Эйнштейна. В 1913 г., когда де Бройль изучал основы аналитической механики, он задавался вопросом, не ведут ли затруднения, возникшие в «старой квантовой теории» Бора и Зоммерфельда, к необходимости синтеза оптики и механики. В сборнике, посвященном шестидесятилетию де Бройля, можно найти обзор его научных работ, написанный им самим, в котором излагается неизбежность синтетического взгляда, общего синтеза, примененного как к материи, так и к свету. Волновую и корпускулярную точки зрения он связал постоянной Планка:

вдохновляясь релятивистским подходом и идеями, близкими к развитым в прошлом веке Гамильтоном, я пришел к выводу, что к движению каждой частицы надо присоединить распространение волны, частота и длина которой были бы связаны с энергией и количеством движения частицы формулами, в которых фигурировала константа h ⁵¹.

В теории Мопертюи механическая скорость v играет ту же роль, что обратная величина волновой скорости $1/u$ в теореме Ферма. Этот известный факт де Бройль использовал в своих рассуждениях о волне и частице, дополнив его преобразованиями времени, вытекающими из теории относительности. Во время учебы в Сорбонне, слушая лекции Ланжевена по теории относительности, де Бройль заинтересовался «парадоксом часов»: время замедляется в подвижной системе отсчета. Суть преобразований, выполненных де Бройлем, можно представить следующим образом. Распространение в пространстве волны со скоростью u описывается уравнением:

$$S = A \sin \left[2\pi \nu \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] \quad (1)$$

С другой стороны, преобразование Лоренца говорит о том, что если один из наблюдателей движется вдоль оси x относительно другого со скоростью v , то отсчеты времени связаны между собой формулой:

$$t' = \beta \left(t - \frac{v}{c^2} x \right), \quad \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

Если механической скорости v сопоставить волновую скорость u так, что $uv = c^2$, то уравнение (2) можно переписать в виде:

$$t' = \beta \left(t - \frac{x}{u} \right), \quad u = \frac{c^2}{v}.$$

Из этого преобразования видно, что всякий колебательный процесс, связанный с подвижным телом, можно рассматривать как волну, скорость распро-

⁵¹ Louis de Broglie. Physicien et penseur... P. 457.

странения которой обратно пропорциональна механической скорости тела. Релятивистское преобразование времени послужило одним из оснований для предположения де Бройля о том, что каждой элементарной частице присущ некий внутренний колебательный процесс.

Анализ логики формирования научных воззрений де Бройля приводит нас к исследованиям рентгеновских лучей в частной лаборатории Мориса де Бройля. В лаборатории старшего брата Луи де Бройль после шестилетнего перерыва, связанного со службой в армии во время Первой мировой войны, продолжил свои теоретические исследования. Лаборатория была одной из лучших в Европе, имела спектрометр β -частиц, который позволял проводить эксперименты, подобные тем, что выполняли в Манчестере Э. Резерфорд и его ученики. М. де Бройль и его сотрудник А. Довилье записывали на фотопластинки траектории электронов, вырывааемых из вещества под действием монохроматических X -лучей и движущихся с различными скоростями⁵². Джеммер пишет, что А. Х. Комптон оставил в своих воспоминаниях об эффекте, открытом им в 1923 г., следующий пассаж:

С радостью обнаружил, что меня поддерживают П. А. Росс из Стенфорда и М. де Бройль из Парижа, фотографические спектры которого демонстрировали результаты, сходные с моими⁵³.

Результаты экспериментов, проводимые в лаборатории М. де Бройля, обсуждались и анализировались вместе с Л. де Бройлем, и в этих обсуждениях рождалось убеждение, что рентгеновские лучи были и частицами, и волнами:

Можно найти кинематические свойства в волнообразном излучении и определенные периодические свойства в движении электронов⁵⁴.

Свои первые научные статьи о свойствах X - и γ -лучей Л. де Бройль писал в 1920–1922 гг. в соавторстве с М. де Бройлем и А. Довилье⁵⁵.

Многочисленные эксперименты в лаборатории М. де Бройля давали основания для утверждения о существовании квантов света, способных отдавать полностью свою энергию $h\nu$ электронам вещества, на которое падает рентгеновское излучение. Кинетическая энергия этих электронов растет линейно с частотой падающего излучения и не зависит от его интенсивности. На III Сольвеевском конгрессе в апреле 1921 г. М. де Бройль выступал с приглашенным докладом, в котором настаивал, что излучение должно быть корпуску-

⁵² *Wheaton, B. R. Atomic Waves in Private Practice // Quantum Mechanics at the Crossroads...* P. 54.

⁵³ Цит. по: Джеммер. Эволюция понятий квантовой механики... С. 164.

⁵⁴ *Wheaton. The Tiger and the Shark...* P. 289.

⁵⁵ См. например: *Broglie, L., de, Broglie, M., de. Sur le modèle d'atome de Bohr et les spectres corpusculaires // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. 1921. Vol. 172. P. 746; Broglie L., de, Dauvillier M. A. Sur le système spectral des rayons Roentgen // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. 1922. Vol. 175. P. 685; Broglie L., de, Broglie M., de. Remarques sur les spectres corpusculaires et l'effect photoélectrique // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. 1922. Vol. 175. P. 1139.*

лярным или «если это волна, то ее энергия должна быть сконцентрирована в точках на поверхности волны»⁵⁶. Позднее Л. де Бройль вспоминал, обращаясь к брату:

На каждом этапе моей жизни и карьеры я находил тебя рядом как проводника и как поддержку. Мы обсуждали большинство трудных вопросов того времени, особенно интерпретации твоих экспериментов по X-фотоэффекту. Настойчивость, с которой ты обращал мое внимание к важности и бесспорно существующей двойственности частиц и волн излучения, мало-помалу переориентировали мои мысли⁵⁷.

Летом 1923 г. Л. де Бройль вынашивал идею о распространении принципа корпускулярно-волновой двойственности на обычную материю, в частности, на электроны. В пользу этого предположения были оптико-механическая аналогия и наличие целых чисел в условиях квантования. В Нобелевской лекции Л. де Бройля есть слова:

Определение стабильных движений электронов в атоме заставляет вводить целые числа, но до сих пор единственными явлениями, для которых целые числа вводились в физику, были интерференция и собственные колебания. Это подсказало мне идею о том, что электроны не могут быть представлены как просто частицы, и им также необходимо приписать некоторую периодичность⁵⁸.

В первой главе своей диссертации он выдвигает гипотезу:

согласно какому-то великому закону природы каждая порция энергии массы m_0 связана с периодическим процессом частоты ν_0 уравнением $h\nu_0 = m_0 c^2$, где ν_0 , конечно, измеряется в системе, связанной с порцией энергии. Эта гипотеза является основой нашей системы: ценность ее, как и всякой гипотезы, заключается в важности тех выводов, к которым она приводит⁵⁹.

При переходе в другую инерциальную систему отсчета это равенство нарушается: масса возрастает $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$, а частота уменьшается $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$. Чтобы преодолеть это затруднение, де Бройль формулирует теорему, которую называет «теоремой гармонии фаз»:

Периодический процесс, связанный с движущимся телом, частота которого для неподвижного наблюдателя равна $\nu_1 = \frac{m_0 c^2}{h} \sqrt{1 - \beta^2}$, кажется ему постоянно находящимся в одной фазе с волной частоты $\nu = \frac{m_0 c^2}{h} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$, распространяющейся в том же направлении, что и движущееся тело, со скоростью $V = c/\beta$.

⁵⁶ *Wheaton. The Tiger and the Shark...* P. 54.

⁵⁷ Цит. по: *Wheaton. Atomic Waves in Private Practice...* P. 55.

⁵⁸ Нобелевская лекция, прочитанная в Стокгольме 12 декабря 1929 г. // *Бройль, де. Избранные научные труды...* Т. 1. С. 544.

⁵⁹ *Бройль Л., де. Исследования по теории квантов // Бройль, де. Избранные научные труды...* Т. 1. С. 260.

Эту волну, распространяющуюся со скоростью, большей скорости света, де Бройль называет «фазовая волна». Именно фазовая волна управляет переносом энергии. Для групповой скорости фазовых волн де Бройль доказывает еще одну теорему: «Групповая скорость фазовых волн равна скорости движения тела»⁶⁰. Он развивает мысль и предлагает положить в основание динамики новый принцип, согласно которому частица следует по одному из лучей фазовой волны и подчиняется принципу Ферма.

Наиболее объемная вторая глава диссертации де Бройля называется «Принцип Мопертюи и принцип Ферма». В ней он осуществил мечту своей молодости – синтез механики и оптики:

Принцип Ферма, приложенный к фазовой волне, идентичен принципу Мопертюи, приложенному к движущемуся телу, динамически возможные траектории которого идентичны возможным лучам волны⁶¹.

Обобщая полученный результат на случай траекторий с кривизной и переменных скоростей в силовом поле, де Бройль показал, что в этом случае траекторию можно вычислить с помощью принципа Ферма как траекторию «в среде с переменным показателем преломления». Он выражает принцип Ферма в виде, в точности совпадающим с вариационным принципом Мопертюи.

Волновая концепция де Бройля послужила отправной точкой для развития волновой механики. В 1926 г. Шредингер написал нерелятивистское волновое уравнение для волновой функции ψ , которая позже благодаря М. Борну приобрела вероятностный смысл и в которой не было места для представлений де Бройля о «частице, как об очень малом локализованном объекте, движущемся по траектории»⁶². Очень скоро была показана эквивалентность двух теоретических представлений: волновой механики де Бройля – Шредингера и квантовой механики Гейзенберга – Иордана – Борна. В 1927 г. Гейзенберг и Бор завершили разработку интерпретации квантовой механики, называемой в современной литературе копенгагенской интерпретацией и ставшей общепризнанной.

Волны де Бройля в копенгагенской интерпретации квантовой механики приобрели физический смысл волн вероятности. Де Бройль сожалел, что полностью была забыта его идея о фазовой волне, которую он считал физически реальной и с помощью которой им было достигнуто корпускулярно-волновое представление материи. В воспоминаниях де Бройля спустя тридцать лет после его открытия волновых свойств материи можно прочитать:

В 1924 году, на другой день после защиты моей диссертации, я был полон представлениями классической физики и именно в рамках этих представлений, то есть в рамках картезианских представлений явлений с помощью фигур и движений, я пытался интерпретировать введенные мной новые идеи [...] Я вполне естественно представлял себе частицу в виде

⁶⁰ Там же. С. 264.

⁶¹ Там же. С. 268.

⁶² *Бройль Л., де. Об истинных идейных основаниях волновой механики // Бройль, де. Избранные научные труды... Т. 2. С. 319.*

некоторой особенности внутри протяженного волнового явления, составляющую вместе с волной единую физическую реальность⁶³.

Заключение

На генезис идеи Луи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме материи, послужившей базой для создания волновой механики, оказали влияние множество связанных между собой, разных по своему значению факторов, среди которых можно выделить главные.

Во-первых, фундаментом для восприятия и решения де Бройлем проблем, ставших актуальными в начале XX в., была французская научная мысль, которую он впитал и в развитии которой принимал участие. Исходя из картезианских традиций, де Бройль обратился к основным идеям оптики и механики XVII и XVIII вв., к забытой в конце XIX в. оптико-механической аналогии Гамильтона. Он обратил внимание на эту аналогию математической формы записи условий движения материальной точки и световой волны и выдвинул гипотезу о том, что каждой частице материи нужно сопоставить некий колебательный процесс так, чтобы квант энергии этого колебания равнялся энергии самой частицы, т. е. произведению массы частицы на квадрат скорости света.

Во-вторых, в самом начале своей научной деятельности Л. де Бройль столкнулся в лаборатории М. де Бройля с проблемами природы коротковолнового излучения в виде X- и γ -лучей. Эксперименты, связанные с явлением фотоэффекта под действием рентгеновского излучения, порождали убежденность в том, что рентгеновские лучи обладали свойствами и частиц и волн.

В-третьих, гипотеза Эйнштейна о квантах света, появившаяся в статье «Об одной эвристической точке зрения, касающейся излучения и превращения света» в 1905 г., послужила де Бройлю исходным пунктом для его дальнейших рассуждений. Кванты света воспринимались им так же, как и другие частицы (де Бройль рассматривает атом света как тело с бесконечно малой массой), что позволяло утверждать о существовании фазовой волны, сопровождающей механическое перемещение материальных тел.

И наконец, без теории относительности Эйнштейна де Бройль не смог бы прийти к идее фазовой волны. Существование фазовой волны объяснялось де Бройлем как результат релятивистской инвариантности уравнения $h\nu_0 = m_0 c^2$, являвшегося отправной точкой его рассуждений. Идея фазовой волны, которая заключалась в отсутствии различия между атомом вещества и атомом света, стала революционной. Фазовая волна де Бройля управляет переносом энергии, что позволило де Бройлю объяснить волновые явления интерференции и дифракции. Тем самым было установлено, что свет и вещество фундаментально представляют собой единую сущность.

⁶³ Бройль, де. Останется ли квантовая механика индетерминистской?.. С. 109.